

ANÁLISIS DEL ELECTROCARDIOGRAMA CON TÉCNICAS DESARROLLADAS EN PYTHON

Ana Daniela del Río Pulido
tutora Erin C. McKiernan

Licenciatura en Física Biomédica
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

junio de 2021



Índice

- 
- A faint background image of an ECG waveform is visible across the slide, featuring vertical baseline shifts and several sharp, narrow spikes.
- 1 Introducción
 - 2 Objetivos
 - 3 Técnicas para analizar el ECG
 - 4 Aplicación a las bases de datos
 - Antes y después del ejercicio
 - Meditación
 - 5 Discusión y conclusiones

Tabla de contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Técnicas para analizar el ECG

4 Aplicación a las bases de datos

- Antes y después del ejercicio
- Meditación

5 Discusión y conclusiones

Motivación: Enfermedades cardiovasculares (ECV)

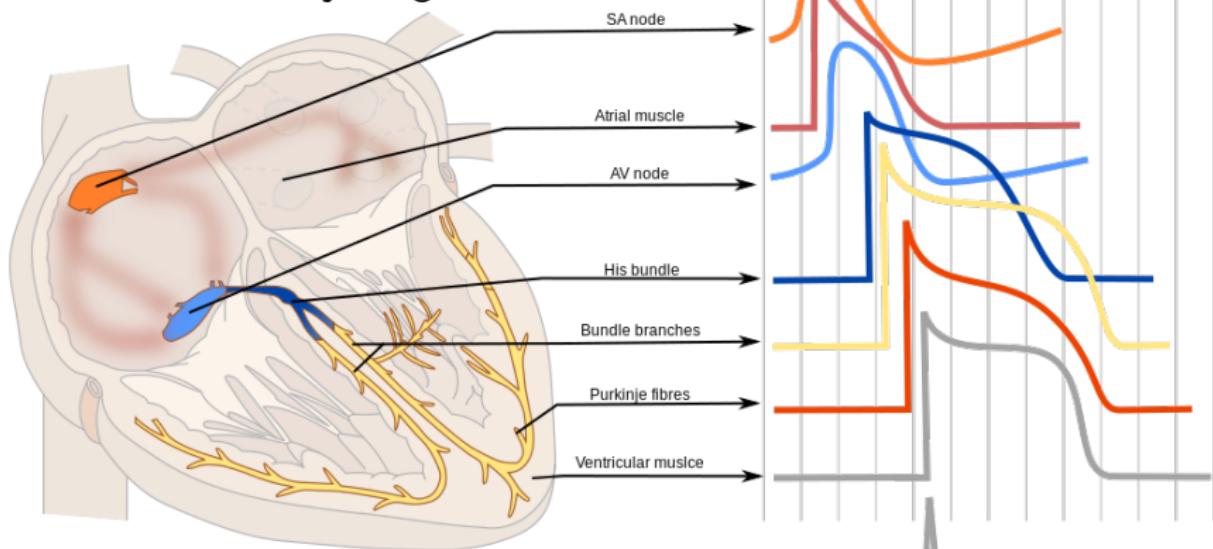
- 1° causa de muerte en el mundo [1].
- La mayoría de las ECV son prevenibles.
- Relacionadas con el estilo de vida, las relaciones sociales y la naturaleza.
- Afortunadamente son reversibles; importancia del diagnóstico temprano.
- ECG, herramienta más usada.



Cuerpo humano y corazón. Créditos: Pharmaceutical Technology [2].

Objeto de estudio: corazón

- Bombea sangre. Contracción por cambios en voltaje. Fig.



- Componentes: onda P, complejo QRS y onda T.
- Técnica no invasiva; electrodos en la piel.



Conducción. Créditos: ECGpedia, CC BY-NC-SA 3.0 [3].

Sistema nervioso autónomo

- Controla las funciones involuntarias del cuerpo humano.
- Modula a las células nodales (marcan el ritmo de la frecuencia cardiaca).

Simpático

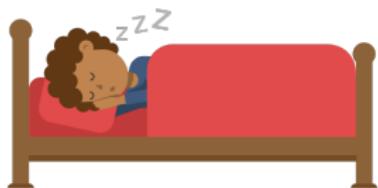
- Respuesta de alerta.
- Aumenta la frecuencia cardiaca.



León enojado. Créditos: Dominio público [4].

Parasimpático

- Funciones de descanso.
- Disminuye la frecuencia cardiaca.



Persona durmiendo. Créditos: Wikimedia Commons por Videoplasty.com, CC-BY-SA 4.0 [5].

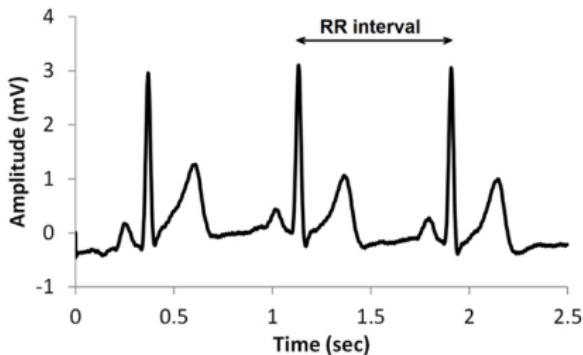
Electrocardiograma (ECG) e intervalos temporales R-R

- **Serie de tiempo:** mediciones de una observable de un sistema.

Ejemplos: frecuencia cardiaca (contracción de ventrículos), **ECG** e **intervalos temporales R-R**. Fig.

$$\text{Frecuencia cardiaca} = \frac{60}{\text{tiempo(pico } R_{i+1}) - \text{tiempo(pico } R_i)} \left[\frac{\text{latidos}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{Intervalo R-R} = \text{tiempo(pico } R_{i+1}) - \text{tiempo(pico } R_i) \text{ [s, min]}$$



ECG e intervalo R-R. Créditos: D. J. Cornforth, M. P. Tarvainen y H. F. Jelinek. [6].

Sistemas dinámicos. Conceptos

- Modelar la actividad del corazón como un sistema dinámico.
- **Sistema dinámico:** objeto de estudio que cambia con el tiempo.
- **Espacio fase:** estados de un sistema. Cambios en las variables.
- Problema: no conocemos el espacio fase. Relevancia.
- **Atractor:** estructura en el espacio fase donde muchas condiciones iniciales terminan en él [7, pg. 17]. Formas diversas.
- Reconstrucción. Método de retraso (τ)

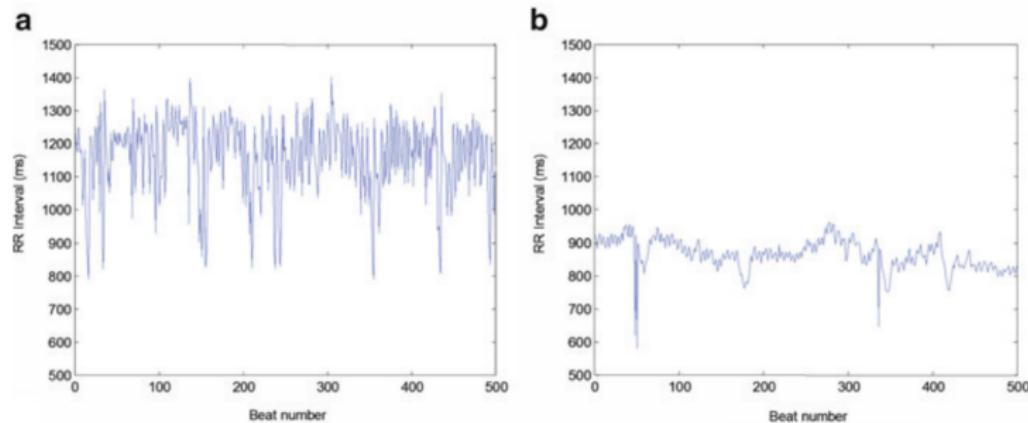


(Abrir gif)

Secuencia de un zoótropo, $\tau = 1$. Créditos: Mrs. Cook [8].

Variabilidad cardiaca

- Intuición. Relación entre corazón y reloj. Fig.
- Cierta variabilidad es sana.
- Def. "La variación temporal entre cada latido cardiaco"[\[9\]](#) [\[10\]](#), pg. 354]. Desviación estándar de los intervalos R-R.
- Pérdida de variabilidad. Indica degradación del sistema parasimpático [\[11\]](#), pg. 449] [\[12\]](#).



Serie de tiempo de intervalos R-R. Sujeto sano a la izquierda y sujeto con una falla cardiaca a la derecha. Créditos: A. H. Khandoker y col. [\[12\]](#), pg. 3].

Reconstrucción del espacio fase. Diagrama de Poincaré

- Reconstrucción del espacio fase con la serie de tiempo de intervalos R-R con $\tau = 1$ y sin trayectorias. Fig.
- Literatura.

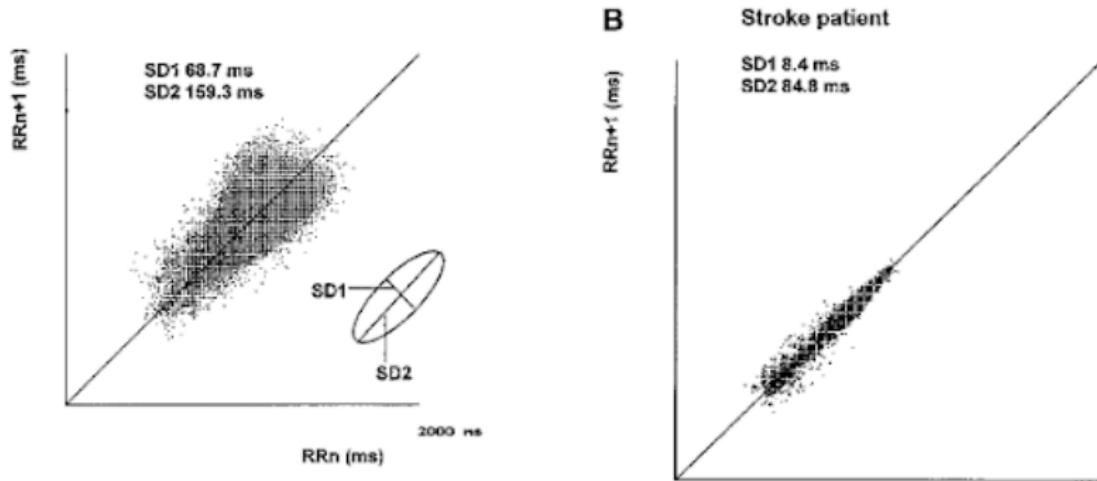
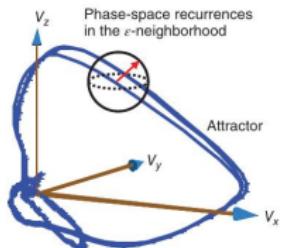


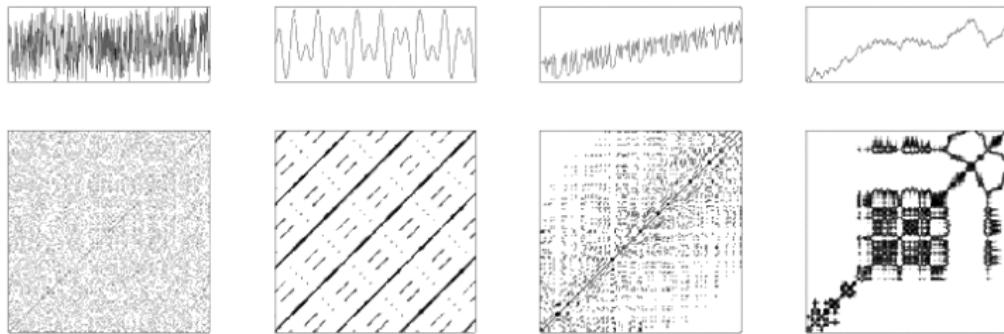
Diagrama de Poincaré. Registro normal (izquierda) y registro de un paciente quien tuvo un ataque agudo al miocardio (derecha). Créditos: J. T. Korpelainen y col. [13].

Diagrama de recurrencia (repetición aproximada)

- Idea de ciclos, e.g. calendario maya o reencarnación.
- Distancias en el espacio fase [14, pg. 4].
- Matriz con valores binarios. Radio épsilon. Fig.
- Patrones de las series de tiempo se distinguen mejor. Fig.



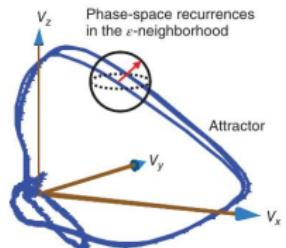
Atractor reconstruido en 3D y esfera de radio ϵ . Créditos: H. Yang, et al. [15].



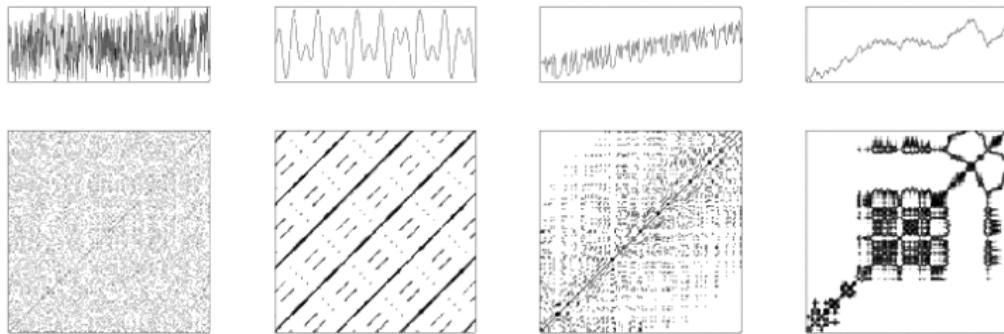
Arriba series de tiempo. Abajo diagramas de recurrencia. De izquierda a derecha: ruido blanco, oscilaciones armónicas con dos frecuencias, un mapa logístico y datos de un proceso de auto-regresión. Créditos: Norbert Marwan, CC-BY-SA-2.0-DE [16].

Diagrama de recurrencia (repetición aproximada)

- Idea de ciclos, e.g. calendario maya o reencarnación.
- Distancias en el espacio fase [14, pg. 4].
- Matriz con valores binarios. Radio épsilon. Fig.
- Patrones de las series de tiempo se distinguen mejor. Fig.
- Normalización de la distancia. Mapa de calor.



Atractor reconstruido en 3D y esfera de radio ϵ . Créditos: H. Yang, et al. [15].



Arriba series de tiempo. Abajo diagramas de recurrencia. De izquierda a derecha: ruido blanco, oscilaciones armónicas con dos frecuencias, un mapa logístico y datos de un proceso de auto-regresión. Créditos: Norbert Marwan, CC-BY-SA-2.0-DE [16].

Tabla de contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Técnicas para analizar el ECG

4 Aplicación a las bases de datos

- Antes y después del ejercicio
- Meditación

5 Discusión y conclusiones

Objetivos

- ① Explorar las técnicas reportadas para analizar el ECG. Técnicas: análisis geométrico, reconstrucción del espacio fase y diagramas de recurrencia.
- ② Generar el repositorio de acceso abierto. Código en Python, organizado por temas con cuadernos en Jupyter.
https://github.com/DanidelRio/electrocardiogram_analysis
- ③ Analizar los registros de las 2 bases de datos disponibles: meditación y después de realizar ejercicio.
- ④ Obtener conclusiones a partir del análisis.

Objetivos

- ① Explorar las técnicas reportadas para analizar el ECG. Técnicas: análisis geométrico, reconstrucción del espacio fase y diagramas de recurrencia.
- ② Generar el repositorio de acceso abierto. Código en Python, organizado por temas con cuadernos en Jupyter.
https://github.com/DanidelRio/electrocardiogram_analysis
- ③ Analizar los registros de las 2 bases de datos disponibles: meditación y después de realizar ejercicio.
- ④ Obtener conclusiones a partir del análisis.

- Acceso abierto. Maximiza acceso y reuso
- Explicar paso a paso. Caja transparente.
- Material interactivo. Investigadores, médicos y estudiantes. **Sus datos.**
- Material reutilizable. Descargar o modificar en el navegador (Google Colab o Binder).
- Presentar resultados selectos.
- Ejemplo de como se ven los cuadernos.

(Abrir cuaderno).

Tabla de contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Técnicas para analizar el ECG

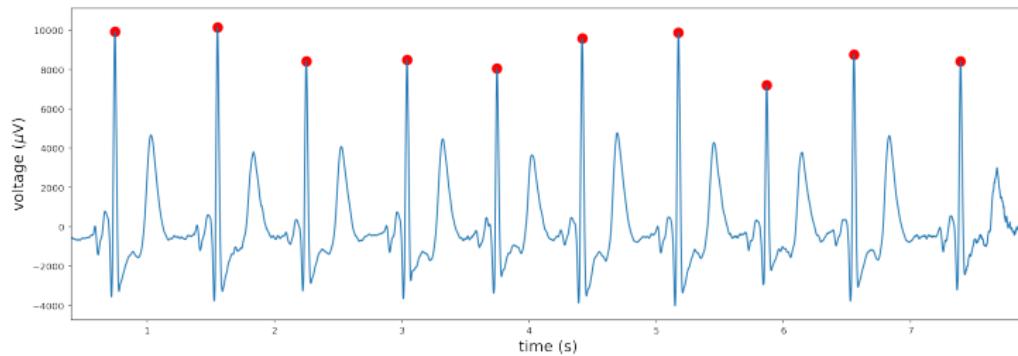
4 Aplicación a las bases de datos

- Antes y después del ejercicio
- Meditación

5 Discusión y conclusiones

Análisis estándar. Picos R-R

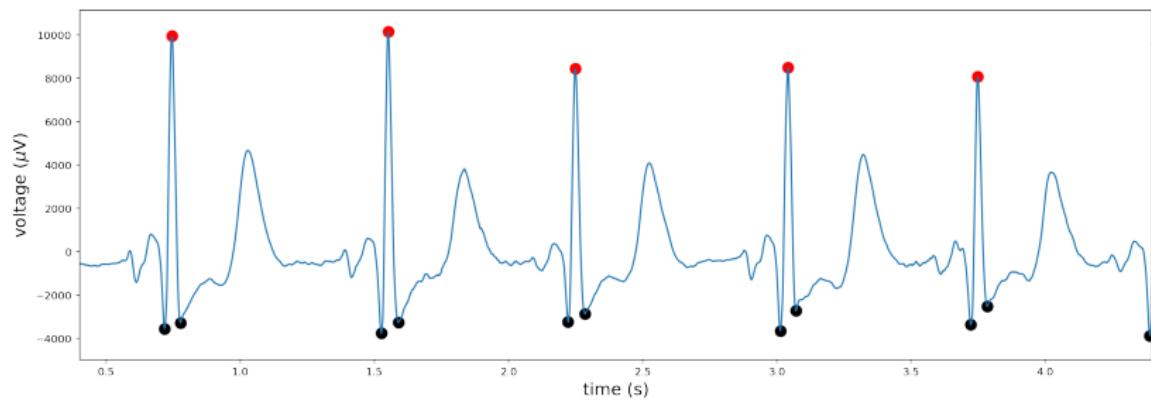
- Medir intervalos temporales y verificar que caen en intervalos promedio.
- Construcción de un algoritmo para detectar las componentes del ECG.
- Requisitos algoritmo: línea base estable, amplitud de picos R mayor que valor umbral (la onda T).



ECG en azul y picos R en rojo.

Análisis estándar. Complejo QRS

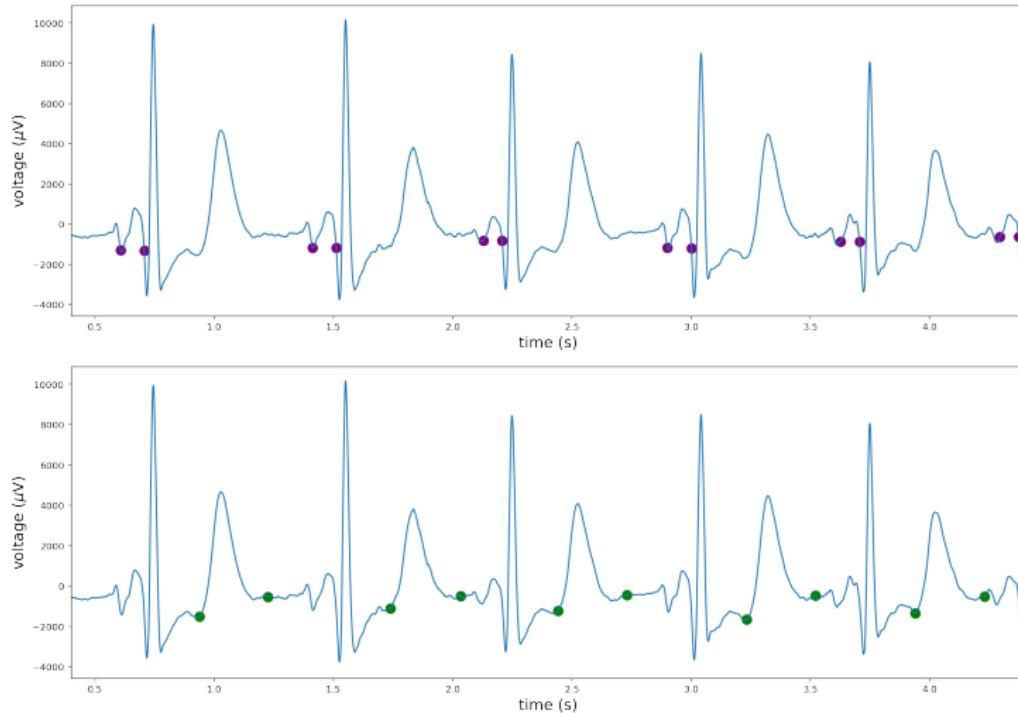
- Ventanas temporales a partir de los picos R.
- Componentes Q y S con valores mínimos en los intervalos izquierdo y derecho.



ECG en azul y complejo QRS entre los puntos negros.

Análisis estándar. Onda P y T

- Puntos de inflexión

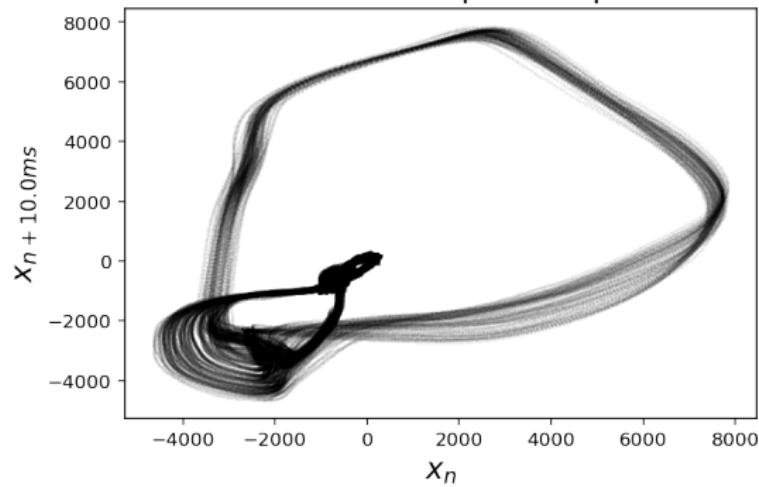


ECG en azul. Onda P entre los puntos morados. Onda T entre los puntos verdes.

Reconstrucción del espacio fase con ECG

Serie de tiempo del ECG, retraso temporal de 10 ms.

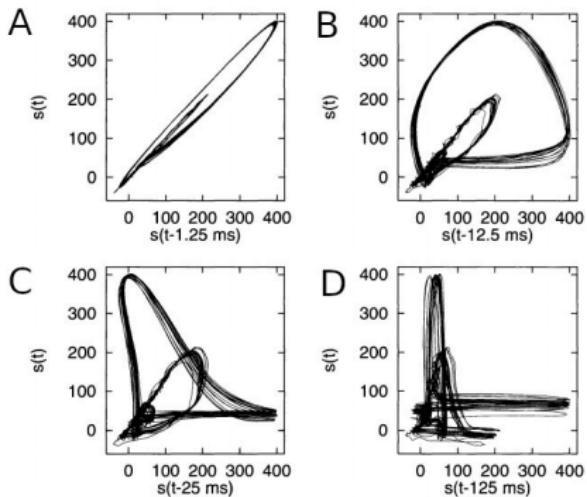
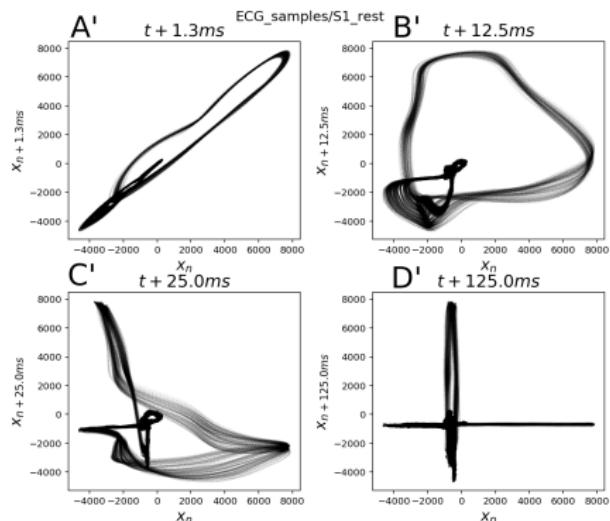
Heart's first reconstructed phase space: $t + 10.0\text{ms}$



(Abrir gif).

Reconstrucción del espacio fase con ECG en 2D. Explorar τ

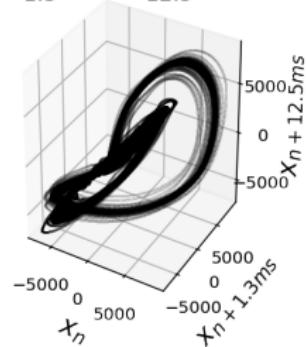
- A : $\tau = 1.25$ ms. Identidad. Valores consecutivos similares.
- B: $\tau = 12.5$ ms. El ciclo grande es QRS. **Valor elegido.**
- C: $\tau = 25$ ms. Componentes más lentas (ondas P y T).
- D: $\tau = 125$ ms. Dinámicas difíciles de describir.



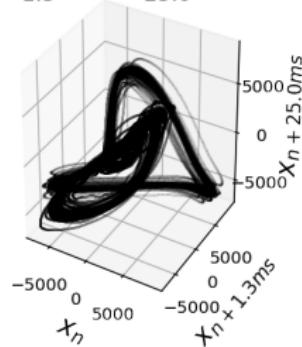
Las 4 gráficas de la derecha son trabajo original de Petr Saparin en 1995 [17, pg. 40]. Las 4 gráficas de la izquierda son una reproducción con los mismos retrasos temporales.

Reconstrucción del espacio fase con ECG en 3D con retrasos de: 1.3, 12.5, 25 y 125 ms

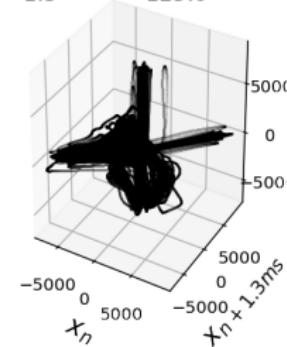
$t_{1.3}$ and $t_{12.5}$ ms



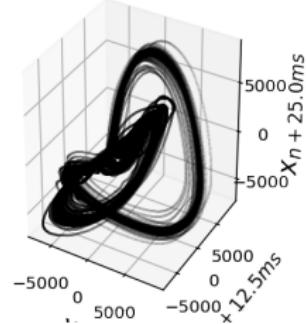
$t_{1.3}$ and $t_{25.0}$ ms



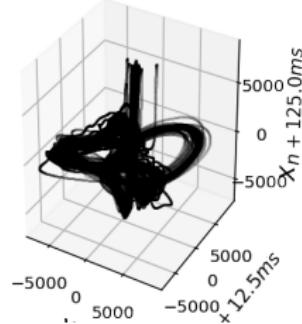
$t_{1.3}$ and $t_{125.0}$ ms



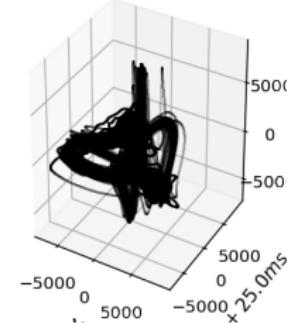
$t_{12.5}$ and $t_{25.0}$ ms



$t_{12.5}$ and $t_{125.0}$ ms

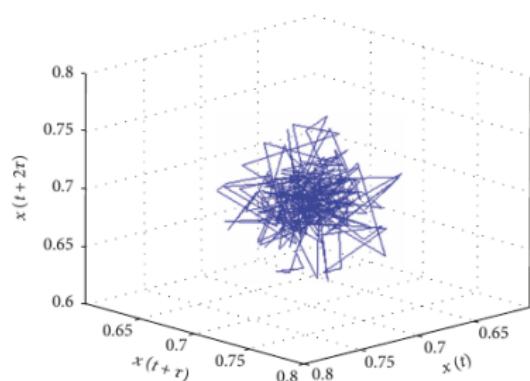


$t_{25.0}$ and $t_{125.0}$ ms



Reconstrucción del espacio fase con intervalos R-R

- Teorema de retraso. A partir de una serie de tiempo de una variable del sistema se puede reconstruir el atractor.
- ECG: actividad eléctrica de aurículas y ventrículos.
- Intervalos temporales R-R: dinámica temporal de contracción de los ventrículos.
- Mismo sistema fisiológico, corazón.
- Resultados distintos con ECG e intervalos R-R. Reconstruyen atractores diferentes. Ciclos.



Reconstrucción del espacio fase en 3D con intervalos R-R. Créditos: S. K. Nayak y col. [18].

Diagrama de recurrencia. Épsilon fija

- Reconstrucción del espacio fase del ECG en 2D con un retraso de 12.5 ms.
Siguientes.
- Diagrama de recurrencia a partir de una épsilon fija de 300.
- Amarillo son puntos cercanos.
- Desventaja: Tarda mucho en correr. Recortar la serie de tiempo o menor frecuencia de muestreo.

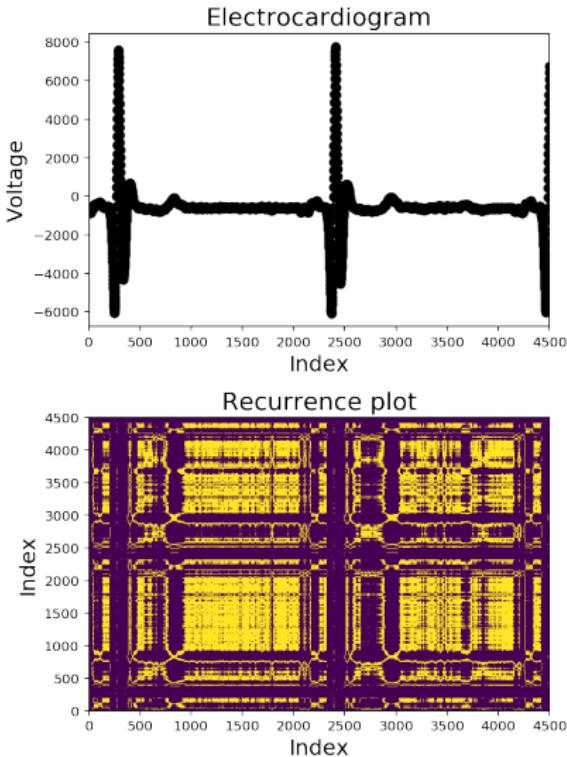


Diagrama de recurrencia. Mapa de calor

- Mapa de calor. Sin épsilon fija.
- Cercano a 1, puntos cercanos en el espacio fase.
- Cercano a 0, puntos alejados en el espacio fase.
- QRS.
- Difícil encontrar diagramas de recurrencia comparables. Parámetros diferentes: épsilon, dimensión.

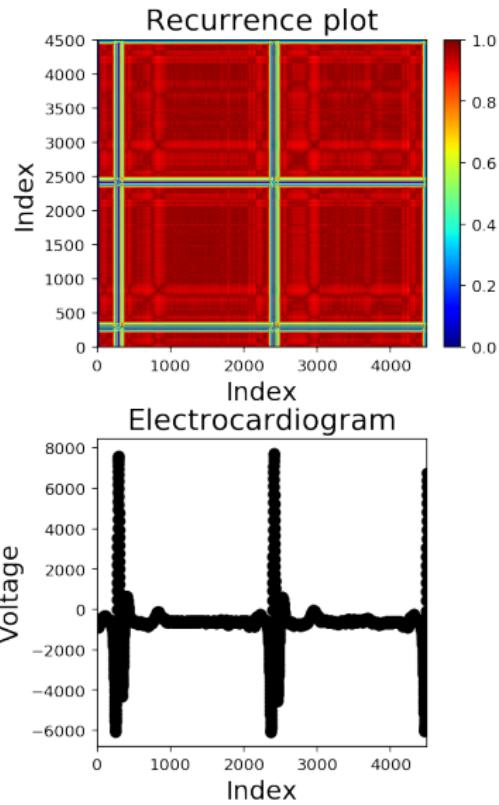


Tabla de contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Técnicas para analizar el ECG

4 Aplicación a las bases de datos

- Antes y después del ejercicio
- Meditación

5 Discusión y conclusiones

Objetivos

- ① Explorar las técnicas reportadas para analizar el ECG. Técnicas: análisis geométrico, reconstrucción del espacio fase y diagramas de recurrencia.
- ② Generar el repositorio de acceso abierto. Código en Python, organizado por temas con cuadernos en Jupyter.
https://github.com/DanidelRio/electrocardiogram_analysis
- ③ Analizar los registros de las 2 bases de datos disponibles: meditación y después de realizar ejercicio.
- ④ Obtener conclusiones a partir del análisis.

Objetivos

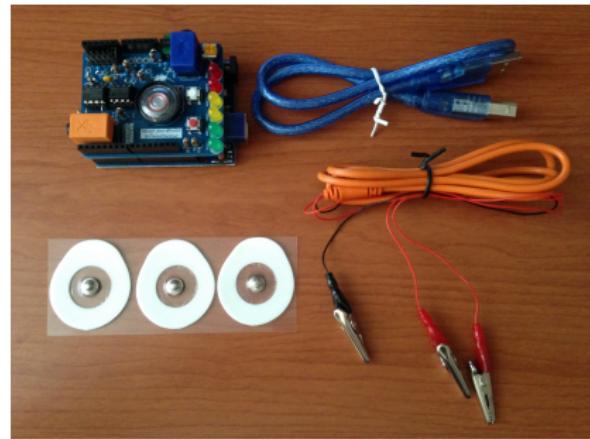
- ① Explorar las técnicas reportadas para analizar el ECG. Técnicas: análisis geométrico, reconstrucción del espacio fase y diagramas de recurrencia.
- ② Generar el repositorio de acceso abierto. Código en Python, organizado por temas con cuadernos en Jupyter.
https://github.com/DanidelRio/electrocardiogram_analysis
- ③ Analizar los registros de las 2 bases de datos disponibles: meditación y después de realizar ejercicio.
- ④ Obtener conclusiones a partir del análisis.

Bases de datos

- Registros de reposo y después de realizar ejercicio en la práctica del ECG de Morfológico 2*.
- Registros de meditación** en Electrofisiología*.

*materias a cargo de Erin McKiernan. Registros disponibles en: [https://github.com/
emckiernan/electrophys/tree/master/ECG](https://github.com/emckiernan/electrophys/tree/master/ECG).

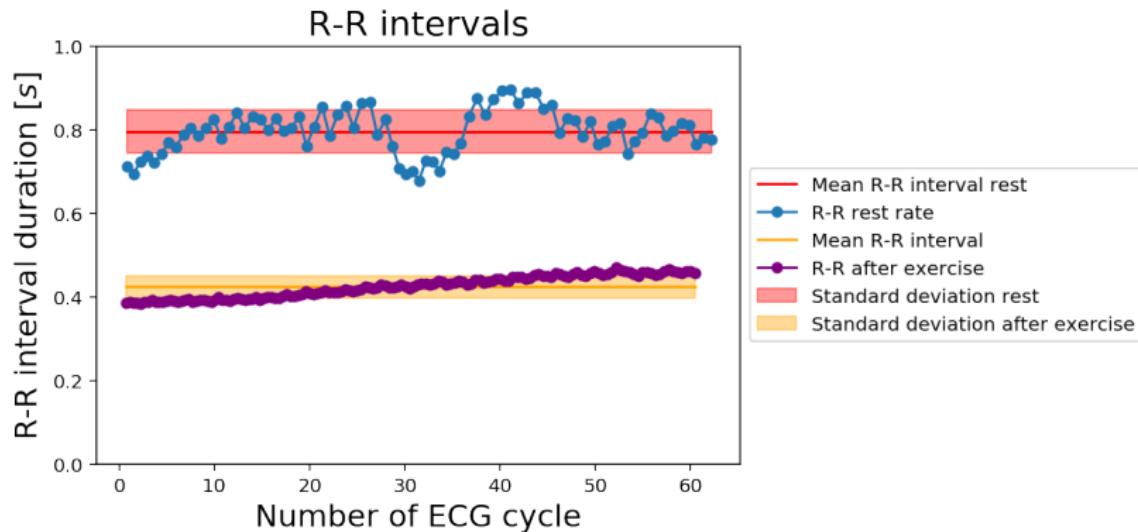
**hechos por José Carlos Hernández Herrerías (JCHH).



Equipo en el Heart and Brain SpikerShield de *Backyard Brains* [19]. Créditos: JCHH.

Reposo vs. después del ejercicio. Intervalos R-R

- Ejercicio. Corazón bombea más rápido para abastecer de O₂.
- Reposo.
 - Intervalos R-R son más largos.
 - Desviación estándar (variabilidad cardiaca) es mayor.



Duración de intervalos R-R antes de realizar ejercicio en azul y rojo, y después de realizar ejercicio en morado y amarillo.

Reposo vs. después del ejercicio. Diagrama de Poincaré, i.e. reconstrucción espacio fase con intervalos R-R, 2D, $\tau = 1$

- Dos agrupaciones de puntos.
- Despues del ejercicio, agrupación se mueve hacia el origen y se vuelve menos dispersa. Pérdida de variabilidad cardiaca.
- Literatura.

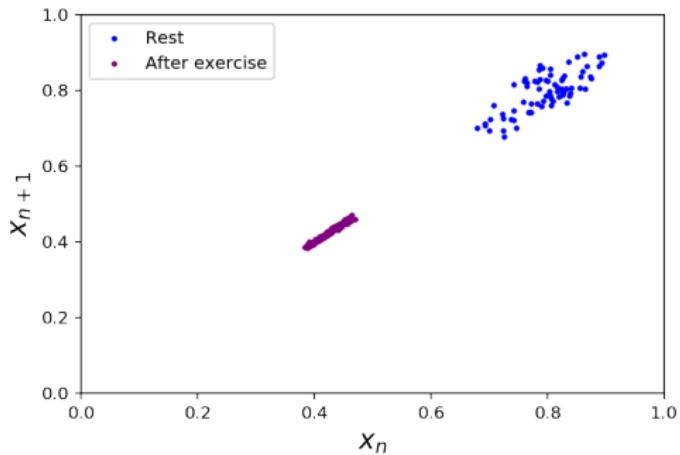
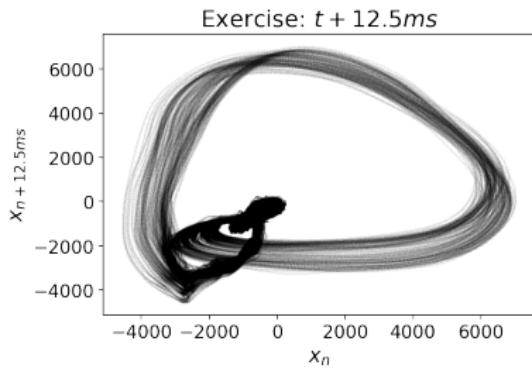
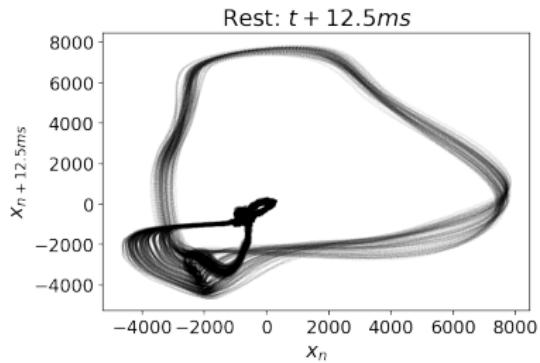


Diagrama de Poincaré en reposo y después de realizar ejercicio.

Reposo vs. después del ejercicio. Reconstrucción espacio fase con ECG, 2D, $\tau = 12,5$ ms

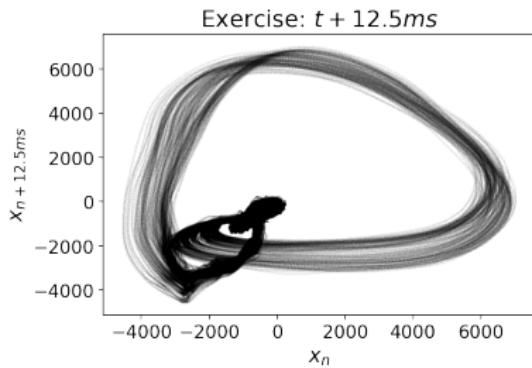
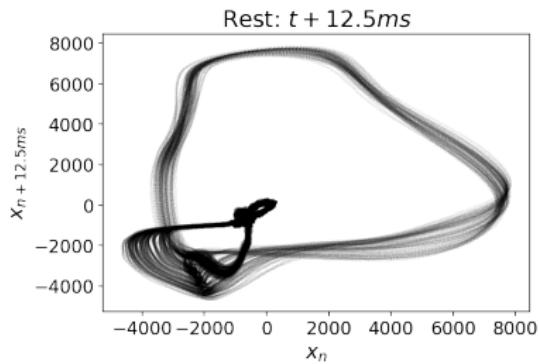
- Reposo. Atractor reconstruido.
- Después de realizar ejercicio.
 - Reconstrucción de la dinámica del espacio fase alrededor del atractor [15, pg. 62].
 - La región cubierta por las trayectorias es más ancha.
 - ¿Aumenta la variabilidad cardiaca? ¿Contradicción?



Reconstrucción del espacio fase con ECG. Reposo a la izquierda y después de realizar ejercicio a la derecha.

Reposo vs. después del ejercicio. Reconstrucción espacio fase con ECG, 2D, $\tau = 12,5$ ms

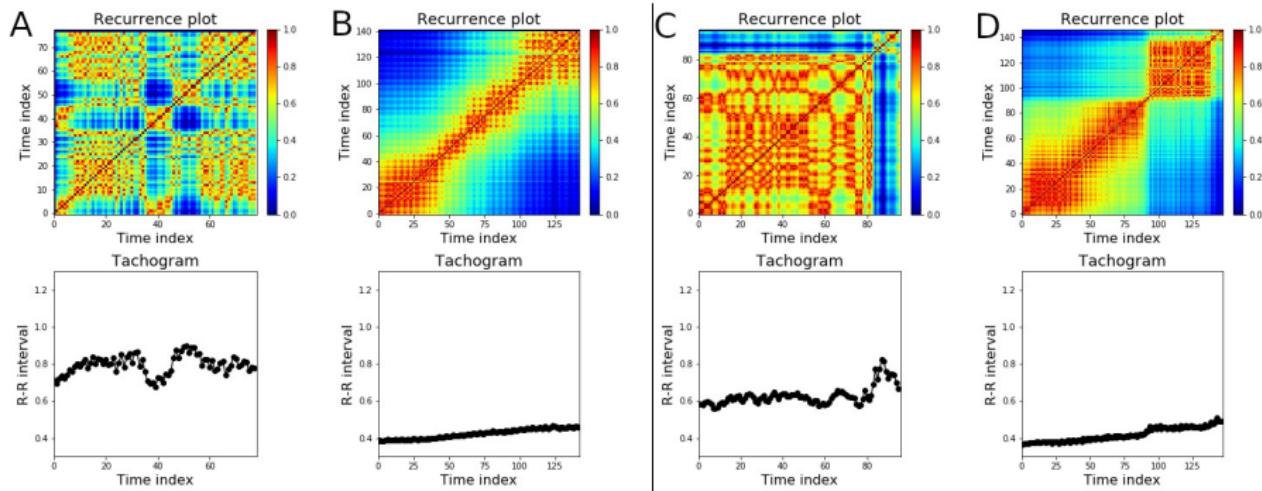
- Reposo. Atractor reconstruido.
- Después de realizar ejercicio.
 - Reconstrucción de la dinámica del espacio fase alrededor del atractor [15, pg. 62].
 - La región cubierta por las trayectorias es más ancha.
 - ¿Aumenta la variabilidad cardiaca? ¿Contradicción?
 - No es válido comparar. Ausencia de literatura. Requiere más estudios.



Reconstrucción del espacio fase con ECG. Reposo a la izquierda y después de realizar ejercicio a la derecha.

Reposo vs. después del ejercicio. Diagrama de recurrencia con intervalos R-R

- Serie de tiempo de intervalos R-R, 2D, $\tau = 1$.
- Patrones.
- Recuperación, intervalos R-R van regresando a su valor basal.



Arriba diagramas de recurrencia y abajo tacogramas. La distancia está normalizada en cada diagrama de recurrencia. A y B son de un sujeto y C y D de otro. A y C es el control. B y D después de realizar ejercicio.

Datos de meditación

- Registros de un mismo sujeto.
- Técnicas de meditación (dificultad):
 - Sostener respiración pecho.
 - Sostener respiración abdomen.
 - Respiraciones profundas 5-5 abdomen.
 - Respiraciones profundas 5-5 pecho.
 - Respiración en ola.
- 2 tipos de meditación: respiración y sostenida.

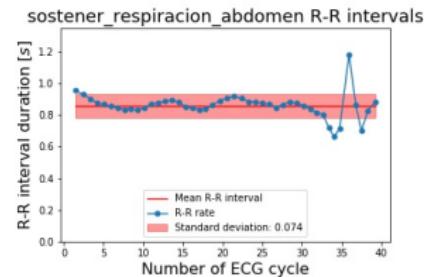
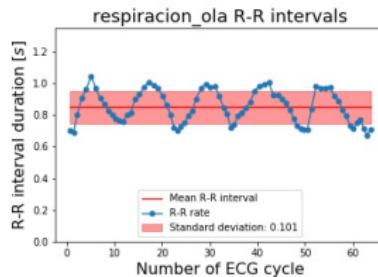
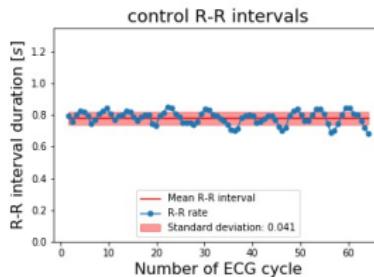


Caricatura de una persona meditando.
Créditos: T. Qubeck, CC BY-NC-ND
3.0 [20].

Registros obtenidos por José Carlos Hernández Herrerías.

Datos de meditación

- Serie de tiempo de los intervalos R-R.
- Desviación estándar en rojo. Fig.
- Aumenta la desviación estándar en meditación.
- Mayor aumento donde se respira, aumento de variabilidad cardiaca.
- Hipótesis. Meditación activa al sistema parasimpático.

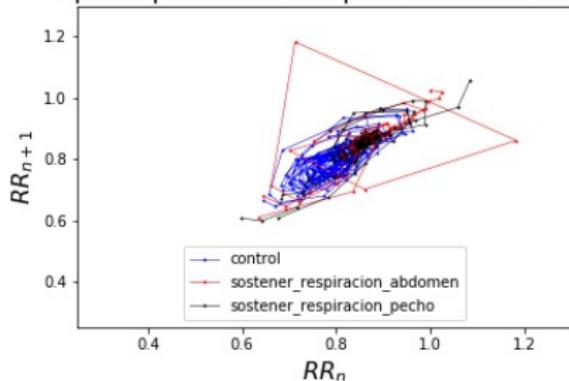


Tacogramas de: registro control (izquierda), registro de meditación donde se respira en ola regulando la respiración a aproximadamente 6 respiraciones por min (0.1 Hz, centro) y registro de meditación donde se sostiene la respiración en el abdomen (derecha).

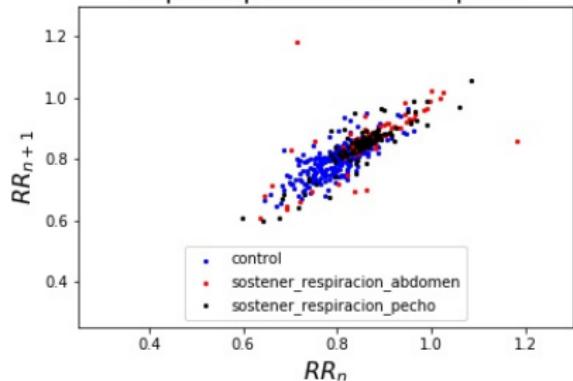
Reconstrucción espacio fase = Diagrama de Poincaré

- Serie de tiempo de intervalos R-R
- Ausencia de trayectorias en el diagrama de Poicaré
- Al sostener la respiración, no hay un gran cambio en la agrupación de puntos.

Superimposed Phase space reconstruction



Superimposed Poincare plots

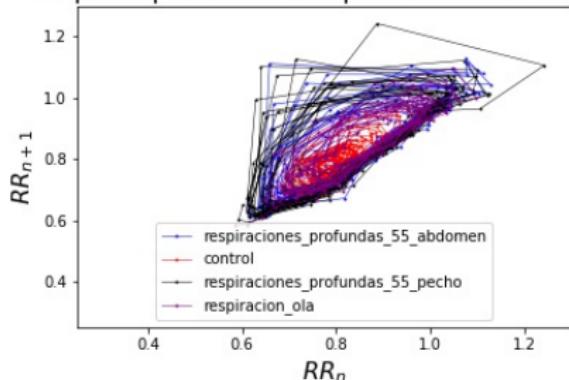


Comparación del intervalo temporal $R_{n-1} - R_n$ con respecto al $R_n - R_{n+1}$ con o sin trayectorias de registros de meditación donde se sostiene la respiración y registro control.

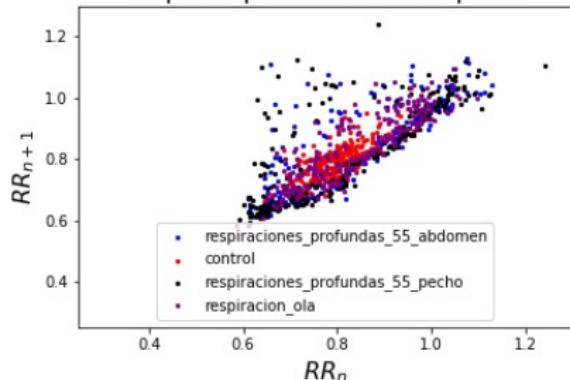
Reconstrucción de espacio fase = Diagrama de Poincaré

- Serie de tiempo de intervalos R-R.
- Respirar: barrido a lo largo de la identidad cuando se compara con respecto al registro control.
- Ciclos al respirar. Ejemplo: trayectoria negra, respiración ola

Superimposed Phase space reconstruction



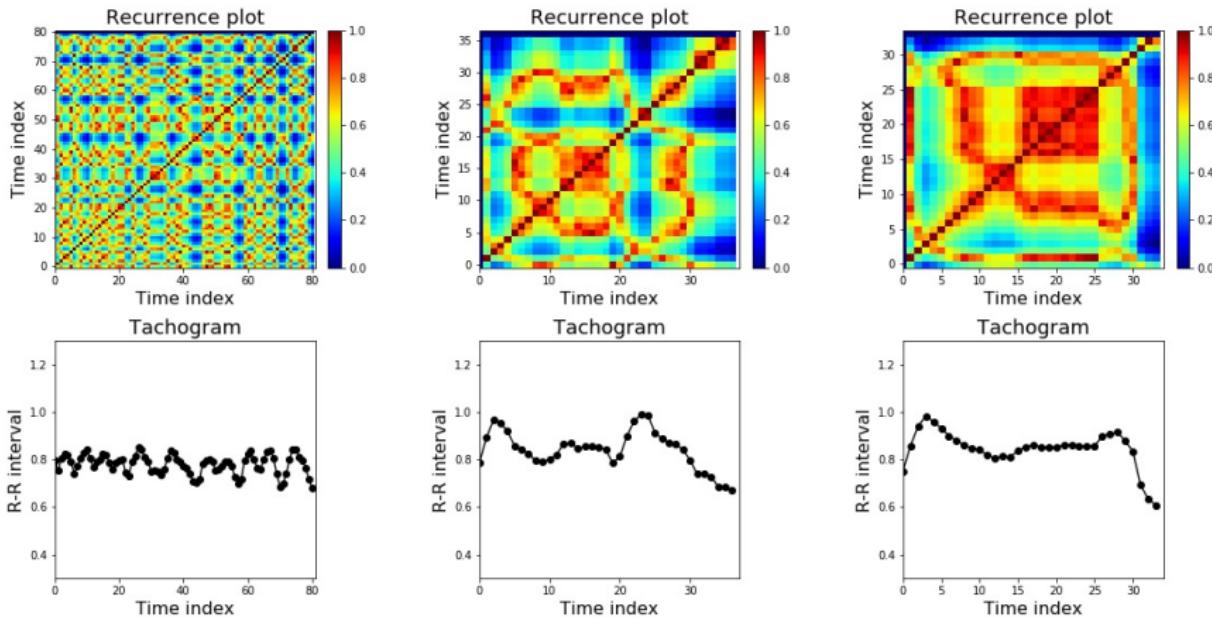
Superimposed Poincare plots



Comparación del intervalo temporal $R - R_n$ con respecto al $R - R_{n+1}$ con o sin trayectorias de registros de meditación donde se regula la respiración y registro control.

Datos de meditación. Diagrama de recurrencia

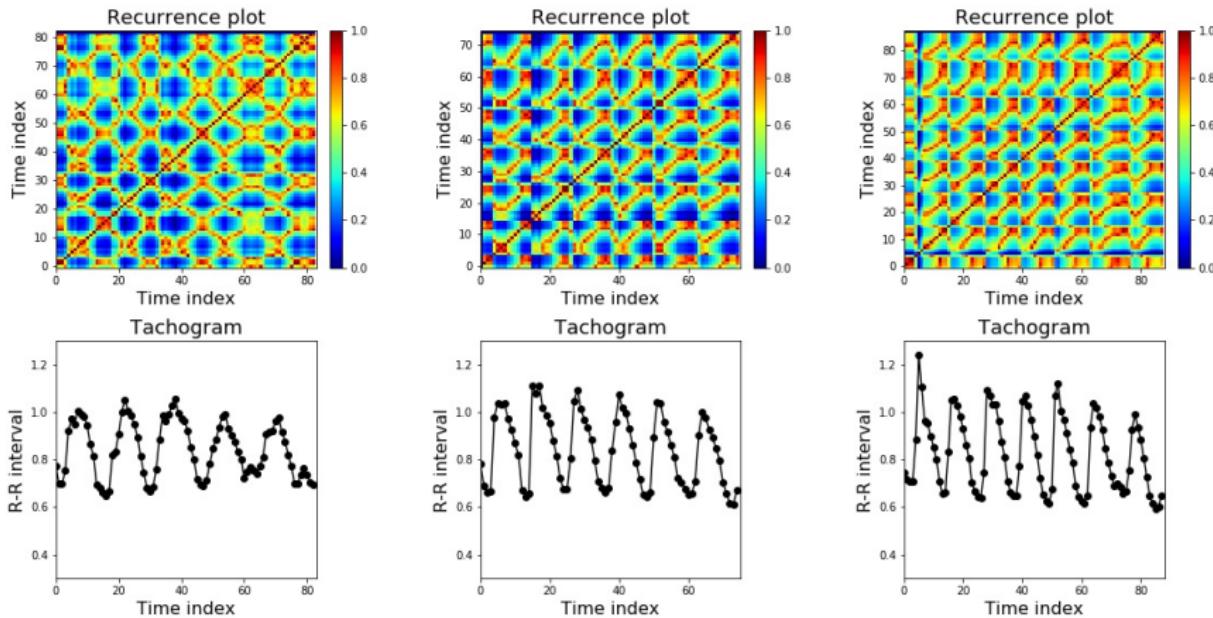
- Reconstrucción del espacio fase en 2D a partir de intervalos R-R con $\tau = 1$. Distancia normalizada en cada uno.
- Patrones: control parecido a ruido blanco, sostener la respiración.



Izquierda control, centro registro al sostener la respiración en el pecho y derecha registro al sostener la respiración en el abdomen. Arriba diagramas de recurrencia y abajo los tacogramas.

Datos de meditación. Diagrama de recurrencia

- Reconstrucción del espacio fase en 2D a partir de intervalos R-R con $\tau = 1$. Distancia normalizada en cada uno.
- Al respirar de forma controlada, aparecen ciertos patrones repetitivos.



Registros de meditación al respirar: en ola (izquierda), profundamente con abdomen (centro) y profundamente con pecho (derecha). Arriba diagramas de recurrencia y abajo los tacogramas.

Tabla de contenido

1 Introducción

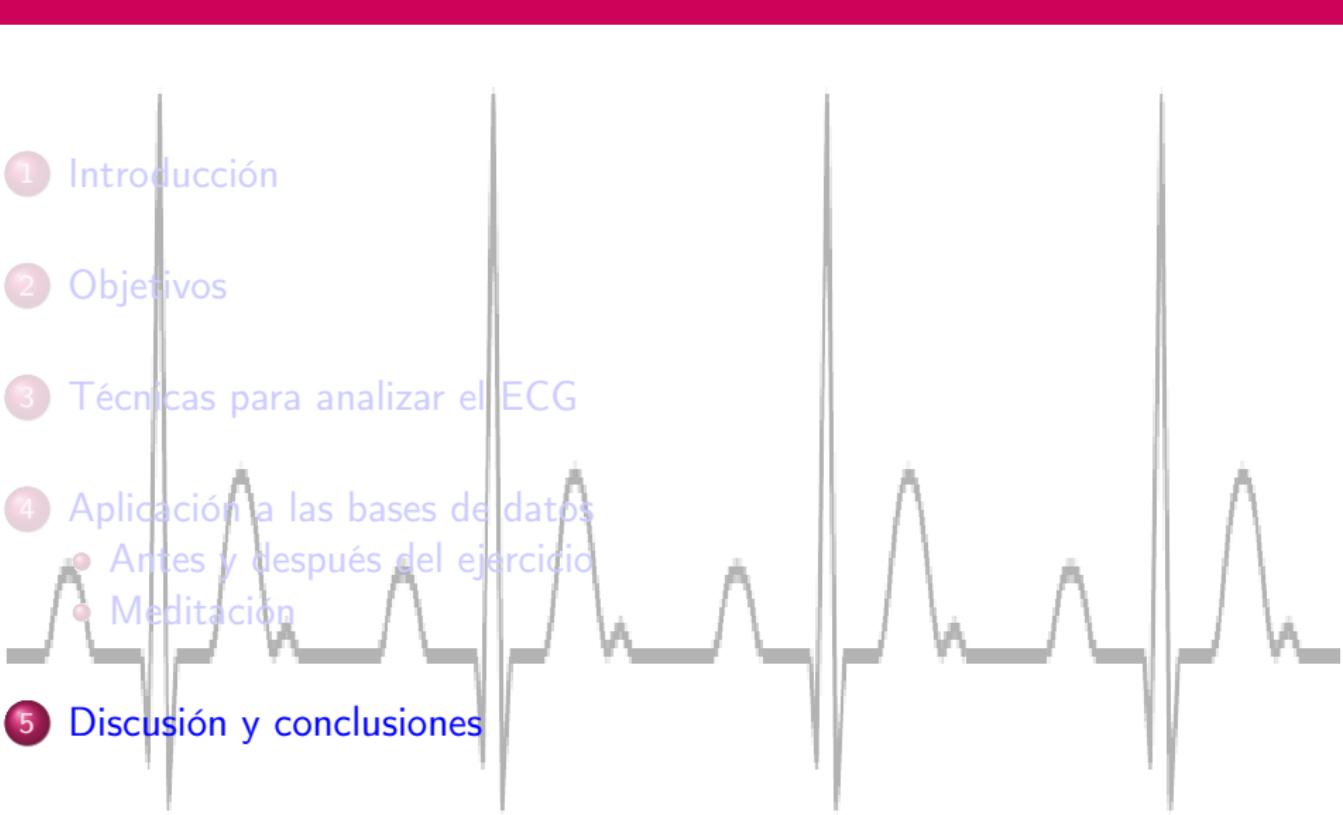
2 Objetivos

3 Técnicas para analizar el ECG

4 Aplicación a las bases de datos

- Antes y después del ejercicio
- Meditación

5 Discusión y conclusiones



Objetivos

- ① Explorar las técnicas reportadas para analizar el ECG. Técnicas: análisis geométrico, reconstrucción del espacio fase y diagramas de recurrencia.
- ② Generar el repositorio de acceso abierto. Código en Python, organizado por temas con cuadernos en Jupyter.
https://github.com/DanidelRio/electrocardiogram_analysis
- ③ Analizar los registros de las 2 bases de datos disponibles: meditación y después de realizar ejercicio.
- ④ Obtener conclusiones a partir de los resultados.

Objetivos

- ① Explorar las técnicas reportadas para analizar el ECG. Técnicas: análisis geométrico, reconstrucción del espacio fase y diagramas de recurrencia.
- ② Generar el repositorio de acceso abierto. Código en Python, organizado por temas con cuadernos en Jupyter.
https://github.com/DanidelRio/electrocardiogram_analysis
- ③ Analizar los registros de las 2 bases de datos disponibles: meditación y después de realizar ejercicio.
- ④ Obtener conclusiones a partir de los resultados.

Variabilidad cardiaca

- Baja variabilidad cardiaca: relacionada con una salud pobre y mayor riesgo de morir [11, pg. 455] [21, pg.7].
- Causa. Disminuye la función del sistema parasimpático [11, pg. 449] [12].
- Reducción parasimpática ⇒ capacidad regulatoria (capacidad de responder de forma adaptiva a estímulos externos) disminuida [21, pg.7] [11, pg. 455] [22].
- Variabilidad cardiaca indicador del sistema nervioso autónomo.
- ¿Qué aumenta la variabilidad cardiaca?

Comparar: meditación, respiración guiada y después del ejercicio

- Se compara con respecto a valores en reposo.
- Frecuencia respiratoria en reposo: 15 respiraciones/minuto.

Condición	Frec. respiratoria (res/min)	Var. cardiaca
Meditación respirando*	↓ (≈ 6)	↑
Después del ejercicio	↑ (> 15)	↓

*De acuerdo con otros estudios donde se recitan rosarios o mantras y se respira a 6 res/min [23].

Comparar: meditación, respiración guiada y después del ejercicio

- Se compara con respecto a valores en reposo.
- Frecuencia respiratoria en reposo: 15 respiraciones/minuto.

Condición	Frec. respiratoria (res/min)	Var. cardiaca
Meditación respirando*	↓ (≈ 6)	↑
Después del ejercicio	↑ (> 15)	↓
Respiración guiada**	↓ (6)	↓

*De acuerdo con otros estudios donde se recitan rosarios o mantras y se respira a 6 res/min [23].

**Otros estudios [24] [25, pg. 4].

Comparar: meditación, respiración guiada y después del ejercicio

- Se compara con respecto a valores en reposo.
- Frecuencia respiratoria en reposo: 15 respiraciones/minuto.

Condición	Frec. respiratoria (res/min)	Var. cardiaca
Meditación respirando*	↓ (≈ 6)	↑
Después del ejercicio	↑ (> 15)	↓
Respiración guiada**	↓ (6)	↓

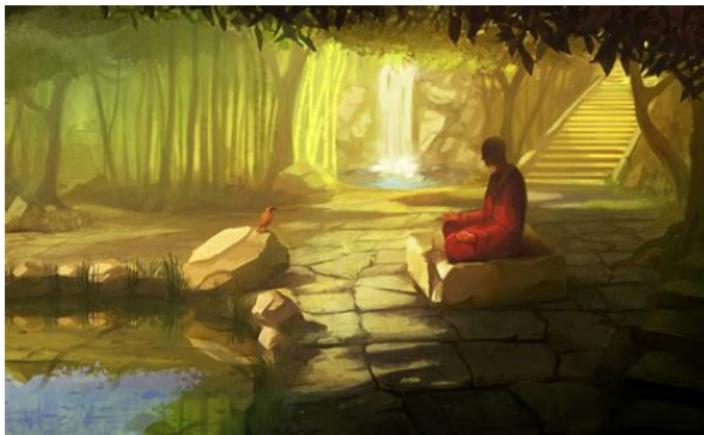
- ¿Cómo explicar que al disminuir la frecuencia respiratoria, la variabilidad cardiaca aumenta o disminuye?

*De acuerdo con otros estudios donde se recitan rosarios o mantras y se respira a 6 res/min [23].

**Otros estudios [24] [25], pg. 4].

Datos de meditación. Respiración y mente

- Activación del sistema parasimpático. Meditación.
- Respiración guiada, no hay una buena activación.
- Estado mental de los sujetos. Respiración guiada fuerza al sistema. Al recitar rosarios o mantras, estado de profunda relajación.
- Sugiere que el aumento de la variabilidad cardiaca está relacionado con la activación del sistema parasimpático al meditar y respirar.
- Más estudios.



Meditación. Créditos: aponderingmind.org CC BY-NC-SA 4.0 [26].

Variabilidad cardiaca

- Salud. caracterizada por *variabilidad organizada*. Idea de que el corazón no es un reloj [21, pg.16].
- Enfermedad, caracterizada por una disminución de la variabilidad. Pero también puede aumentar la variabilidad [27]. Fig.
- Entonces debe haber límites donde fluctúa la *variabilidad organizada* y fuera de ellos se llega a estados de enfermedad.

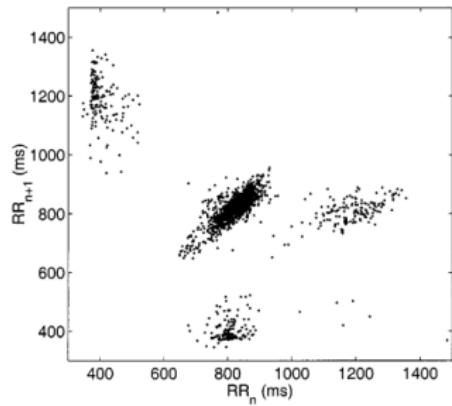


Diagrama de Poincaré. Sujeto con contracciones ventriculares prematuras intermitentes. Créditos: M. Brennan, M. Palaniswami y P. Kamen. [28].

Posibles aplicaciones: Investigación

- Experimento. Investigar si la variabilidad cardiaca indica la robustez (e.g. Jenga) del corazón.

Cuando el sujeto está en reposo, el sistema está en un ciclo con ciertas fluctuaciones intrínsecas. Inducir ciertas condiciones para que se active o no el sistema parasimpático. Analizar la capacidad regulatoria del corazón para responder a estas circunstancias.

- Análisis estadístico con mayor número de registros. Se contaba con pocos registros. Realizar un estudio cuantitativo del ECG.
- Medicina personalizada. Pocos estudios que comparan a un individuo consigo mismo. Se utilizan promedios y se pierden las diferencias entre los sujetos. Se propone comparar índices de un mismo sujeto en condiciones distintas (pruebas de esfuerzo).

Posibles aplicaciones: Cuadernos y docencia

- Cuadernos. Explorar más técnicas, incluir bases de datos de arritmias y generar más ejercicios.
- Traducción al español. Globalización y pérdida de recursos lingüísticos [29]. Pocos recursos en español disponibles en línea.
- Video. Amigable entrada a Github, para explicar como navegar la página.
- Solucionario. Guía para el docente.
- Prueba piloto. Posible curso de análisis de datos electrofisiológicos integrado al plan de estudios de física biomédica. Cuestionario a estudiantes sobre los cuadernos. Abrir problemas (*Issues*) en el repositorio de Github.

Más información

- https://github.com/DanidelRio/electrocardiogram_analysis
(Abrir el sitio)

¡Muchas gracias!

- Danke schön
- Dank u wel
- Thank you
- ありがとうございます
- спасибо
- Merci beaucoup
- Grazie mille
- Se los agradezco mucho

Le agradezco formalmente a: Erin McKiernan, Hortensia González, Ricardo Méndez, Lucía Medina y Yanalté Herrero.

Si gusta conocer más detalles, por favor vea el reporte también disponible en Github: https://github.com/DanielaDelRio/electrocardiogram_analysis.



Mi guardiana.

Referencias |

- [1] World Health Organization. *Cardiovascular diseases (CVDs)*. [`https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)`](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)). Accesado el 4 de enero de 2021. 2017.
- [2] Pharmaceutical Technology. *Cardiovascular*. [`https://www.pharmaceutical-technology.com/wp-content/uploads/sites/10/2019/03/cardiovascular.jpg`](https://www.pharmaceutical-technology.com/wp-content/uploads/sites/10/2019/03/cardiovascular.jpg). Accesado el 3 de junio de 2021. 2019.
- [3] ECGpedia. *Conduction*. [`https://en.ecgpedia.org/wiki/File:Conduction_ap.svg`](https://en.ecgpedia.org/wiki/File:Conduction_ap.svg). Accesado el 4 de junio de 2021. 2011.
- [4] AjayLalu. *Lion*. [`https://pixabay.com/photos/lion-roar-wildlife-africa-danger-1141303/`](https://pixabay.com/photos/lion-roar-wildlife-africa-danger-1141303/). Accesado el 3 de junio de 2021. 2016.
- [5] Videoplasty.com. *Black Man Sleeping in Bed Cartoon Vector*. [`https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_Man_Sleeping_in_Bed_Cartoon_Vector.svg`](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_Man_Sleeping_in_Bed_Cartoon_Vector.svg). Accesado el 3 de junio de 2021. 2018.
- [6] D. J. Cornforth, M. P. Tarvainen y H. F. Jelinek. «How to calculate Renyi entropy from heart rate variability, and why it matters for detecting cardiac autonomic neuropathy». En: *Frontiers in bioengineering and biotechnology* 2 (2014), pág. 34.

Referencias II

- [7] S. H. Strogatz. «Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics». En: *Biology, Chemistry and Engineering* (1994), pág. 1.
- [8] Mrs. Cook. *Zoetrope woman series*.
https://mrs-cook.weebly.com/uploads/2/3/0/6/23067164/323926_orig.jpg. Accesado el 3 de junio de 2021.
- [9] J. Migala. *What Is Heart Rate Variability—and Do You Need to Know Yours?*
<https://www.health.com/condition/heart-disease/heart-rate-variability>. Accesado el 22 de febrero de 2021. 2021.
- [10] Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing. «Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use». En: *Circulation* 93.5 (1996), págs. 1043-1065.
- [11] S. Evans y col. «Heart rate variability as a biomarker for autonomic nervous system response differences between children with chronic pain and healthy control children». En: *Journal of pain research* 6 (2013), pág. 449.
- [12] A. H. Khandoker y col. *Poincaré plot methods for heart rate variability analysis*. Springer, 2013.
- [13] J. T. Korpelainen y col. «Dynamic behavior of heart rate in ischemic stroke». En: *Stroke* 30.5 (1999), págs. 1008-1013.

Referencias III

- [14] N. Marwan. «A historical review of recurrence plots». En: *The European Physical Journal Special Topics* 164.1 (2008), págs. 3-12.
- [15] H. Yang, Y. Chen y F. Leonelli. «Characterization and monitoring of nonlinear dynamics and chaos in complex physiological systems». En: *Healthcare Analytics: From Data to Knowledge to Healthcare Improvement* (2016), pág. 59.
- [16] N. Marwan. *Typical examples of recurrence plots*.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Rp_examples740.gif. Accesado el 19 de abril de 2021. 2005.
- [17] H. Kantz y T. Schreiber. *Nonlinear time series analysis*. Vol. 7. Cambridge university press, 2004.
- [18] S. K. Nayak y col. «A review on the nonlinear dynamical system analysis of electrocardiogram signal». En: *Journal of healthcare engineering* 2018 (2018).
- [19] BackyardBrains. *Experiment: Heart Action Potentials*.
<https://backyardbrains.com/experiments/heartrate>. Accesado el 20 de diciembre de 2020. 2017.
- [20] T. Qubek. *New Earth Heartbeat*.
<https://cdn.mindful.org/meditation.png?q=80&fm=jpg&fit=crop&w=1400&h=875>. Accesado el 10 de junio de 2021. 2019.

Referencias IV

- [21] F. Shaffer, R. McCraty y C. L. Zerr. «A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability». En: *Frontiers in psychology* 5 (2014), pág. 1040.
- [22] A. A. Rosenberg y col. «Signatures of the autonomic nervous system and the heart's pacemaker cells in canine electrocardiograms and their applications to humans». En: *Scientific reports* 10.1 (2020), págs. 1-15.
- [23] L. Bernardi y col. «Effect of rosary prayer and yoga mantras on autonomic cardiovascular rhythms: comparative study». En: *Bmj* 323.7327 (2001), págs. 1446-1449.
- [24] P. Guzik y col. «Correlations between Poincaré plot and conventional heart rate variability parameters assessed during paced breathing». En: *The Journal of Physiological Sciences* (2007), págs. 0702020009-0702020009.
- [25] M. Weippert y col. «Effects of breathing patterns and light exercise on linear and nonlinear heart rate variability». En: *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 40.8 (2015), págs. 762-768.
- [26] A Pondering Mind. *Meditation*.
https://www.area-56.de/pics/gfs_clan/meditation.jpg. Accesado el 3 de junio de 2021. 2013.
- [27] A. J. Seely y P. T. Macklem. «Complex systems and the technology of variability analysis». En: *Critical care* 8.6 (2004), págs. 1-18.

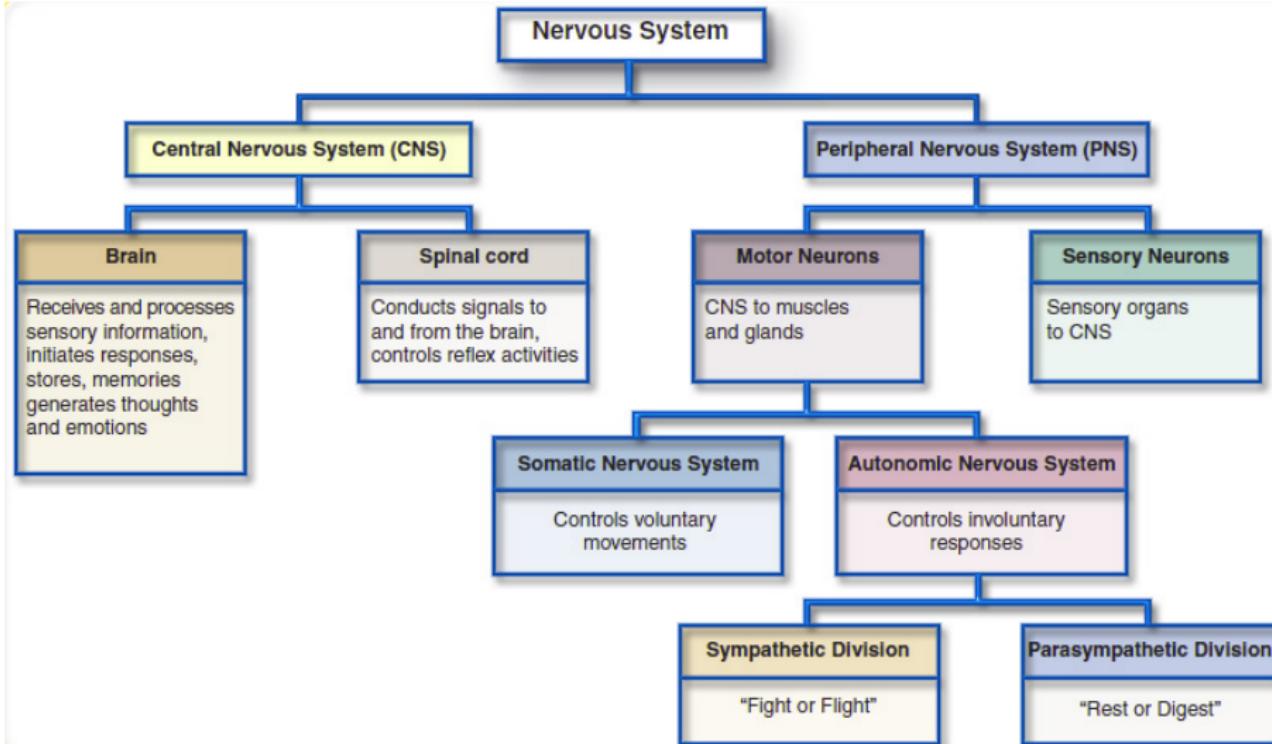
Referencias V

- [28] M. Brennan, M. Palaniswami y P. Kamen. «Do existing measures of Poincare plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability?» En: *IEEE transactions on biomedical engineering* 48.11 (2001), págs. 1342-1347.
- [29] P. Ryan. *Don't insist on English!*
https://www.ted.com/talks/patricia_ryan_don_t_insist_on_english. Accesado el 18 de marzo de 2021. 2013.
- [30] Phoenix Rising. *Sistema nervioso*. <https://phoenixrising.me/wp-content/uploads/the-autonomic-nervous-system.jpg>. Accesado el 5 de junio de 2021. 2020.
- [31] Georgebog. *Pendulum*.
[http://www.marysrosaries.com/collaboration/index.php?title=File:Pendulum_2_\(PSF\).png](http://www.marysrosaries.com/collaboration/index.php?title=File:Pendulum_2_(PSF).png). Accesado el 20 de abril de 2021. 2010.
- [32] R. Ball y P. Holmes. «Dynamical systems, stability, and chaos». En: *Frontiers in Turbulence and Coherent Structures*. World Scientific, 2007, págs. 1-27.
- [33] J.-C. Benoist. *Dualite*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dualite.jpg>. Accesado el 3 de junio de 2021. 2007.
- [34] N. Marwan y col. «Recurrence plots for the analysis of complex systems». En: *Physics reports* 438.5-6 (2007), págs. 237-329.

Referencias VI

- [35] D. Le Gallais, J. F. Casties y D. Mottet. «Non-linear analyses of heart rate variability during heavy exercise and recovery in cyclists». En: *Int J Sports Med* 26 (2005), págs. 1-6.
- [36] L. Mourot y col. «Quantitative Poincare plot analysis of heart rate variability: effect of endurance training». En: *European journal of applied physiology* 91.1 (2004), págs. 79-87.
- [37] U. R. Acharya y col. «Heart rate variability: a review». En: *Medical and biological engineering and computing* 44.12 (2006), págs. 1031-1051.
- [38] C. M. Mazure y D. P. Jones. «Twenty years and still counting: including women as participants and studying sex and gender in biomedical research». En: *BMC women's health* 15.1 (2015), págs. 1-16.
- [39] K. A. Liu y N. A. Dipietro Mager. «Women's involvement in clinical trials: historical perspective and future implications». En: *Pharmacy Practice (Granada)* 14.1 (2016).
- [40] M. Stramba-Badiale y col. «Cardiovascular diseases in women: a statement from the policy conference of the European Society of Cardiology». En: *European heart journal* 27.8 (2006), págs. 994-1005.

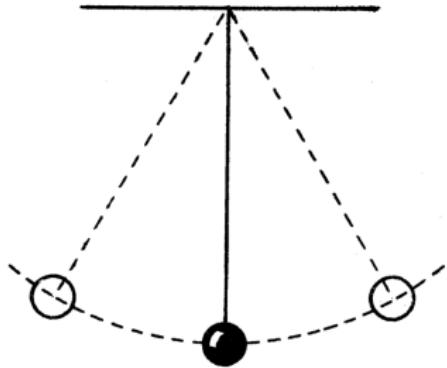
Sistema nervioso



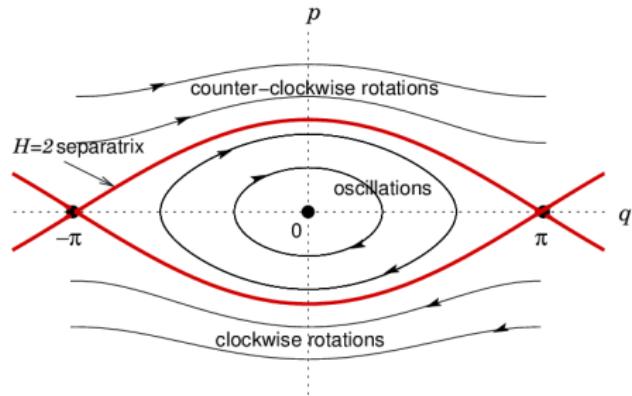
División del sistema nervioso [30].

Sistemas dinámicos. Conceptos

- El espacio fase es n-dimensional, con n es el número de variables necesarias para caracterizar los estados de este sistema [7, pg. 9]. Problemas de visualización. Cortes o proyecciones.
- **Punto (estado)**: condición inicial.
- **Línea (trayectoria)**: posible cambio [7, pg. 7].
- Ejemplo: péndulo sin fricción. Estados: reposo, ciclo (θ pequeña), dar vueltas completas. Fricción, atractores.



Péndulo simple a la izquierda [31], espacio fase del péndulo sin fricción a la derecha [32].



Sistemas dinámicos. Reconstrucción del espacio fase

- Serie de tiempo. Depende de una función del estado del sistema (x), lo cual depende de la n -ésima medición en cierto intervalo temporal (Δt) [17, pg. 35].

$$s_n = s(x(n\Delta t)) + \eta_n$$

Donde:

- s_n : serie de tiempo.
 - η_n : ruido o fluctuaciones aleatorias.
 - s : observable del sistema.
- Ejemplos: economía, clima, electrofisiología (ECG, EEG, intervalos R-R -tacograma-, presión arterial sanguínea).
 - 1991 Sauer. Varios métodos: **de retraso (teorema de Takens)**, de derivadas y análisis de componentes principales.
 - Teo. de Takens: A partir de una medible de un sistema muestrado de forma uniforme (serie de tiempo), se obtiene una reconstrucción del atractor del sistema a partir de un retraso temporal (τ).

$$s_n = (s_{n+\tau}, \dots, s_{n+(m-1)\tau}, s_{n+m\tau})$$

Reconstrucción del espacio fase: escalas temporales

A partir de una serie de tiempo, con cierto retraso temporal (τ) se reconstruye el espacio fase.

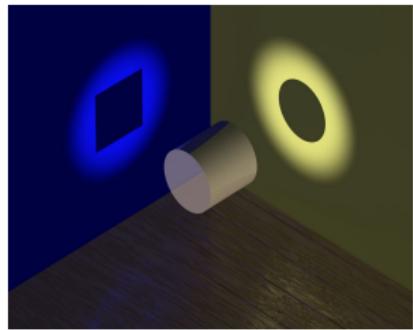
En teoría, τ es arbitrario. Sea γ la escala temporal interna del sistema. Hay 3 casos:

- $\tau < \gamma$, elementos seguidos están fuertemente correlacionados. Atractor agrupado en la identidad.
- $\tau > \gamma$, elementos subsecuentes son casi independientes. La estructura del atractor desaparece o parece ser muy complicada.
- $\tau \approx \gamma$, componente con ese periodo está subrepresentada [17].
- $\tau \approx \gamma/10$, caso ideal para la componente con ese periodo. Ejemplo QRS máx. 120 ms.

(Abrir gif)

Vecinos falsos

- Puntos cercanos en el espacio que no sean vecinos en el espacio donde reside el atractor. Ejemplo.
- Reconstruir el espacio fase de n dimensiones. Cuando hay dos puntos cercanos que al considerar un espacio de $n+1$ dimensiones, se alejan eran vecinos falsos [17, pg. 37] [15, pg. 64].
- Problema común cuando se reconstruyen los atractores en espacios de menores dimensiones que las verdaderas.



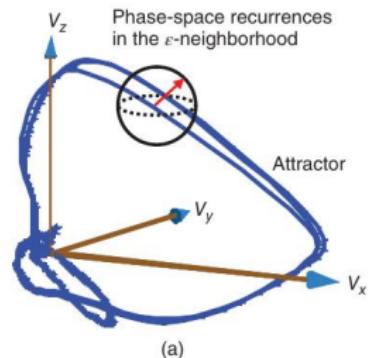
Objeto 3D proyectado en 2D.
Créditos: Jean-Christophe Benoit, CC-BY-SA-3.0-migrated, CC-BY-2.5 [33].

Diagrama de recurrencia: definición

- Vecindad de radio épsilon alrededor de un punto del atractor en el espacio fase. A cada punto dentro de la vecindad $M_{ij} = 1$ y para cada punto fuera de la vecindad $M_{ij} = 0$.
- Definición introducida en 1987 por Eckmann [17, pg. 44] [34].

$$M_{ij} = \Omega(\epsilon - |s_i - s_j|)$$

- Donde M es la matriz de recurrencia, Ω es la función escalón de Heaviside, ϵ es el radio de la vecindad, s_i son vectores retrasados para alguna dimensión en el espacio fase.
- Por construcción, es simétrico con respecto a la identidad.



Atractor reconstruido y esfera de radio épsilon en el espacio fase en 3D. Créditos: H. Yang, Y. Chen y F. Leonelli [15].

Diagrama de recurrencia

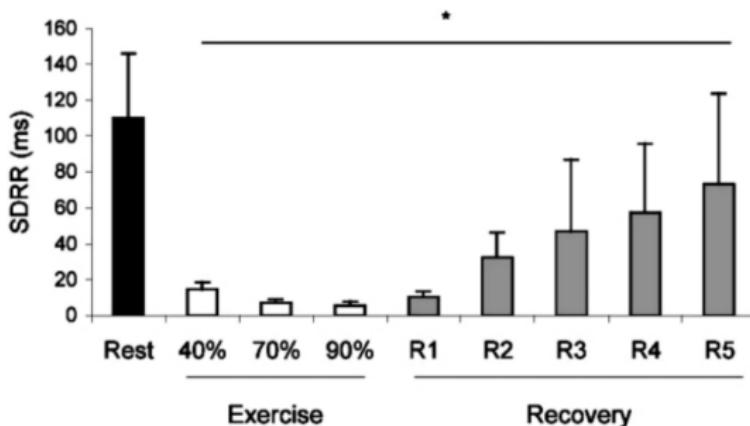
- Poincaré mostró que un sistema dinámico conservativo regresa (recurre) una cantidad infinita de veces tan cerca como uno desee a la vecindad del punto inicial [14].
- Reconstrucción del espacio fase con teorema de Takens, retrasos arbitrarios. Patrones en diagramas de recurrencia podrían deberse a vecinos falsos.
- Épsilon. ¿Mapa de calor en lugar de valor binario?
- Normalizar la distancia.

Técnicas de meditación

- Utilizadas en psicoterapia para reducir la ansiedad.
- Posición cómoda. Acostado o sentado con la espalda recta. Colocar una mano en el pecho y la otra en el abdomen por encima del ombligo. Respiración localizada en:
 - Pecho: los hombros se elevan, el pecho se infla y el abdomen permanece inmóvil.
 - Abdomen: los hombros y el pecho permanecen inmóviles y el abdomen se infla.
- Respiración 5-5 en pecho o abdomen. La duración depende de la capacidad de la persona sin llegar a la sensación de asfixia.
 - Inhalación profunda de \approx 5s.
 - Exhalación profunda de \approx 5s.
- Respiración en ola. Práctica.
 - Inhalación profunda en el pecho.
 - Inhalación profunda en el abdomen.
 - Exhalación profunda en el pecho.
 - Exhalación profunda en el abdomen.

Reposo vs. después del ejercicio. Desv. est. R-R

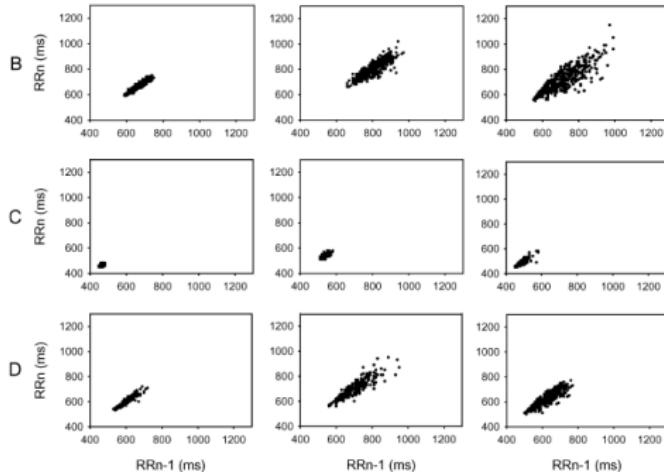
- Ciclistas: medir variabilidad cardiaca de intervalos R-R durante ejercicio y su recuperación.
- Ejercicio: 3 periodos donde aumentaba su consumo máximo de oxígeno.
- Variabilidad cardiaca. Disminuye con ejercicio y se recupera con reposo.



Cambio en la desviación estándar de la serie de tiempo de los intervalos R-R. Créditos: D. Le Gallais, J. F. Casties y D. Mottet. [35].

Diagrama de Poincaré. Entrenamiento en perros y humanos

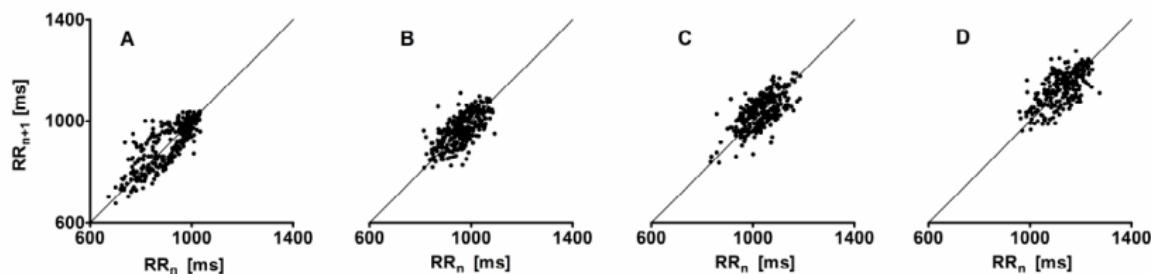
- Experimento: perros entrenados por 6 semanas. Variabilidad cardiaca aumentó 74 % y todos sobrevivieron una prueba isquémica [10, pg. 368].
- Experimento en humanos.
- Agrupación de puntos más abierta con sujeto entrenado.
- Aumenta la dispersión de los puntos del sujeto control después de entrenamiento.
- Mayor variabilidad del sujeto, relacionado con buena condición física [35, pg. 1].



Diagramas de Poincaré en distintas posiciones: de pie **B**, ejercicio estable **C** y recuperación **D**. Columnas de izquierda a derecha: sujeto control, sujeto control después de un corto plazo de un entrenamiento de resistencia y sujeto entrenado. Créditos: L. Mourot y col [36].

Frecuencia respiratoria guiada

15 respiraciones/minuto (manera cotidiana), puntos abiertos en la esquina superior derecha [24].



Diagramas de Poincaré de intervalos R-R en un mismo sujeto con respiración guiada a distintas tasas respiratorias: 6 (0.1 Hz) A. 9 (0.15 Hz) B. 12 (0.2 Hz) C. 15 (0.25 Hz) D respiraciones/min, respectivamente. Créditos: P. Guzik y col. [24].

Disminución de la variabilidad cardiaca con las siguientes condiciones

- Con la edad [37, pg. 1035].
- En varias enfermedades cardiológicas y no cardiológicas [10, pg. 366].
- Niños con dolor crónico en reposo al compararlos con niños sanos [11].
- En niños con ansiedad y desórdenes emocionales [11, pg. 449].
- En adolescentes con síndrome de fatiga crónica con hipersensibilidad a estímulos sensoriales [11, pg. 450].
- En adultos con: síndrome del intestino irritable, dolor de espalda crónico, fibromialgia, y dolor crónico generalizado [11, pg. 454].
- Después de un infarto agudo al miocardio [10, pg. 370].
- Un infarto isquémico al tronco cerebral medular [13].

Causa de la disminución en la variabilidad cardiaca. Sistema nervioso autónomo parasimpático

- Reducción parasimpática observado en: varias cardiopatías, niños con dolor crónico [11, pg. 455] y en pacientes bajo estrés o sufriendo de pánico, ansiedad o preocupación [21, pg.9] [22].
- Experimento. Bloquear sistema nervioso autónomo en perros. El grosor de la distribución de los intervalos R-R disminuía considerablemente. [22]

- Grupo poco representado [38, pg. 2], corazón. Mayoría de investigación sobre ECV en hombres [39] [40].
- Ejemplo: Aspirina, pruebas aleatorias para la prevención de ECV. Primera en 1989, 22,071 hombres. Primera prueba en mujeres en 2005 [38, pg. 5].
- Las mujeres tienen más incidentes cardiacos de lo que se pensaba previamente y tienden a morir más frecuentemente por alguna enfermedad cardiaca que los hombres [40].
- Síntomas de ECV podrían ser diferentes en mujeres a los observados comúnmente en los hombres. Esto podría explicar por que es difícil detectar enfermedades cardíacas en mujeres [40, pg. 15].
- Necesidad de más estudios [40] [39, pg. 5].