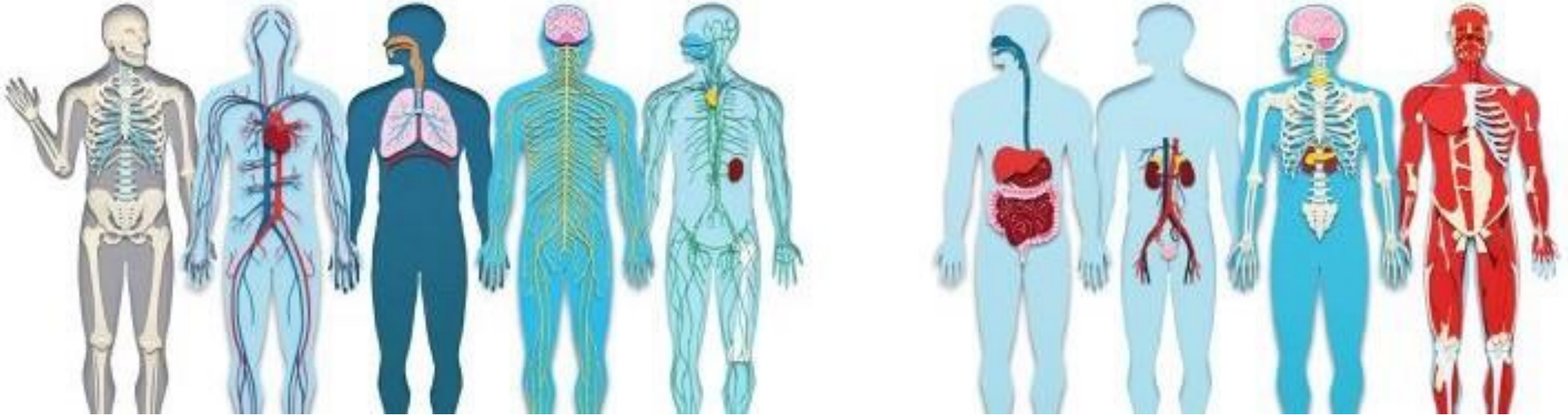


# FISIOLOGÍA CUANTITATIVA 2025

Analiza los fundamentos de la fisiología, la fisiopatología y la biofísica a través la utilización de matemáticas, principios físicos y técnicas de la ingeniería para el entendimiento de la fisiología humana

**Teóricos:** Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Cardiovascular. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Respiratoria. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Renal. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología del SNC. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología de la Sangre. Biofísica.

**Prácticos.** Resolución de Ecuaciones diferenciales con *Matlab* y *Simulink* y su aplicación en los siguientes abordajes fisiológicos: Identificación y caracterización de señales biológicas reales / Enfoque termodinámico del corazón/ Caracterización mediante redes eléctricas del sistema cardiovascular/ Propagación de la onda del pulso en el sistema cardiovascular/ Análisis comparativo entre el modelo de multiplicación a contracorriente y el modelo central, pertenecientes a los modelos de concentración de orina/ Características fractales de la anatomía bronquial/ Desarrollo de la mecánica ventilatoria de la mecánica ventilatoria/ Neuro-ingeniería/ Propagación de la excitación nerviosa



- *Inspirado en el curso de Quantitative Physiology del MIT, Department of Electrical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Division of Biological Engineering, and the Harvard-MIT Division of Health Sciences and Technology y el apunte del curso Physiological Modeling de John Enderle de UCONN*
- *Inmersión clínica de los alumnos que cursen dicho curso en lo que se llama un Engineering Grand Rounds que es el nuevo paradigma donde los alumnos participan en casos clínicos discutiendo con el medico diagnóstico y tratamiento. Cardiovascular Engineering and Technology, Vol. 7, No. 1, March 2016 (2016)*



# Híbrido (RAE)

Se dice de todo lo que es producto de elementos de distinta naturaleza

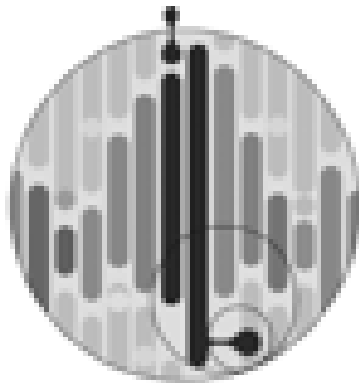




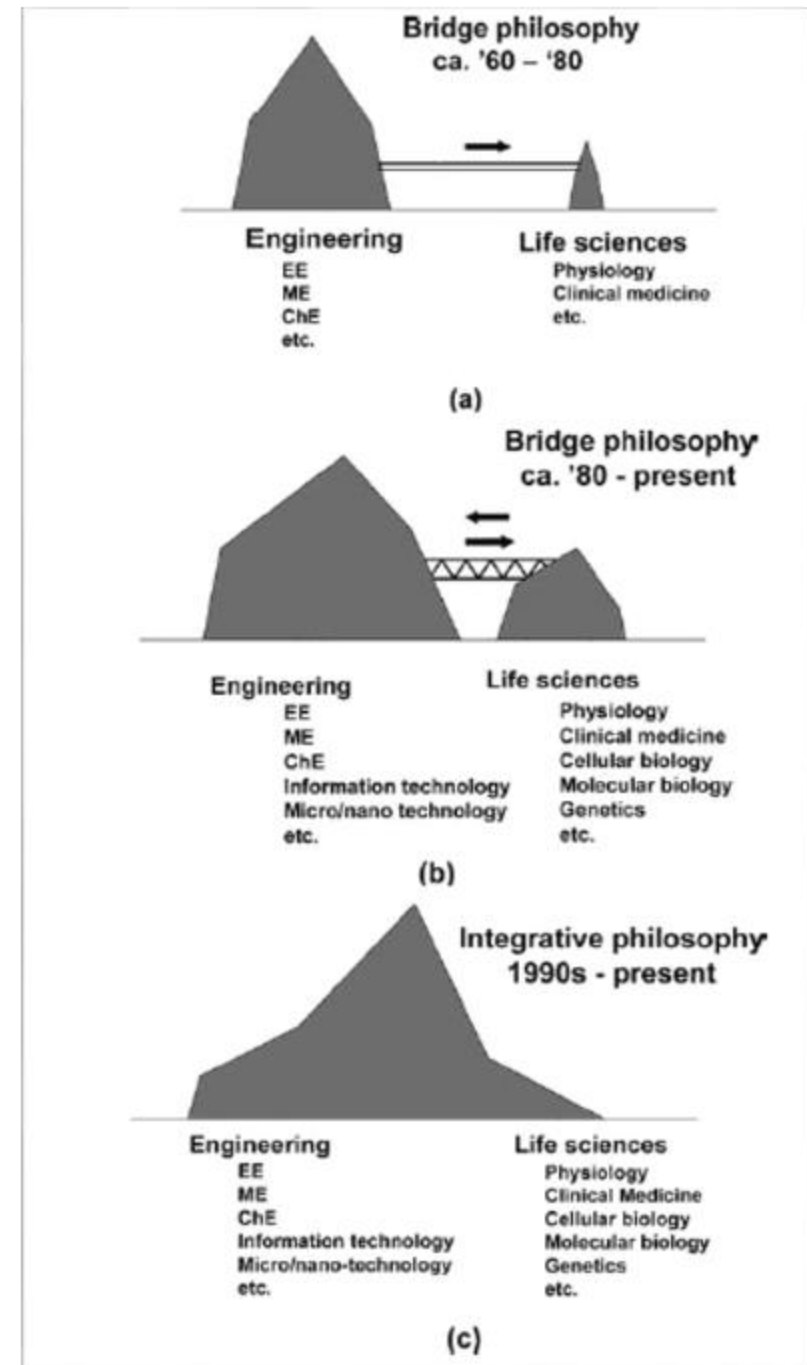
## El desafío es formar HIBRIDOS e **HIBRIDADORES**

- Si se ponen a trabajar juntas a personas de la misma disciplina, se estarán sumando conocimientos, si se juntan personas de diferentes disciplinas, más que `sumar` lo que se está haciendo es `multiplicar` las probabilidades de que el resultado del trabajo conjunto sea innovador.

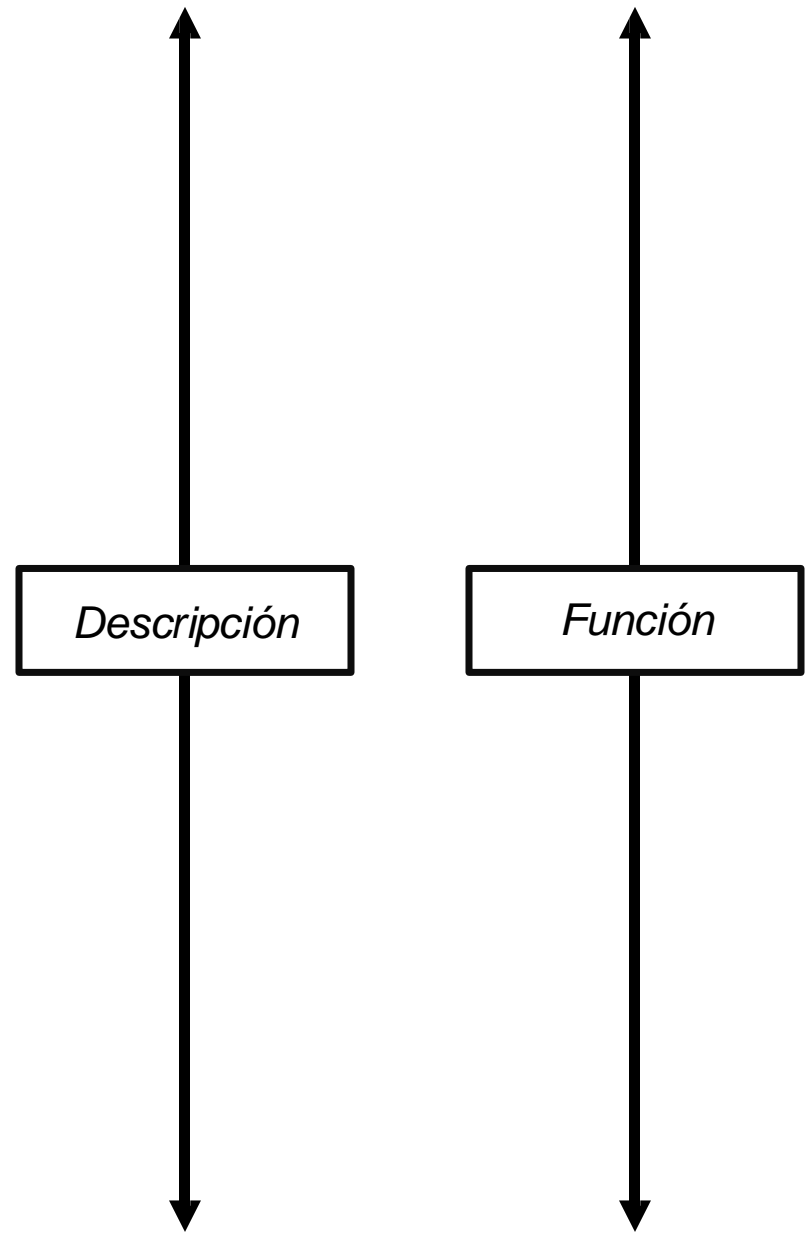
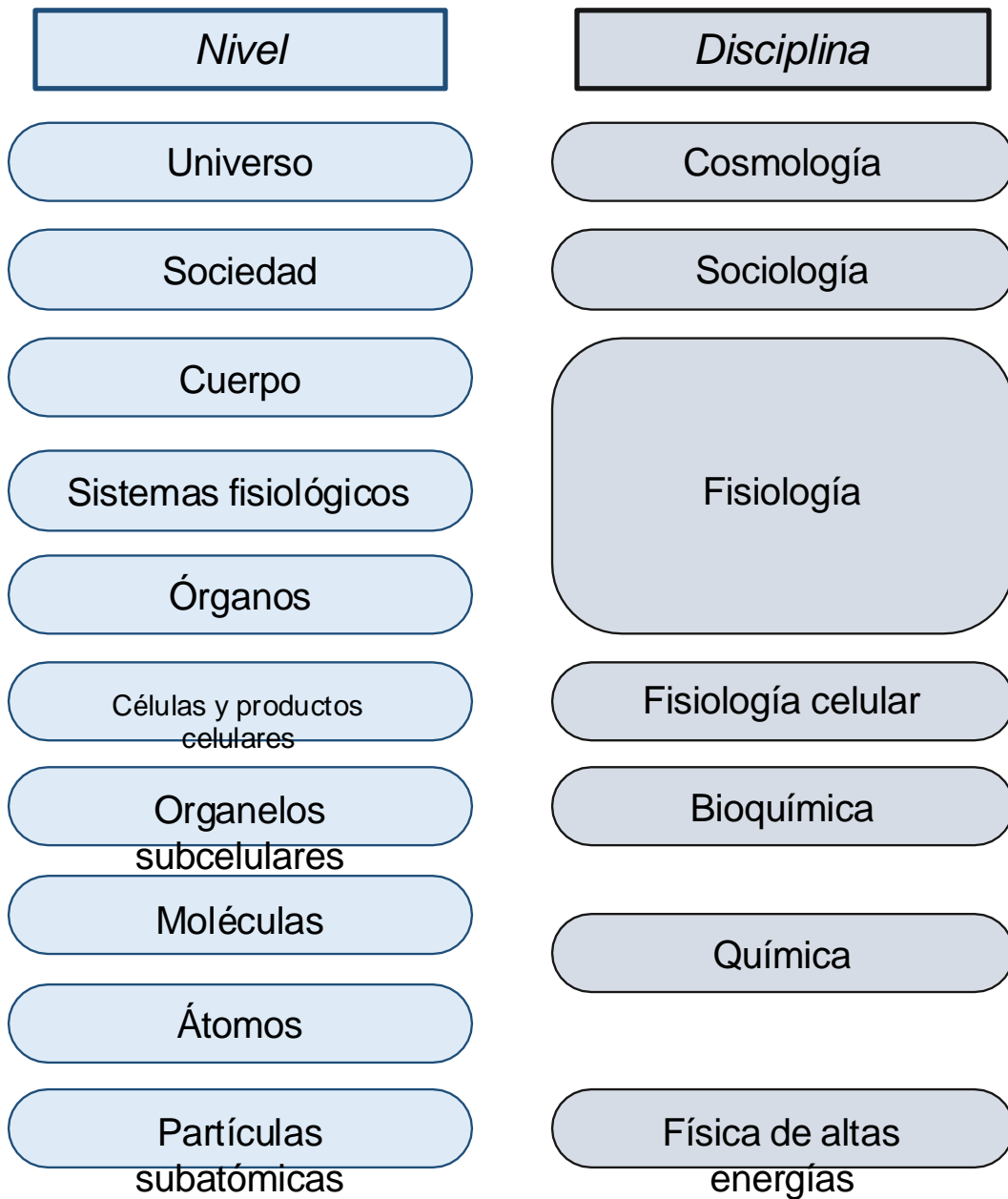


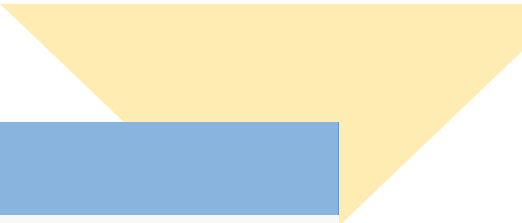
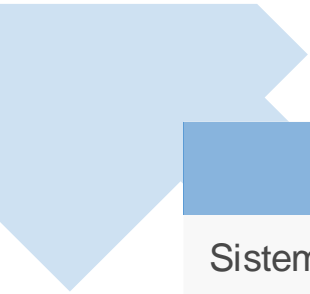


# INGENIERÍA BIOLÓGICA




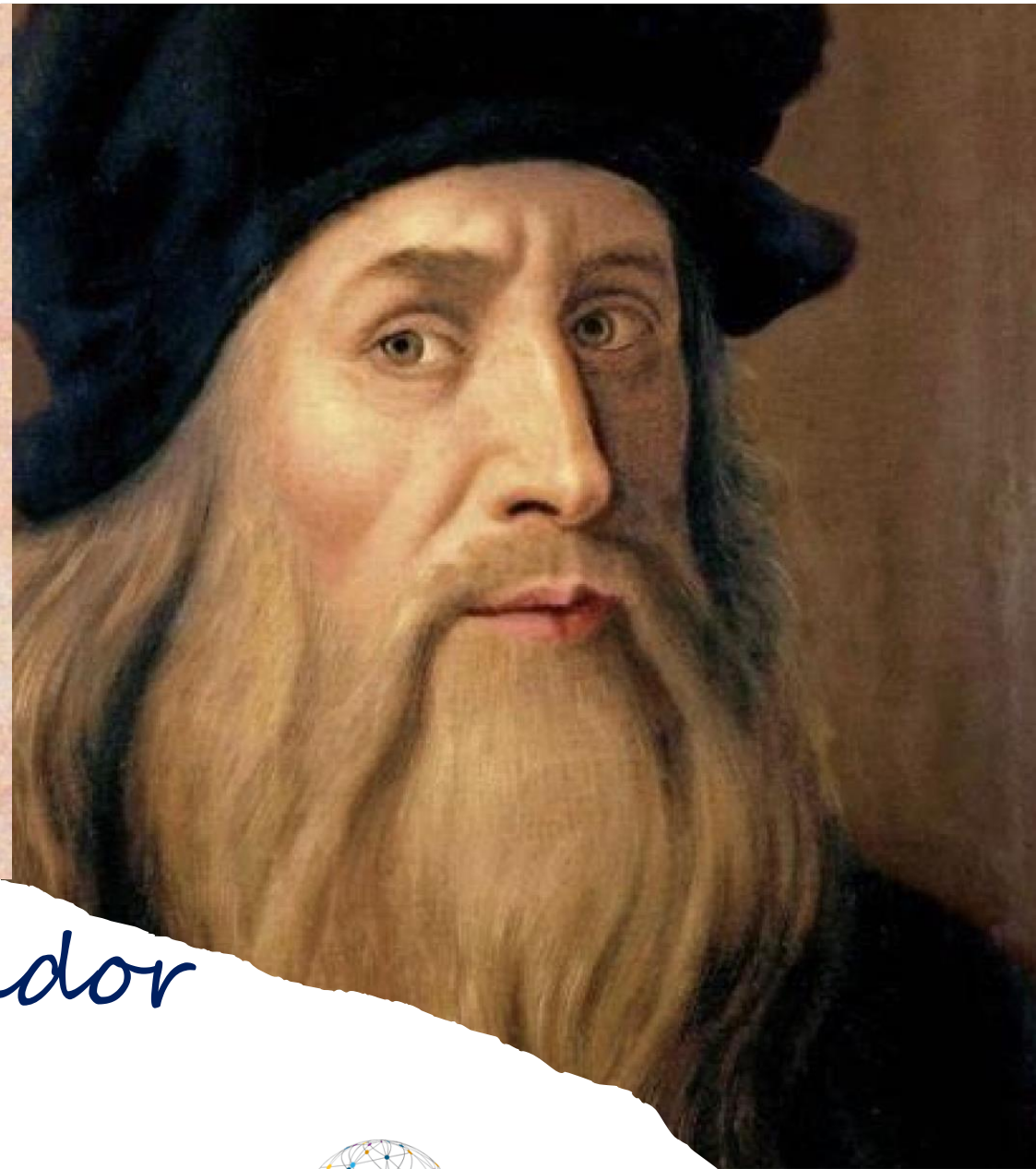






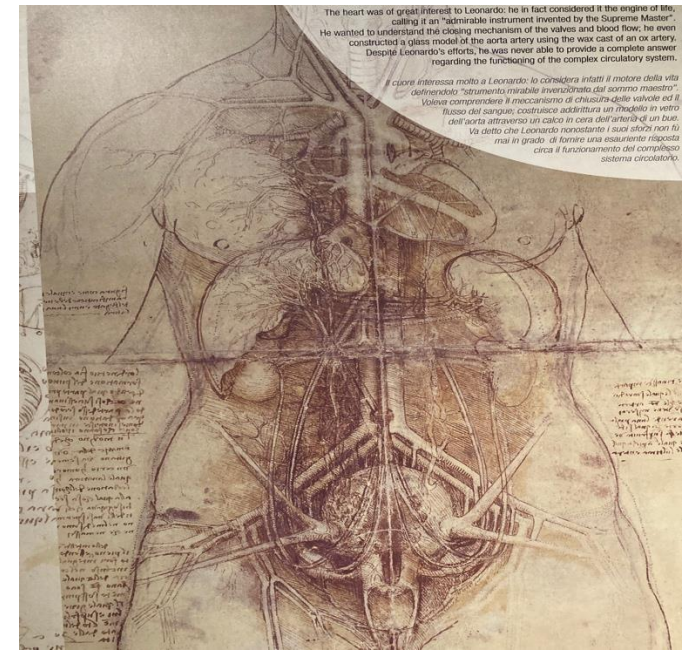
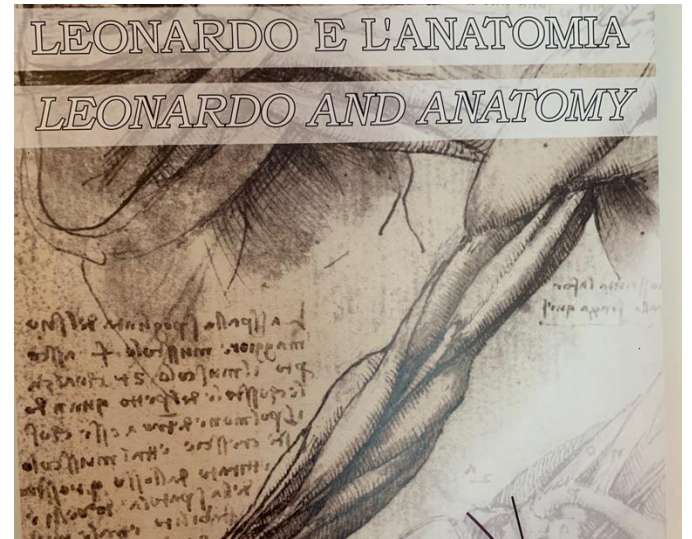
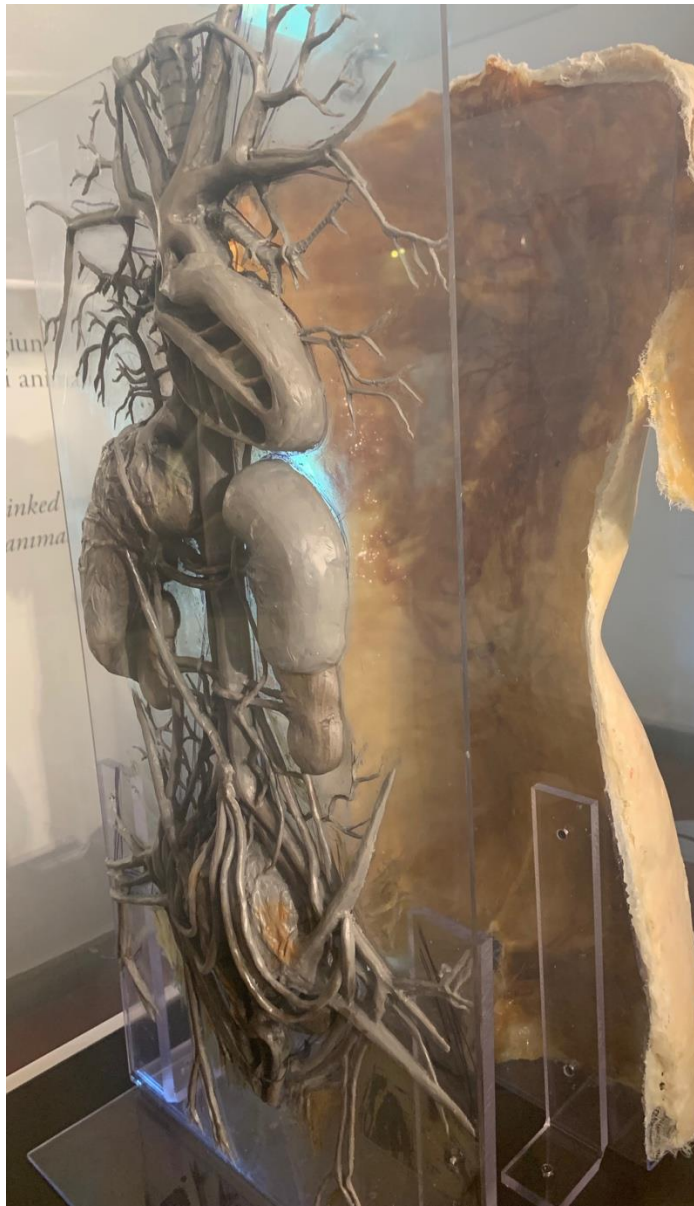
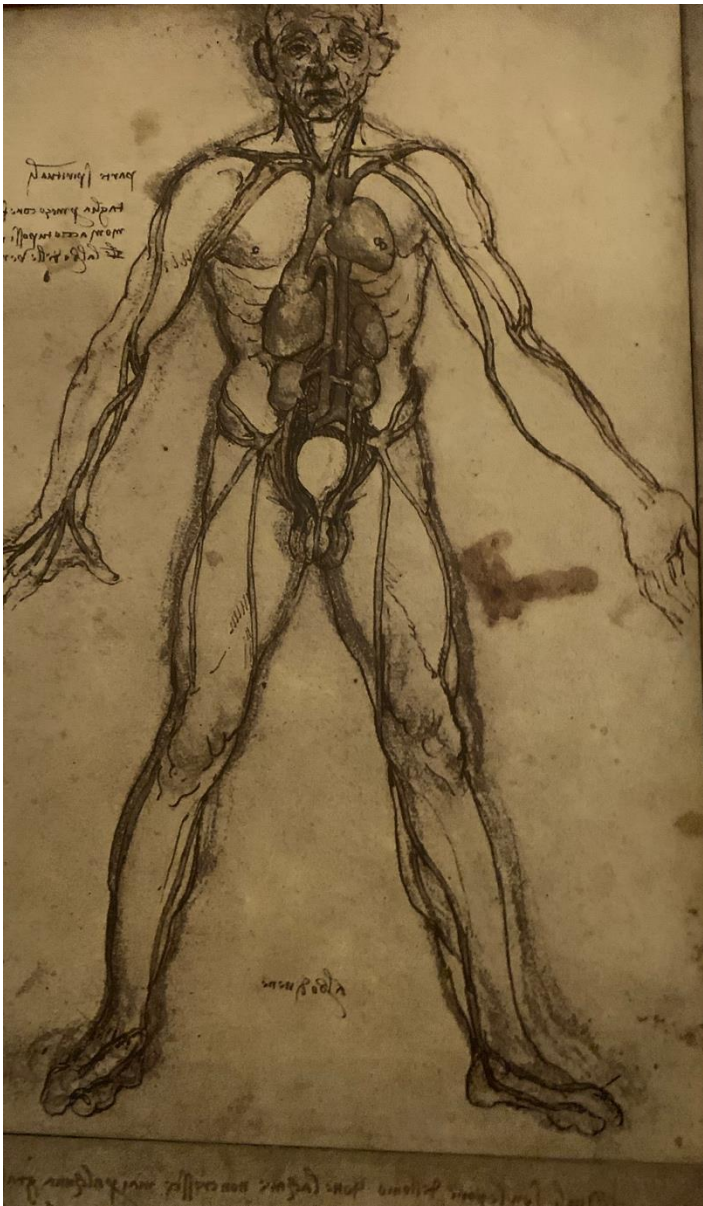
Sistemas de Órganos	Función
Sistema nervioso/Sistema endócrino	Entrada e integración sensorial; comando y control.
Sistema Cardiovascular	Transporte entre tejidos e interfaces ambientales.
Sistema Respiratorio	Regulación de gases en la sangre e intercambio de gas con el aire.
Sistema Tegumentario (piel)	Protección de invasiones microbianas y barrera de vapor de agua.
Sistema inmune	Remoción de microbios y otros materiales extraños.



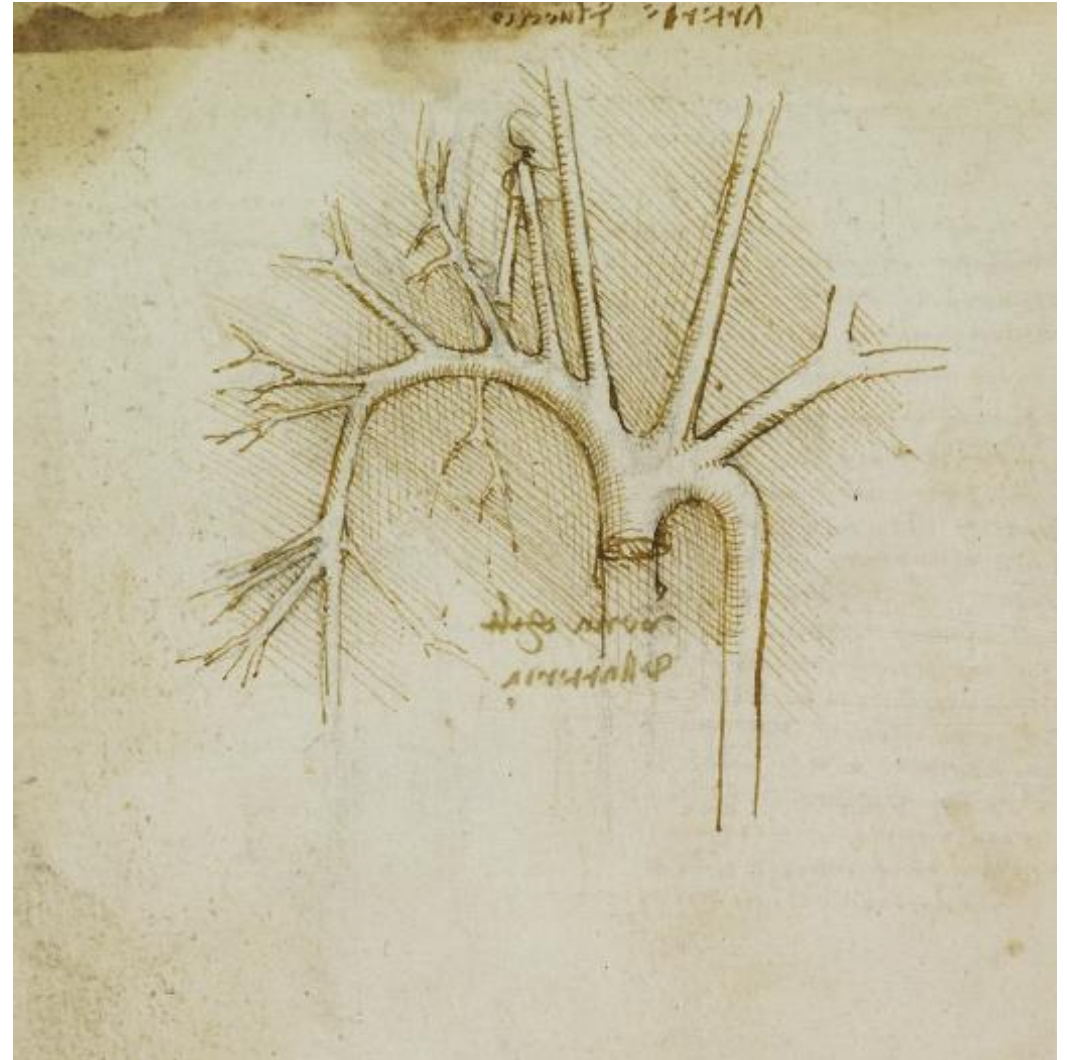
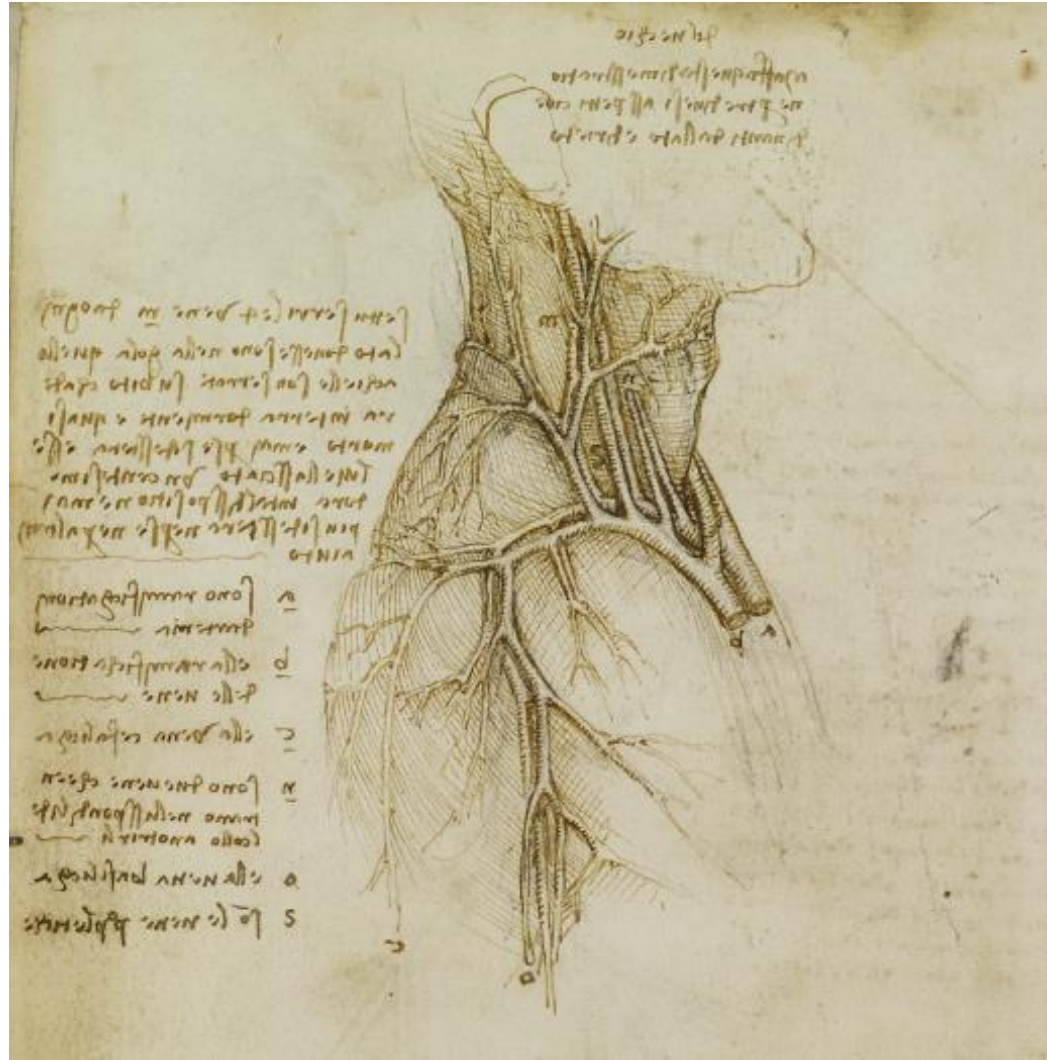


LEONARDO, el creador de la fisiología cuantitativa



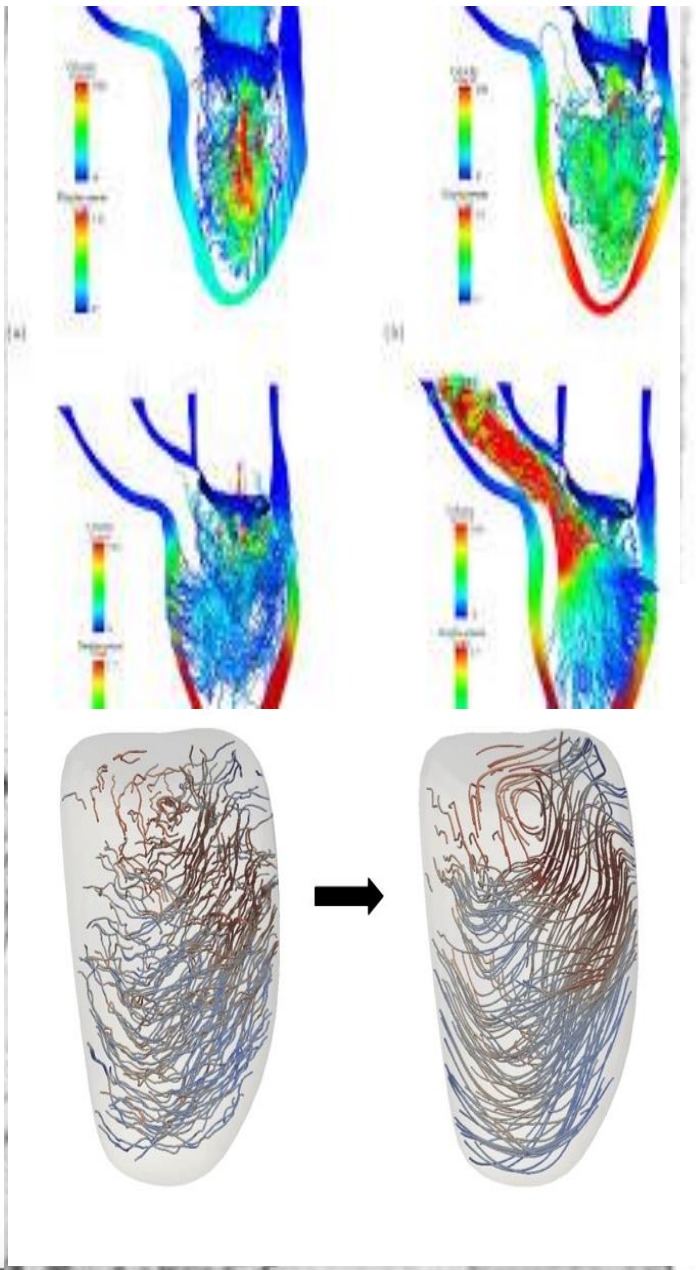
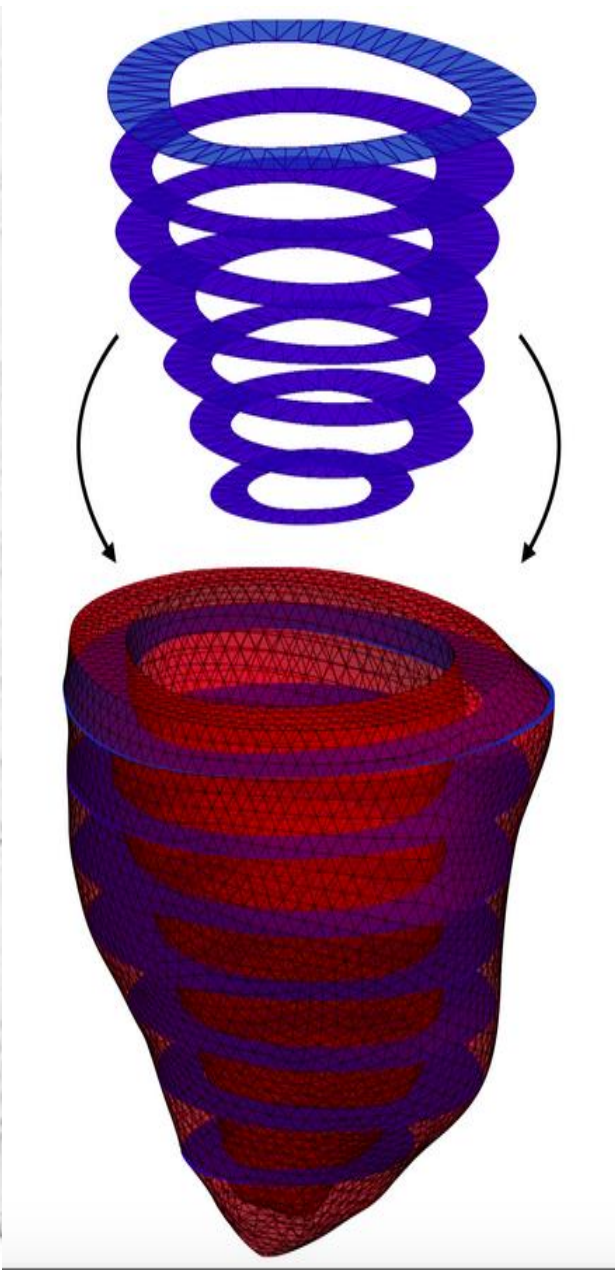
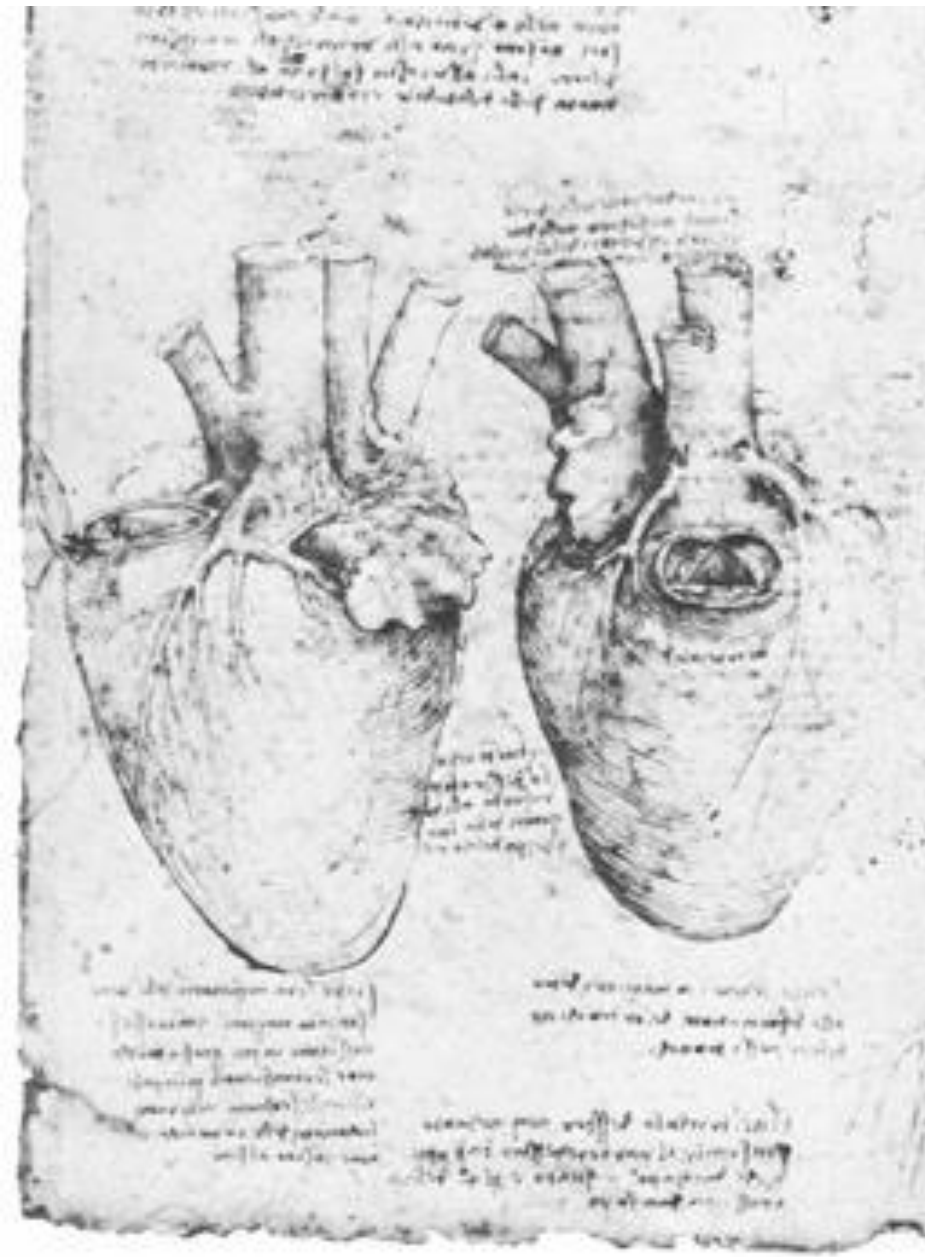




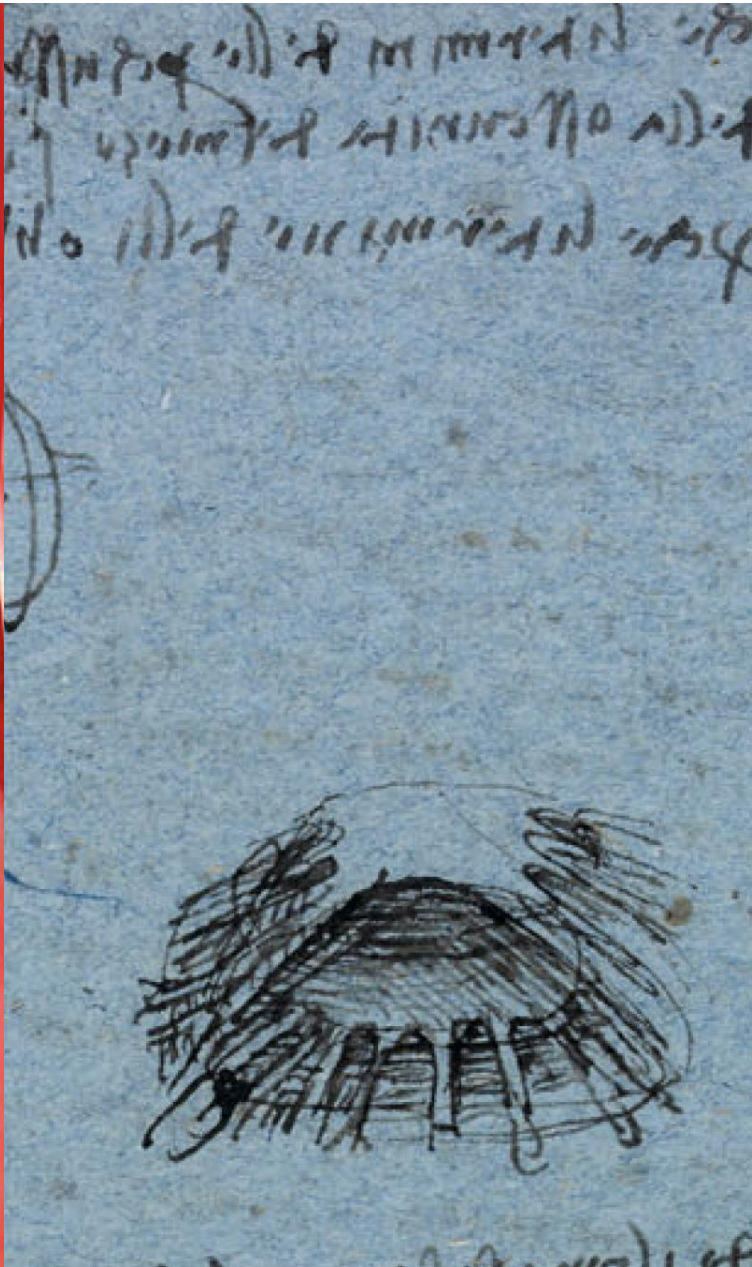
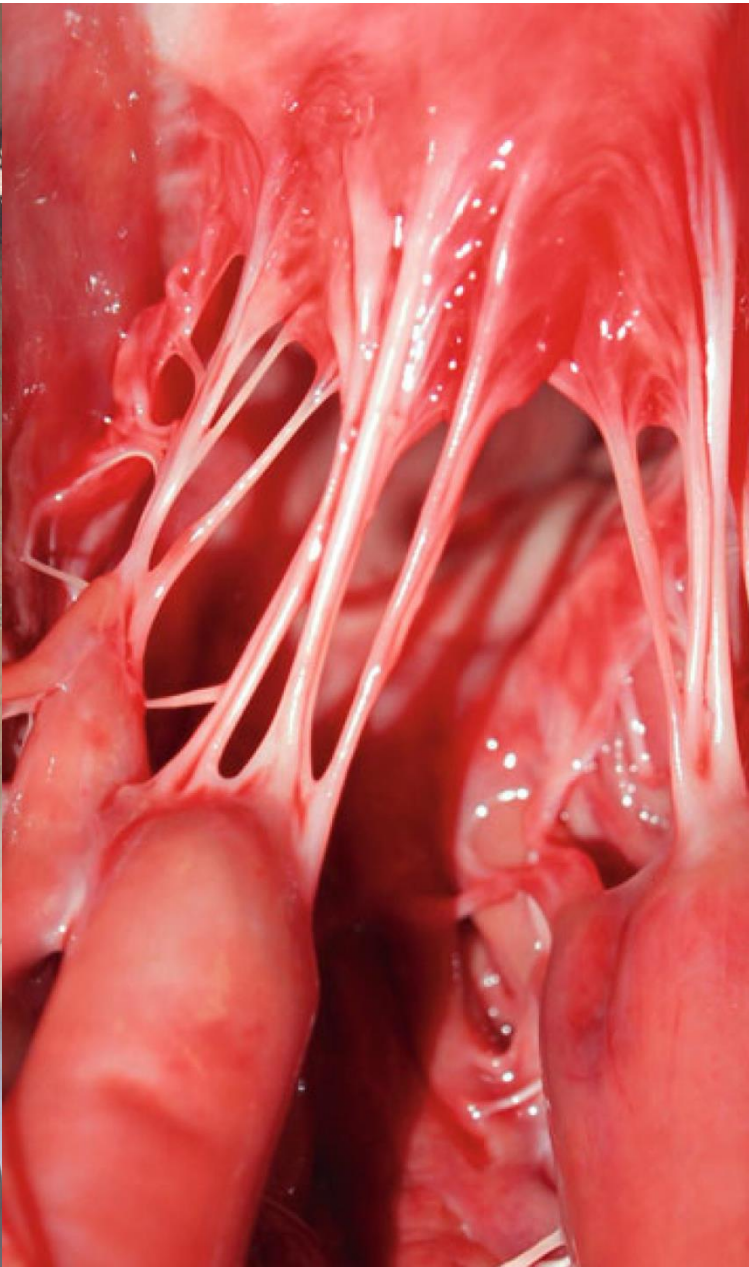




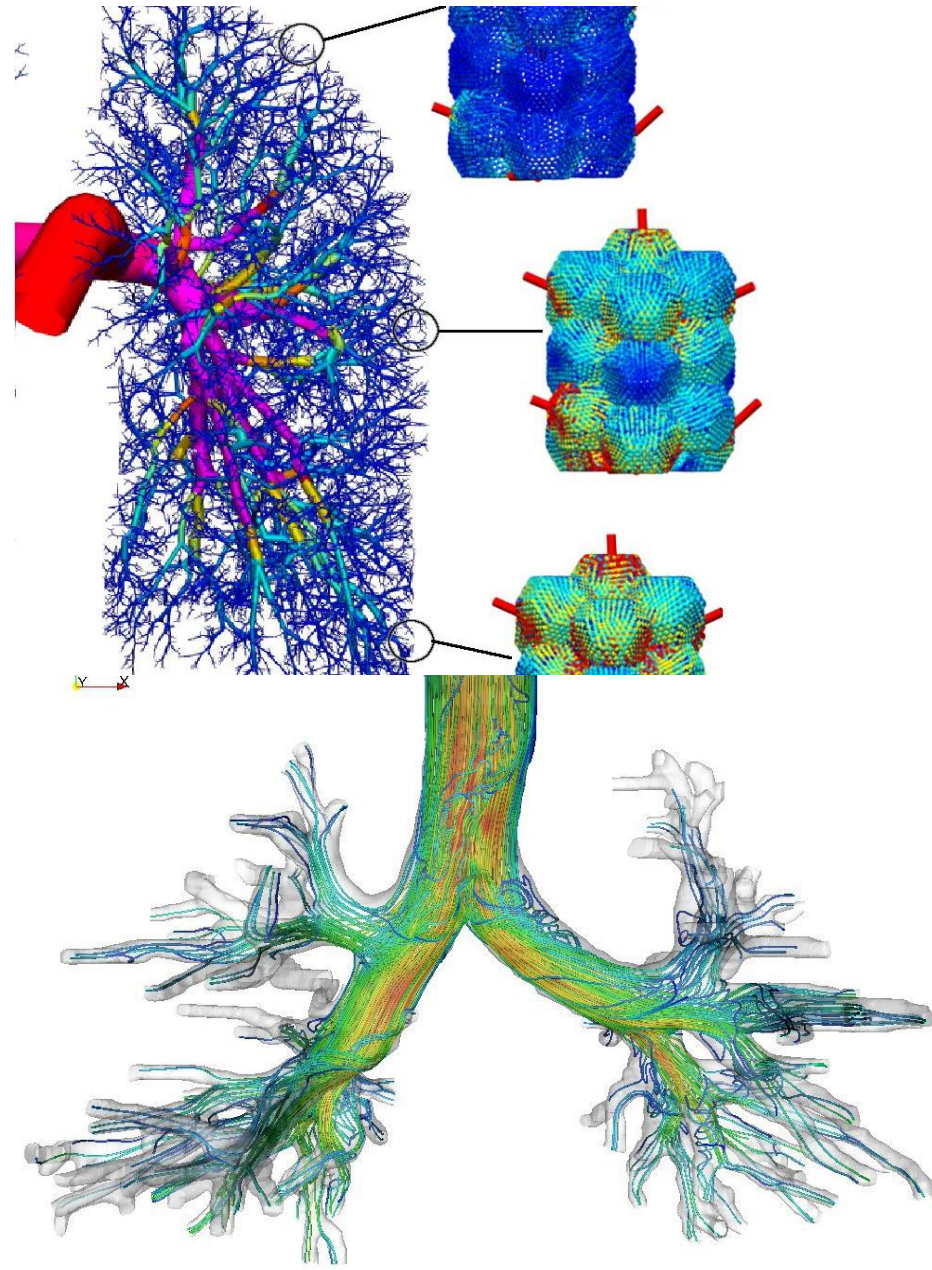
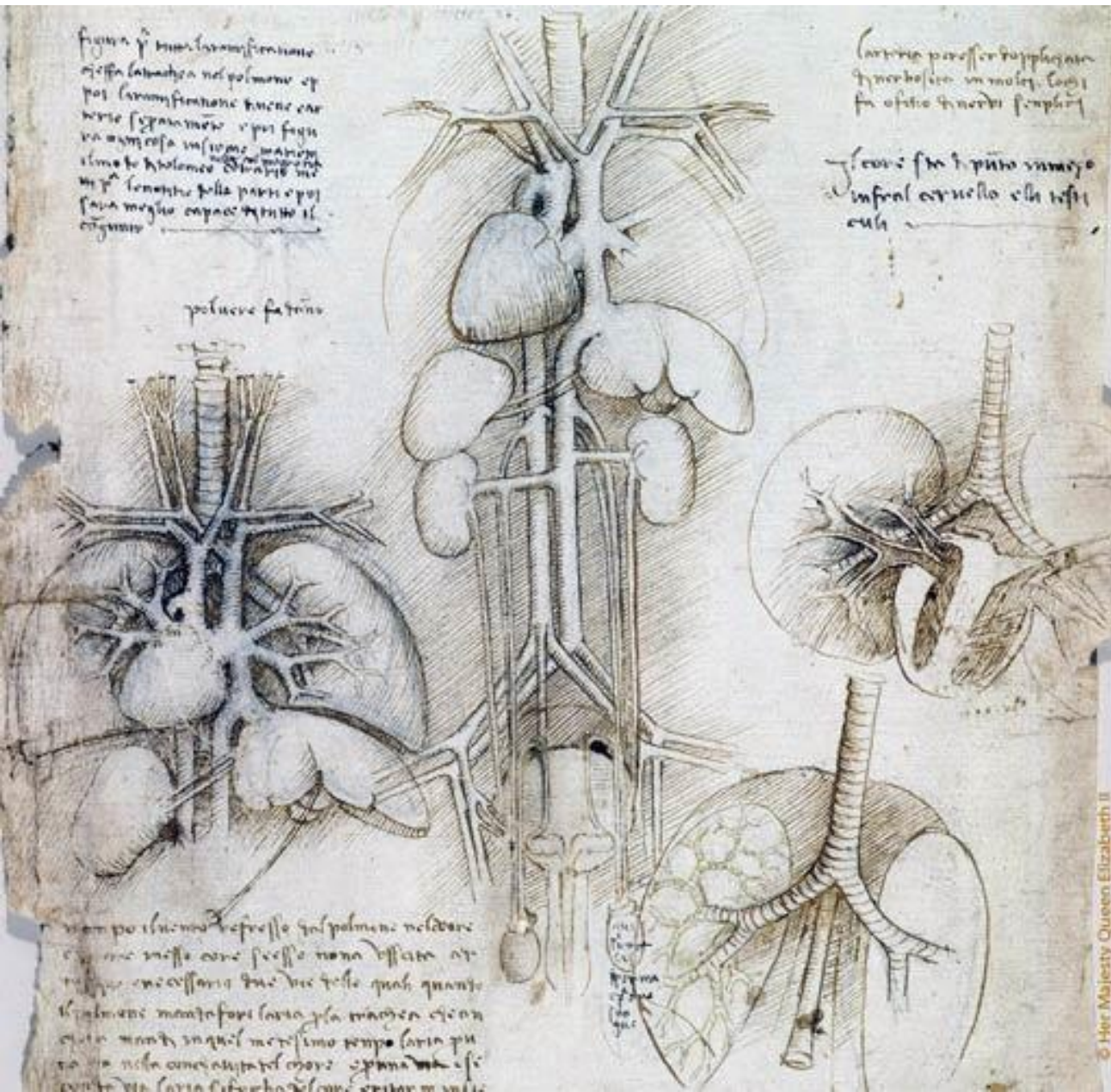




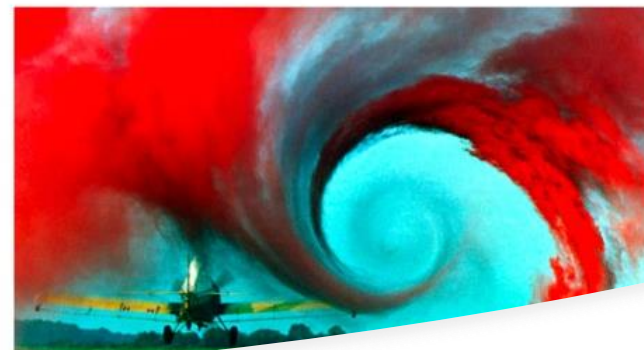
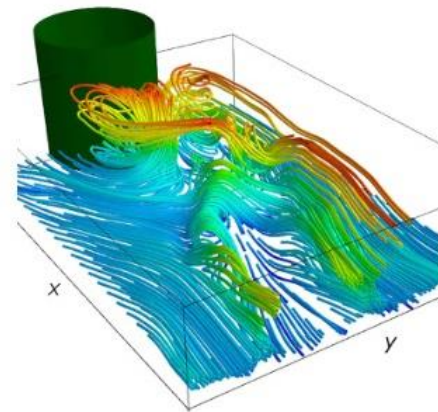




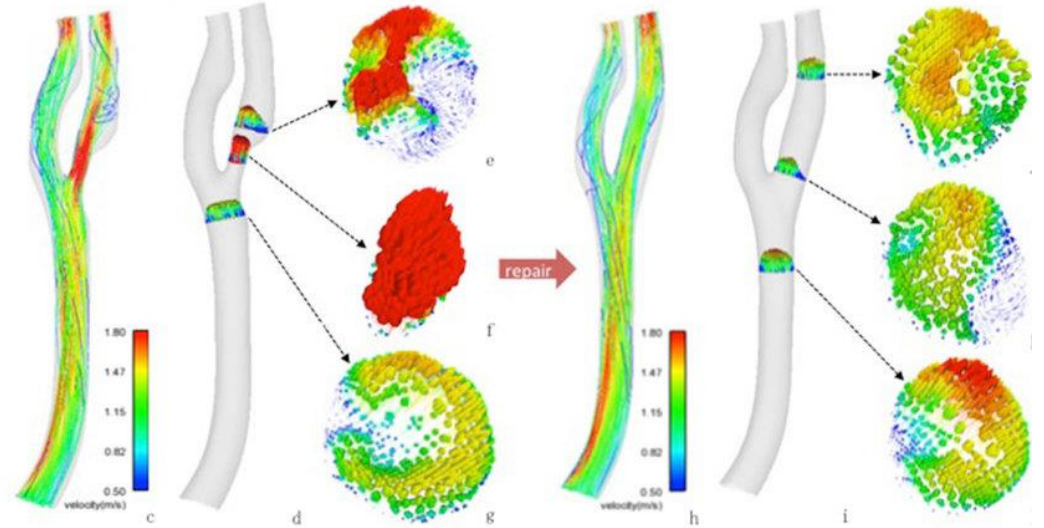
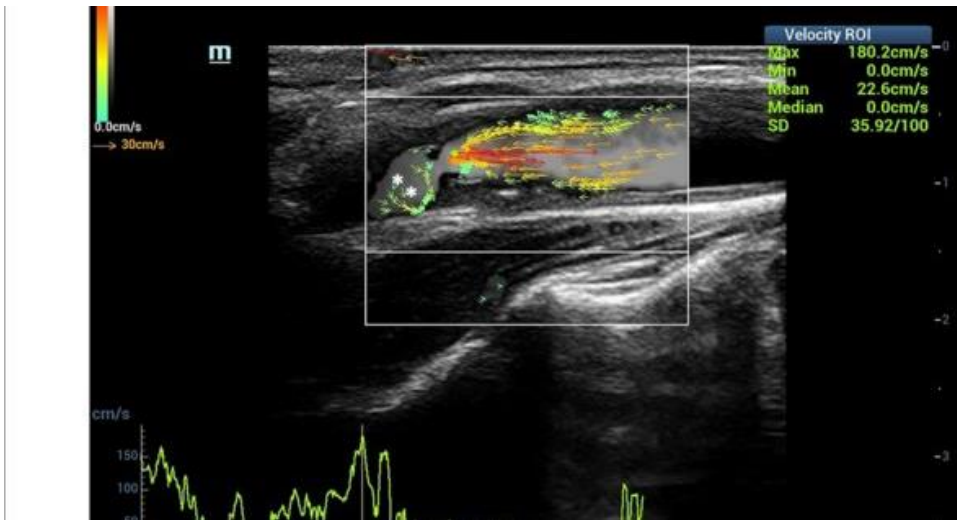
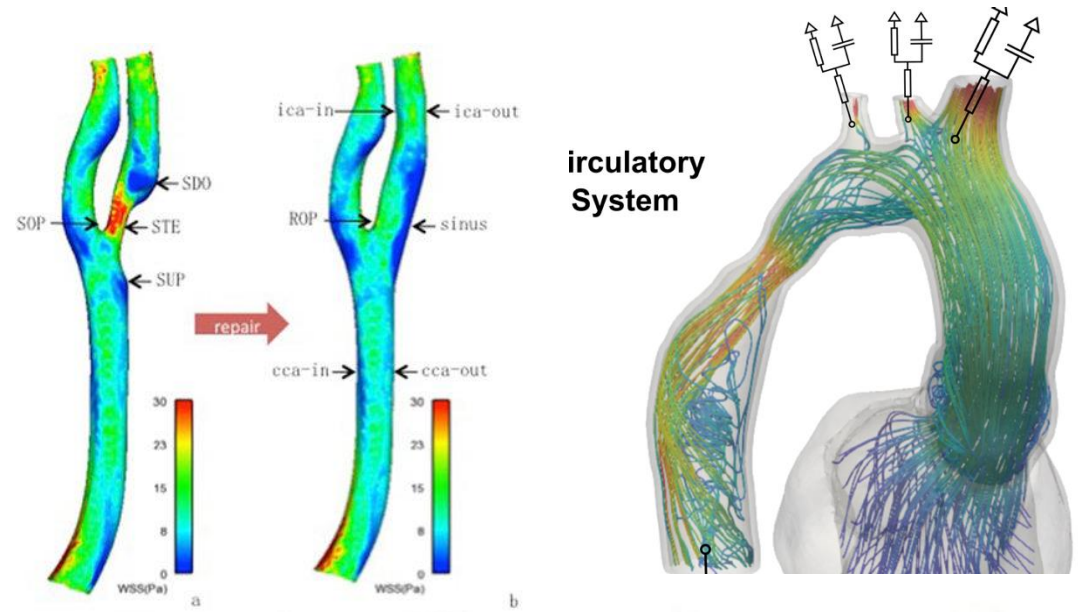
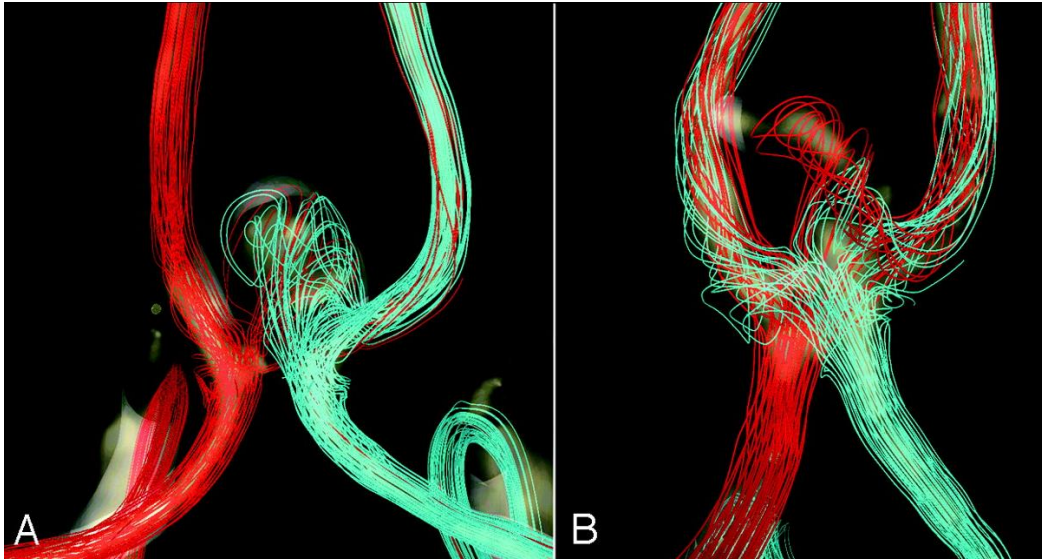


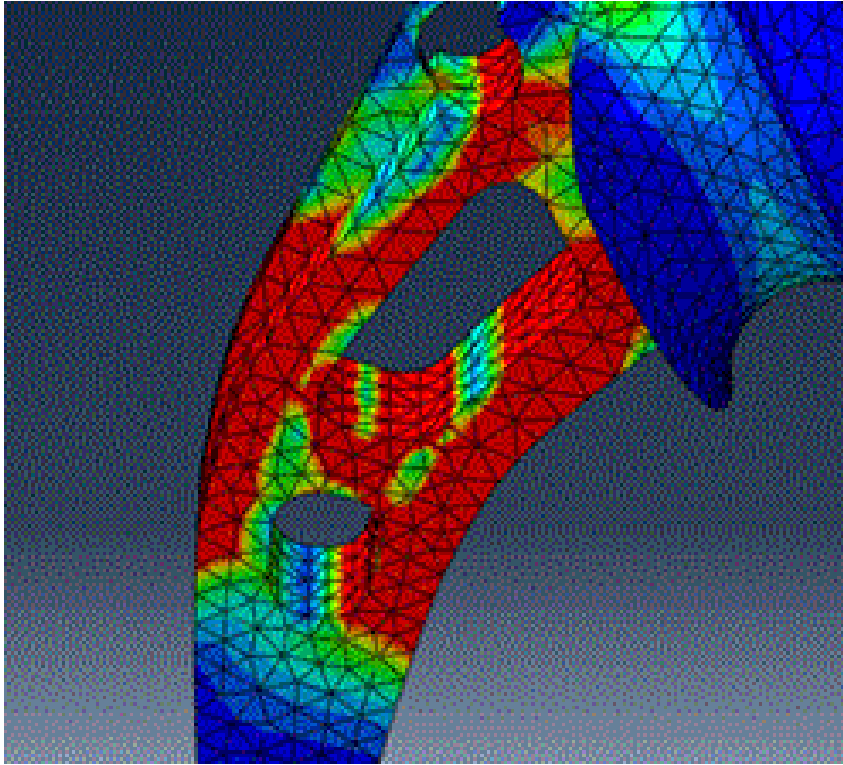




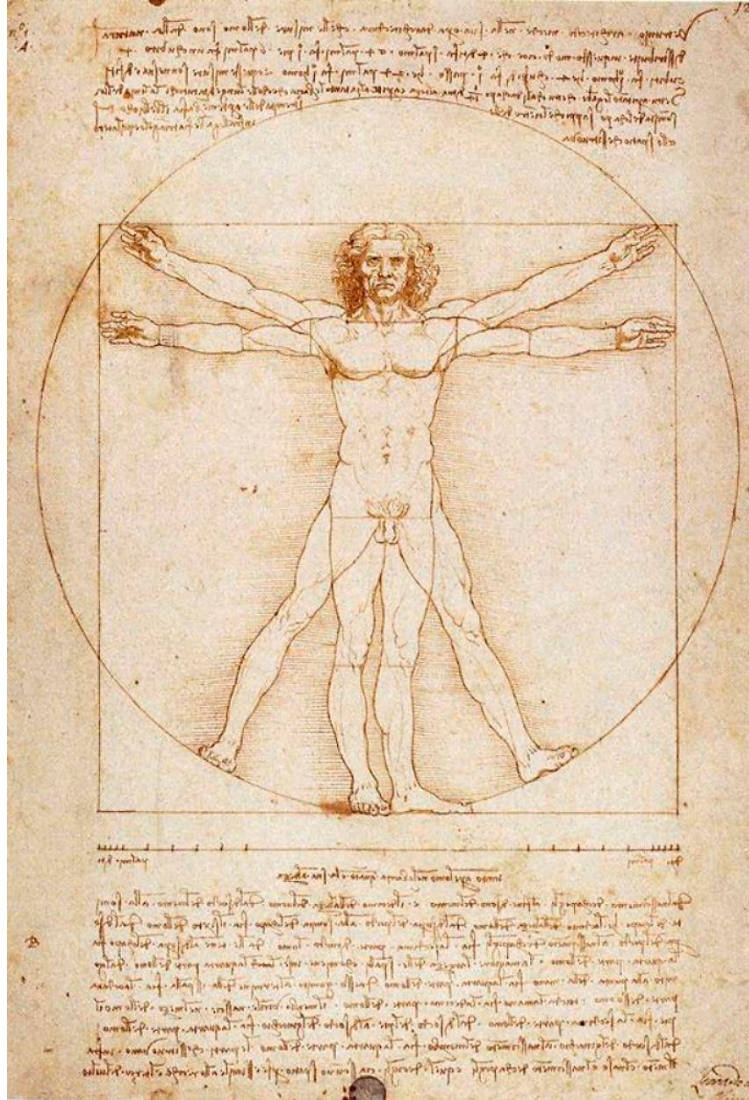
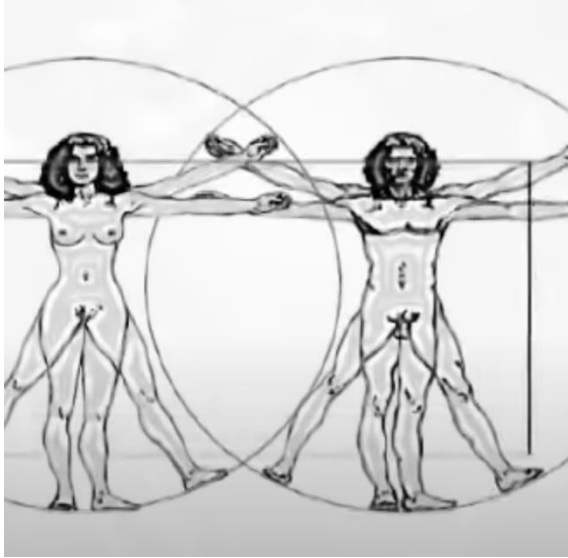
















## CIENCIA

CIENCIA EN PRIMERA PERSONA

RICARDO ARMENTANO

# 500 años (y una semana) sin Leonardo

El 2 de mayo se cumplieron 500 años de la muerte de Leonardo da Vinci. El bioingeniero Ricardo Armentano reflexiona aquí sobre cómo su legado sigue vigente orientando el camino para la ingeniería aplicada a la medicina y la biología

Leonardo da Vinci resumió el ideal renacentista del sabio de múltiples talentos –pintor, escultor, narrador, músico, científico, matemático, arquitecto, ingeniero– con una sed de conocimiento y una curiosidad insaciables. Leonardo ha anticipado y presagiado con su investigación fenómenos de gran actualidad y con los escasos recursos disponibles en aquel momento: la ecología, la destrucción nuclear, el uso de la ciencia con fines bélicos. Su enfoque, imaginación y poder de observación han dejado su huella en el mundo moderno.

En su modesta casa de Florencia, Leonardo vive a la sombra del esplendor de los palacios. En el corazón de la noche, se imagina el mundo lejano por venir señalando hipótesis que la ciencia tardará varios siglos en verificar. Intuiciones que nos sorprenden con su poder conceptual y precisión profética. El agua es “la sangre de la Tierra”, escribe, el elemento principal y esencial del ciclo en el que se articulan todas las formas de vida. Es él quien afirma que el hombre está “compuesto de tierra, agua, aire y fuego, como el cuerpo terrenal”. Que todo el metabolismo celular se basa en intercambios acuosos, una idea en sí misma totalmente impensable en su momento. ¡Fue el pionero de los ecologistas! Leonardo presiente que el ciclo del agua, tanto en nuestro planeta entero como en la base misma de cualquier organismo vivo, debe basarse en un equilibrio inalterable sin el cual corremos el riesgo de un desastre. Predice un mundo en el que se perturbará este ciclo fundamental de

agua vital. Desde su siglo XVI florentino, Leonardo ha visto las grandes ciudades contaminadas de nuestro tiempo, percibió el envenenamiento del aire, las sustancias nauseabundas y peligrosas que matan a los océanos. Y la guerra... una guerra terrible, de llama y acero, una guerra de la que habla incluso en términos de “ruptura de la materia en los elementos más íntimos”. ¡Avizoraba Leonardo la división del átomo?

En cierto sentido Leonardo da Vinci no es de este mundo, su extraño genio lo dirige a todos los campos del conocimiento y las obras que hoy llamaríamos “ingeniería”. Muy temprano, se revela como un espíritu universal, su mirada del mundo es la de un visionario en el mundo real.

La gran innovación de Leonardo fue haber tomado conceptos bien establecidos y someterlos a la verificación directa de los fenómenos, utilizando siempre su gran capacidad de observación, equipado con su extraordinaria habilidad para transformar lo que vio en una esquematización gráfica de procesos. Leonardo echó los cimientos de nuevas ciencias experimentales; se alejó del mero empirismo hacia preceptos de una ciencia aplicada apta para la aplicación general en el mundo industrial. En ese sentido, fue el primer ingeniero moderno. Leonardo tuvo menos influjo porque sus escritos no tuvieron la suficiente difusión y algunos se perdieron. ¿Qué hubiera pasado si Galileo y Kepler los hubie-

dipolo científico y artístico, lo cual podría ser una clave especial para el avance del conocimiento. Su abordaje integral y ubicuo del planeta podría ser el precedente de la frase “Piense global, actúe local”, utilizada por primera vez en el contexto de desafíos medioambientales y que ha tomado un valor y uso más extendidos en los últimos años.

La educación bajo el *leit motiv* “pensar globalmente, actuar localmente” es una de las cosas más poderosas e importantes en nuestras vidas y debería enseñarse a los estudiantes jóvenes. Porque todo está conectado, aunque desconectado. Esta desconexión tiene un alto costo, y una mirada hacia el futuro predice que la mayoría de los temas serios se relacionarán con el crecimiento de la población y la demografía y será debido a las necesidades de agua, comida, medicina y energía, disponibilidad, producción, demanda, distribución, precio, etcétera. La solución a estas situaciones o circunstancias requiere de un enfoque holístico, consecuencia de la globalización, por ejemplo, la economía global, y por sobre todo, el estímulo a la colaboración entre la industria, la academia, el ambiente hospitalario, laboratorios y gobierno para reunir expertos de diferentes disciplinas para investigar y satisfacer las necesidades específicas de un producto o un servicio con alto valor agregado.

El *leit motiv* de la nueva ingeniería es que hay que dimensionar el poder de la creatividad; osadía y aventura de descubrir y aprender del cambio. El gran desafío de nuestros tiempos es estimular la creatividad, descartando el mito que afirma que

sobrenatural. Es una capacidad: cualquiera puede aprender a ser creativo y sacar el mayor provecho. Para provocar la creatividad, pocas cosas son tan importantes como el tiempo dedicado a la fecundación cruzada con campos disímiles a nuestras áreas de especialización: los grandes avances a menudo dependen de la audacia ingeniosa de un profano.


Para honrar el legado de Leonardo estamos formando especialistas en ingeniería biológica buscando refundar el espíritu creativo, la curiosidad y la imaginación de Leonardo cobijado por un ámbito donde artistas, científicos, poetas y filósofos, entre otros, logren un intercambio interdisciplinario de ideas, productos, bienes y servicios, priorizando la vinculación de la academia al trabajo para mejorar la productividad, empoderando la ciencia, la tecnología y la innovación como motores del crecimiento económico y del desarrollo humano. Buscamos la interacción academia-industria-clínicas hospitalarias, para generar recursos suficientes y obtener modernas instalaciones a fin de hacer más atractiva una carrera universitaria para las nuevas generaciones, y de este modo encender el interés para completar los estudios universitarios. Fomentamos la instalación de laboratorios con tecnología de avanzada para mejorar la calidad de la educación en ingeniería y ciencia, y crear oportunidades para que miles de jóvenes creativos contribuyan en el proceso de innovación.

Ciertamente, el compromiso y ayuda gubernamentales son fundamentales para ayudar a crear y mantener el ecosistema necesario. En este contexto global, y basados en el pensamiento estratégico innovador, se debe enseñar a pensar para conectar ideas y descubrimientos disruptivos en un ecosistema que estimule una mente crítica refractaria a la propaganda sectaria, o a cual-

Ricardo Armentano es director del Departamento de Ingeniería Biológica del



## Leonardo Da Vinci, the Great Innovator in Cardiovascular Biomechanics

Ricardo Armentano<sup>1,2,3</sup> 

<sup>1</sup> EMBS IEEE Technical Committee on Cardiopulmonary Systems,  
Buenos Aires, Argentina

armen@ieee.org

<sup>2</sup> I2C Grupo de Investigación en Ingeniería Cardiovascular,  
Montevideo, Uruguay

<sup>3</sup> GIBIO Grupo de Investigación y Desarrollo en Bioingeniería,  
Buenos Aires, Argentina

**Abstract.** Five hundred years after his death, the figure of Leonardo da Vinci continues transmitting his tireless desire to know and learn. *Leonardo* is the symbol of a century in which progress impacted, shattering the thickness of dogmas. In the *Quattrocento*, the doors were definitely opened, ideas spread and still feed us, clear our path and enlighten us. Florence, in Leonardo's time, was the Silicon Valley of the Renaissance. Leonardo studied the dynamics of water flow in rivers, using colors to show the flow patterns, thus defining the continuous stress on the side walls of the river. He determined, with different colors, the flow characteristics in the center and near the edges of the rivers and extrapolated those findings to the blood that flows in the arteries. Leonardo studied the coronary artery and veins, heart and bronchia in detail and made several assumptions about the cause of atherosclerosis, based on his previous hydrodynamic studies of water flow. Leonardo theorized that diseases were derived from some imperfection in the structure of the human body and addressed the issue of atherosclerosis and its correlation with aging. He accurately described a case of portal hypertension with liver cirrhosis as well as pulmonary circulation and chronic obstructive pulmonary disease. Leonardo was the great innovator in Biomechanics of the cardiovascular system: heart, lungs and circulation.

**Keywords:** Innovation · Biomechanics · Cardiovascular

## 1 Introduction

### 1.1 Brief History

Leonardo who was born on April 15, 1452 in his father's family property in An-chiano, in the small town of Vinci, embodied in the Renaissance atmosphere. He died in France in 1519 and was buried in the Château d'Amboise in the Loire Valley. The last three years of his life were spent in the service of the king of France, Francis I. Through his research and with the scarce resources available at that time, Leonardo anticipated and foresaw topical phenomena such as ecology, nuclear destruction, and the use of



Creative Education, 2019, 10, 1180-1191

<http://www.scirp.org/journal/ce>

ISSN Online: 2151-4771

ISSN Print: 2151-4755

# Leonardo da Vinci—The First Bioengineer: Educational Innovation to Meet His Desire for Knowledge and Promote His Concept of Interdisciplinarity

Ricardo Luis Armentano, Luis Kun

Department of Biological Engineering, Universidad de la República, Montevideo, República Oriental del Uruguay

Email: armen@ieee.org

**How to cite this paper:** Armentano, R. L., & Kun, L. (2019). Leonardo da Vinci—The First Bioengineer: Educational Innovation to Meet His Desire for Knowledge and Promote His Concept of Interdisciplinarity. *Creative Education*, 10, 1180-1191. <https://doi.org/10.4236/ce.2019.106089>

**Received:** May 6, 2019

**Accepted:** June 21, 2019

**Published:** June 24, 2019

## Abstract

The central axis of the work has been to empower the figure of Leonardo da Vinci 500 years after his death. With him, we wanted to infect our students with their tireless desire to know and learn. We plant the possibility of carrying out a project of educational innovation giving a push to the process of teaching and learning by making it more participatory, cooperative and interdisciplinary, as well as the desire to involve more the students encouraging their interest in learning and work. To honor Leonardo's legacy and the spirit of the Renaissance, it is necessary to teach to stimulate the critical spirit and

## Fiat lux et facta est lux: Leonardo Reveals the Secrets of the Heart and Arteries (in Health and Disease)

Ricardo L. Armentano

EMBS IEEE Technical Committee on Cardiopulmonary Systems and Physiology-based Engineering

DOI: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i05.37567>

**Keywords:** Leonardo da Vinci, Renaissance, Heart, Arteries, Health, Disease

### ABSTRACT

Five hundred years after his death, the figure of Leonardo da Vinci continues transmitting his tireless desire to know and learn. *Leonardo* is the symbol of a century in which progress impacted, shattering the thickness of dogmas. In the *Quattrocento*, the doors were opened, ideas spread and still feed us, clear our path, and enlighten us. Florence, in Leonardo's time, was the Silicon Valley of the Renaissance. Leonardo studied the dynamics of water flow in rivers, using colors to show the flow patterns, thus defining the continuous stress on the side walls of the river. He determined, with different colors, the flow characteristics in the center and near the edges of the rivers and extrapolated those findings to the blood that flows in the arteries. Leonardo studied the coronary artery and veins, heart and bronchia in detail and made several assumptions about the cause of atherosclerosis, based on his previous hydrodynamic studies of water flow. Leonardo theorized that diseases were derived from some imperfection in the structure of the human body and addressed the issue of atherosclerosis and its correlation with aging. He accurately described a case of portal hypertension with liver cirrhosis as well as



PDF

PUBLISHED

2023-04-27

HOW TO CITE

Armentano, R. L. (2023). Fiat lux et facta est lux: Leonardo Reveals the Secrets of the Heart and Arteries (in

Paper—Fiat lux et facta est lux: Leonardo Reveals the Secrets of the Heart and Arteries...

## Fiat lux et facta est lux: Leonardo Reveals the Secrets of the Heart and Arteries (in Health and Disease)

<https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i05.37567>

Ricardo L. Armentano<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Biological Engineering Department, CenUR LN Universidad de la República, Paysandu, Uruguay

<sup>2</sup>Leonardo da Vinci Chair at Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina  
[armen@ieee.org](mailto:armen@ieee.org)

**Abstract**—Five hundred years after his death, the figure of Leonardo da Vinci continues transmitting his tireless desire to know and learn. *Leonardo* is the symbol of a century in which progress impacted, shattering the thickness of dogmas. In the *Quattrocento*, the doors were opened, ideas spread and they still feed us today, clear our path, and enlighten us. Florence, in Leonardo's time, was the Silicon Valley of the Renaissance. Leonardo studied the dynamics of water flow in rivers, using colors to show the flow patterns, thus defining the continuous stress on the side walls of the river. He determined, with different colors, the flow characteristics in the center and near the edges of the rivers and extrapolated those findings to the blood that flows in the arteries. Leonardo studied the coronary artery and veins, heart and bronchia in detail and made several assumptions about the cause of atherosclerosis, based on his previous hydrodynamic studies of water flow. Leonardo theorized that diseases were derived from some imperfection in the structure of the human body and addressed the issue of atherosclerosis and its correlation with aging. He accurately described a case of portal hypertension with liver cirrhosis as well as pulmonary circulation and chronic obstructive pulmonary disease. Leonardo was the greatest pioneer in revealing the secrets of the heart and arteries.

**Keywords**—Leonardo da Vinci, Renaissance, heart, arteries, health, and disease



**Programa de  
FISIOLOGÍA CUANTITATIVA**

**1. NOMBRE DE LA UNIDAD CURRICULAR**

Fisiología Cuantitativa

**2. CRÉDITOS**

10

**3. OBJETIVOS DE LA UNIDAD CURRICULAR**

**Objetivo general:**

Se motiva al alumno a adquirir un conocimiento en el análisis cuantitativo de la fisiología humana y al control de la misma. Desarrollar los fundamentos de la fisiología y la biofísica mediante la utilización de matemáticas, principios físicos y técnicas de la ingeniería para el entendimiento de la fisiología humana. Este curso intenta otorgar las bases necesarias para comprender los conceptos utilizados en la investigación básica cardiovascular.

**Objetivos específicos:**

Se espera que al aprobar la asignatura el estudiante sea capaz de:

- Identificar distintos tipos de señales fisiológicas, así también como la forma de abordaje para cada una de ellas.
- Encontrar las ecuaciones diferenciales que gobiernan los distintos tipos de sistemas fisiológicos y encontrar su respuesta por diferentes técnicas temporales y frecuenciales
- Identificar respuestas en sistemas fisiológicos.
- Representar señales fisiológicas en el dominio de la frecuencia continua y discreta y en modelos concentrados y distribuidos.
- Caracterizar y representar sistemas fisiológicos en el dominio de la frecuencia.

Al final del curso, el alumno deberá haber alcanzado:

- Una formación metodológica adecuada para el trabajo en Ingeniería aplicada a la Fisiología y la Biofísica.
- Amplio manejo en fisiología y su aplicación a la modelización mediante EDO.
- Un sólido conocimiento en los procedimientos fisiológicos en tiempo continuo y discreto, y en el dominio frecuencial.



## TEMARIO

Incluye una descripción general de los grandes temas del curso y de los subtemas incluidos en cada uno de ellos.

1. UNIDAD 1: Introducción al Fisiología cuantitativa y a las señales biológicas
  - 1.1. Análisis de los fundamentos de la fisiología, la fisiopatología y la biofísica a través de la utilización de matemáticas, principios físicos y técnicas de la ingeniería para el entendimiento de la fisiología humana.
  - 1.2. Bioseñales  
Análisis de bioseñales para extraer información útil sobre el funcionamiento del cuerpo humano.
2. UNIDAD 2: Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Cardiovascular. Introducción a la mecánica cardiovascular
  - 2.1. Anatomía general del corazón.  
Anatomía microscópica. Tejido muscular cardíaco. Células marcapasos. Células contráctiles. Células conductoras.
  - 2.2. Sistema cardionector.  
Sistema de conducción. Potencial de acción de una célula excitable.
  - 2.3. Ciclo Cardíaco.  
Fases. Circuitos pulmonar y sistémico.
  - 2.4. Determinantes de la Función cardíaca.  
Balance de Energía. Funciones de elastancia variable. Cambios en el bucle PV. Ondas de pulso (incidente y reflejada). Ondas de presión. Introducción a la fisiopatología. Un enfoque globalizador de la interacción cardíaca-vascular: El acoplamiento ventrículo aórtico. Marcos de referencia. Distintos enfoques.
  - 2.5. Teoría y modelos de arterias: desarrollo matemático. Analogía eléctrica. Características de la transmisión del pulso: Formas de ondas de presión y flujo en los vasos sanguíneos. Impedancia del sistema arterial. Propagación y reflexión de la onda del pulso en estadios normales y en arterias ateromatosas. Diferencias entre modelos concentrados y distribuidos
  - 2.6. Fisiología de la sangre.  
Fundamentos de hemorreología. Composición de la sangre. Viscosimetría. Comportamientos lineales, no lineales y bifásicos. Influencia del hematocrito. Abordaje clínico.
  - 2.7. Integradora: de la circulación pulmonar y sistémica al sistema respiratorio





1. UNIDAD 3: Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Respiratoria.  
Introducción a la Mecánica Respiratoria
  - 1.1. Anatomía del sistema respiratorio.
  - 1.2. Respiración.  
Ventilación pulmonar. Mecánica ventilatoria. Ciclo respiratorio. Flujo aéreo. Resistencia al flujo aéreo. Flujos de aire en la ventilación. Sensado. Aplicaciones. Abordaje clínico.
  - 1.3. Fractales y complejidad en fisiología respiratoria.  
Simetría y los fractales, haciendo hincapié en las estructuras fractales del pulmón. Modelo de pulmón con estructuras autosimilares con bifurcaciones simétricas. Abordaje clínico. Extensión del concepto de fractales a la impedancia arterial tanto de la circulación pulmonar y como en la sistémica.
2. UNIDAD 4: Fundamento de fisiología del sistema musculo-esquelético.  
Introducción a la biomecánica de tejidos blandos.
  - 2.1. Sistema musculo-esquelético. Definiciones. Tipos de tejido muscular. Características musculares. Denominación y disposición del músculo esquelético. Actina, Miosina y Sarcómero. Modelo de filamento deslizante
  - 2.2. Tensión (stress). Relación de Poisson. Material isotrópico y homogéneo. Cizallamiento (shearing). Energía en una deformación. Energía en los gráficos Tensión-Deformación. Análisis Mecánico Dinámico Configuraciones del análisis. Fuerzas mecánicas. Presión sanguínea. Determinante de estiramiento del tejido. Fuerzas mecánicas. Teoría Lineal Elástica: homogeneidad, la incompresibilidad y la isotropía de la pared arterial. Desfase y área de histéresis. La relación tensión-deformación. Abordaje clínico.
  - 2.3. Elasticidad y viscosidad en tejidos blandos. Bucle presión volumen, módulos elásticos y viscosos, dependencia frecuencial del módulo de Young, módulo y fase.  
Modelos viscoelásticos
    - 2.3.1. Modelo de Maxwell (de 2 elementos).
    - 2.3.2. Modelo de Voigt (de 2 elementos).
    - 2.3.3. Modelo de Voigt (de 3 elementos) llamado también de Saint Venant.
    - 2.3.4. Modelo de Kelvin (llamado también de Maxwell modificado o modelo de Hill).



1. UNIDAD 5: Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Renal. Introducción a la Mecánica Renal
  - 1.1. Fundamentos de Biofísica. Funcionamiento básico normal del riñón. Anatomía renal. Funciones principales. Filtrado glomerular. Movimiento de partículas. Filtración glomerular. Reabsorción tubular. Difusión simple. Transporte activo primario. Secreción. Regulación del equilibrio ácido base. Formación de la orina. Flujo sanguíneo renal. Autorregulación. Abordaje clínico.
2. UNIDAD 6: Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología del Sistema Nervioso Central. Introducción a la Neuroingeniería.
  - 2.1. Vínculo cerebro-comportamiento. Visión histórica. División histológica de la corteza. Teoría reticularista vs doctrina de la neurona. Neurona piramidal de la corteza. Tinción de Golgi. Concentraciones típicas de iones dentro y fuera de una neurona. Neurona del sistema nervioso central del mamífero. Ecuación de Nernst para el potencial de equilibrio para el ion. Respuesta del potencial de membrana a una inyección de corriente. Abordaje clínico.
  - 2.2. Primer registro del potencial de acción en el axón gigante del calamar. Respuestas en corriente de membrana a escalones de voltaje. Hodgkin, Huxley y Katz, 1952. Respuestas en corriente de membrana a escalones de voltaje. Medición de la corriente de  $\text{Na}^+$ . Modelo de Hodgkin y Huxley. Corrientes de membrana. Objetivo. Corriente de potasio. Ajuste de la conductancia de potasio. Dependencia de la inactivación de la corriente de  $\text{Na}^+$  al voltaje de estado estacionario. Modelo de Hodgkin y Huxley. Corriente de sodio. Modelo de Hodgkin y Huxley. Modelo completo. Potenciales de acción: simulación y experimentos. Potencial de acción, conductancias y variables de estado.
3. UNIDAD 7: Cierre del curso.
  - 3.1. Resumen de temas prioritarios. Criterios orientativos a evaluar en la defensa final.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

Identificación de las publicaciones básicas y complementarias adecuadas para el buen seguimiento del curso. Se debería observar la disponibilidad de estos textos, tanto en la Biblioteca de Facultad como en el mercado. En caso de existir varios textos principales, indicar para qué tema aporta cada uno. La referencia bibliográfica deberá darse de la siguiente forma:

Tema	Básica	Complementaria
2. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Cardiovascular. Introducción a la hemodinámica cuantitativa	2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10	11, 14, 15, 17, 21, 22, 25, 27, 28, 29, 30, 33, 35, 38, 39, 42, 46, 48
3. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Respiratoria	2, 3, 4, 5, 6, 9	11, 18, 19, 20, 31, 36, 37, 39, 45
4. Fundamentos de Fisiología del sistema musculoesquelético. Introducción a biomecánica de tejidos blandos	2, 5, 6, 9	11, 15, 32, 33, 39, 40, 42, 43, 49
5. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología Renal	2, 3, 4, 5, 6, 9	11, 23, 24, 40, 41, 44, 47
6. Fundamentos de Fisiología y Fisiopatología del Sistema Nervioso Central. Introducción a la Neurociencia	1, 2, 3, 5, 6, 9	11, 12, 16, 33, 43
7. Actividades Prácticas	-	12, 13, 26, 34

### 6.1 Básica

1. Bronzino JD. (2000) The Biomedical Engineering Handbook. CRC Press, Printed in the USA, 3ª edición.
2. Berne RM, Levy, MN. (2001) Fisiología. Harcourt-Brace, Madrid, España, 6ª edición.
3. Dvorkin, C. (2010). *Best & Taylor. Bases Fisiológicas de la Práctica Médica*. Ed. Médica Panamericana, 14ª edición.
4. Cingolani HE, Houssay A B. (2000) Fisiología Humana. El Ateneo, Buenos Aires, 7ª edición.
5. Ganong, W F. (2000) Fisiología Médica. Ed. Manual Moderno. México, 25ª edición.
6. Guyton A, Hall J. (2001) Tratado de Fisiología Médica. Elsevier, 14ª edición.
7. Khoo, M. (2018) Physiological Control Systems. Wiley-IEEE Press, 2ª edición.

8. Guyton A, Hall J. (1998) Fisiología y Fisiopatología. Interamericana-McGraw-Hill. México, 6ª edición.
9. Frumento, A. S. (1995) Biofísica. Mosby/Doyma Libros, Madrid, 3ª edición.
10. Armentano, R. Fischer, E. (2008) Biomecánica arterial: Un enfoque desde la Ingeniería Biomédica. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-05-4818-8

## 6.2 Complementaria

11. Keener, J., Sneyd J. (2009) *Mathematical Physiology*. Springer, 2ª edición, vol. 1-2.
12. Cobelli C., Carson E. (2008) *Introduction to Modeling in Physiology and Medicine*. Elsevier, 2ª edición.
13. Klee H., Allen R. (2018) *Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Estados Unidos, segunda edición.
14. Armentano, R. Fischer, E., Cymberknop L. J. (2019) *Biomechanical Modeling of the Cardiovascular System*. IOP Publishing.
15. Irving P. H. (2018) *Physics of the Human Body*. Springer-Verlag GmbH.
16. Eugene M. I. (2006) *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*. The MIT Press.
17. Anwaruddin S., Martin J. M., Stephens J. C., Askari A. T. (2011) *Cardiovascular Hemodynamics: An Introductory Guide*. Springer Science+Business Media.
18. West B. J. (2010) *Fractal Physiology and the Fractional Calculus: A Perspective*. Published online DOI: 10.3389/fphys.2010.00012
19. West J. B. (2000) *Respiratory Physiology: The Essentials*. Lippincott Williams & Wilkins.
20. West B. J. (2013) *Fractal Physiology and Chaos in Medicine*. World Scientific Publishing.
21. Zamir M. (2016) *Hemodynamics*. Springer-Verlag GmbH.
22. Burton, A. C. (1965). *Physiology and Biophysics of the Circulation*. Academic Medicine, 40(8), xxx-xxxvi.
23. Marieb E. N. (2008) *Anatomía y Fisiología Humana*. Pearson Educación, S. A.
24. Herman I. P. (2016) *Physics of the Human Body*. Springer-Verlag GmbH.
25. Armentano, R. Fischer, E. (2016) *Biomecánica y Modelización en Mecanobiología*. Eudeba.
26. Najarian, K., & Splinter, R. (2012). *Biomedical signal and image processing*. Taylor & Francis.
27. Hamrell, B. B. (2018). *Cardiovascular physiology: a text and e-resource for*





- active learning*. CRC Press.
28. Mohrman D. E., Heller L. J. (2018) *Cardiovascular Physiology*. McGraw-Hill Education / Medical.
  29. Anwaruddin, S., Martin, J. M., Stephens, J. C., & Askari, A. T. (Eds.). (2012). *Cardiovascular hemodynamics: an introductory guide*. Springer Science & Business Media.
  30. Wells, F. (2014). *The Heart of Leonardo: Foreword by HRH Prince Charles, the Prince of Wales*. Springer Science & Business Media.
  31. Bassingthwaite, J. B., Liebovitch, L. S., & West, B. J. (2013). *Fractal physiology*. Springer.
  32. Johnson, A. T. (2007). *Biomechanics and exercise physiology: quantitative modeling*. CRC Press.
  33. Feher, J. J. (2017). *Quantitative human physiology: an introduction*. Academic press.
  34. Karris, S. T. (2006). *Introduction to Simulink with engineering applications*. Orchard Publications.
  35. Levick, J. R. (2010). *Cardiovascular physiology*. Arnold Publ.
  36. West J. B., Luks A. (2016) *West's Respiratory Physiology: The Essentials*. John B. West, Andrew M. Luks. ISBN : 9781496310118
  37. Khoo, M. C. (Ed.). (2007). *Bioengineering approaches to pulmonary physiology and medicine*. Springer Science & Business Media.
  38. Safar, M. E., O'Rourke, M. F., & Frohlich, E. D. (Eds.). (2014). *Blood pressure and arterial wall mechanics in cardiovascular diseases* (pp. 175-191). London: Springer.
  39. Peate, I., & Nair, M. (2012). *Anatomía y fisiología para enfermeras*. Editorial El Manual Moderno.
  40. Burton, R. F. (2000). *Physiology by numbers: An encouragement to quantitative thinking*. Cambridge University Press.
  41. Valentinuzzi, M. E. (2004). *Understanding the human machine: a primer for bioengineering* (Vol. 4). World Scientific.
  42. Nicolaas Westerhof, Nikolaos Stergiopoulos, Mark I.M. Noble (2010) *Snapshots of Hemodynamics*. Springer.
  43. Tranquillo, J. V. (2008). *Quantitative neurophysiology* (Vol. 21). Morgan & Claypool Publishers.
  44. Widmaier E. P. (2003) *Vander, Sherman, Luciano's Human Physiology: The Mechanisms of Body Function*. McGraw-Hill (Tx).
-



*active learning*. CRC Press.

28. Mohrman D. E., Heller L. J. (2018) *Cardiovascular Physiology*. McGraw-Hill Education / Medical.
29. Anwaruddin, S., Martin, J. M., Stephens, J. C., & Askari, A. T. (Eds.). (2012). *Cardiovascular hemodynamics: an introductory guide*. Springer Science & Business Media.
30. Wells, F. (2014). *The Heart of Leonardo: Foreword by HRH Prince Charles, the Prince of Wales*. Springer Science & Business Media.
31. Bassingthwaighte, J. B., Liebovitch, L. S., & West, B. J. (2013). *Fractal physiology*. Springer.
32. Johnson, A. T. (2007). *Biomechanics and exercise physiology: quantitative modeling*. CRC Press.
33. Feher, J. J. (2017). *Quantitative human physiology: an introduction*. Academic press.
34. Karris, S. T. (2006). *Introduction to Simulink with engineering applications*. Orchard Publications.
35. Levick, J. R. (2010). *Cardiovascular physiology*. Arnold Publ.
36. West J. B., Luks A. (2016) *West's Respiratory Physiology: The Essentials*. John B. West, Andrew M. Luks. ISBN : 9781496310118
37. Khoo, M. C. (Ed.). (2007). *Bioengineering approaches to pulmonary physiology and medicine*. Springer Science & Business Media.
38. Safar, M. E., O'Rourke, M. F., & Frohlich, E. D. (Eds.). (2014). *Blood pressure and arterial wall mechanics in cardiovascular diseases* (pp. 175-191). London: Springer.
39. Peate, I., & Nair, M. (2012). *Anatomía y fisiología para enfermeras*. Editorial El Manual Moderno.
40. Burton, R. F. (2000). *Physiology by numbers: An encouragement to quantitative thinking*. Cambridge University Press.
41. Valentinuzzi, M. E. (2004). *Understanding the human machine: a primer for bioengineering* (Vol. 4). World Scientific.
42. Nicolaas Westerhof, Nikolaos Stergiopoulos, Mark I.M. Noble (2010) *Snapshots of Hemodynamics*. Springer.
43. Tranquillo, J. V. (2008). *Quantitative neurophysiology* (Vol. 21). Morgan & Claypool Publishers.
44. Widmaier E. P. (2003) *Vander, Sherman, Luciano's Human Physiology: The Mechanisms of Body Function*. Mcgraw-Hill (Tx).
45. van Meurs W. (2011) *Modeling and Simulation in Biomedical Engineering: Applications in Cardiorespiratory Physiology*. McGraw Hill Education.





FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

### **Cursos de interés**

1. Quantitative Physiology del MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Department of Electrical Engineering, Department of Mechanical Engineering. <https://ocw.mit.edu/courses/hst-542j-quantitative-physiology-organ-transport-systems-spring-2004/>
2. Physiological Modeling de John Enderle de UCONN BME 3100 <https://nsec.lab.uconn.edu/home/courses-2/bme-3100-physiological-modeling/>

### Trabajos prácticos

- Introducción al análisis de las señales biomédicas, caracterización y procesamiento
  - Se trabaja sobre una señal biológica en específico (señales de presión cardiovascular) y se estudian sus características morfológicas para aprender a seleccionar y adaptar los filtros y transformaciones que forman parte del procesamiento. En particular, el trabajo con señales cuasi-periódicas (de frecuencia fundamental variable) en esta etapa permite implementar distintos detectores de ciclo (uno simple y otro con características adaptativas en frecuencia), separadores de ciclo y promediadores.
  - Parte del desafío de la implementación está en que el alumno tome decisiones individuales de diseño (por ejemplo, qué hacer en los bordes de la señal, cómo definir y fijar parámetros de funciones: umbrales, etc., entre otros) que debe fundamentar, así como reproducir implementaciones de algoritmos a partir de artículos científicos.
  - Deben entregar los scripts utilizados y presentar sus resultados de forma oral, poniendo especial énfasis en la comparación de detectores y compartiendo su propio análisis.
- Análisis de señales cardíacas
  - Se estudia a partir de señales cardíacas el funcionamiento de la bomba. Se parte del procesamiento realizado en el práctico anterior para dar pie al estudio de algunos parámetros cardíacos simples (valores sistólicos y diastólicos de presión y volumen, período, frecuencia, volumen eyectado, volumen minuto). Luego, se incursiona en el estudio de las propiedades termodinámicas del corazón a partir de diagramas PV, evaluando las funciones de elastancia y compliancia, conceptos de elastancia de fin de sístole, elastancia arterial, precarga, poscarga y acoplamiento ventrículo arterial.
  - Se espera que los alumnos sean capaces de elaborar un informe recopilando sus resultados (eligiendo qué mostrar y cómo mostrarlo) y análisis, con un fuerte énfasis en la implicación fisiológica de lo expuesto.
- Análisis de señales hemodinámicas
  - Durante este práctico el estudiante deberá contestar preguntas de un cuestionario, orientadas a guiar su entendimiento de la caracterización del sistema arterial como red eléctrica. En el mismo se le pedirá explicar la significancia fisiológica de varios parámetros, así como identificar su efecto sobre la red (principalmente su rol en la simulación de estados patológicos).
  - Adicionalmente deberá entregar un informe donde se simule de una arteria aorta; desde la determinación de las constantes circuitales de la misma a partir de datos biológicos dados, la evaluación del ajuste, la mejora de la red a partir de la ampliación de sus elementos, así como su comportamiento en frecuencia. Cada etapa deberá estar fundamentada y discutida, esperando que realice asociaciones entre los conocimientos físicos y biológicos adquiridos en el teórico.
  -





- **Análisis de la variabilidad cardiovascular**
  - Se trabajará sobre las simulaciones de variabilidad cardiovascular realizadas en un artículo científico para explicar y entender de manera simplificada los mecanismos de regulación de frecuencia cardíaca, volumen minuto y presión arterial media, mediante barorreflejos. Los estudiantes deberán simular las respuestas del sistema para condiciones variables de respuesta del barorreflejo y contestar un cuestionario al respecto.
- **Análisis de las señales respiratorias: aplicación a la ventilación pulmonar**
  - El estudiante deberá simular las condiciones de presión, flujo y volumen pulmonares durante el proceso de ventilación. El desafío estará en implementar la simulación a partir de un equivalente eléctrico, variando las constantes resistivas y capacitivas adecuadas a modo de reproducir la ocurrencia de patologías obstructivas y restrictivas. Se le tomará un cuestionario sobre los resultados obtenidos, esperando un análisis crítico de sus hallazgos y fallos.
- **Análisis de la biomecánica de tejidos blandos**
  - Se contará con una instancia de laboratorio presencial donde podrán conocer el funcionamiento de un Sistema Biodinámico de Electrofuerza. Se les pedirá extraer datos de varios tubos sintéticos calibrados y no calibrados, con posibilidad de trabajo sobre material biológico. Posteriormente se discutirá el análisis de las propiedades elásticas del material mediante un abordaje dinámico, trabajando sobre modelos mecánicos simples (por ejemplo, modelo de Voigt).
  - Adicionalmente, deberán procesar datos de presión y diámetro animales y reproducir el análisis realizado en clase, pero ahora desde un abordaje frecuencial. Deberán simular el comportamiento del tubo arterial y compararlo con la realidad.
  - La evaluación se complementa con la realización de un cuestionario que cubra los conceptos dados, así como las tareas pedidas.
- **Caracterización del funcionamiento de una nefrona. Concentración de orina.**
  - Se espera que el estudiante sea capaz de realizar una descripción del planteo que realiza el modelo Multiplicación a contracorriente y el Modelo central, así como detallar cuáles son los supuestos para cada uno de ellos y sobre qué pilares se basan. Además, se espera que elaboren un análisis comparativo entre ambos modelos.
  - Deberán contestar un cuestionario al respecto, y adjuntar sus resultados y análisis.
- **Caracterización del potencial de acción**
  - Se trabajará con el modelo de disparo neuronal dado por Hodgkin y Huxley. El estudiante será provisto de un script que contiene una implementación parcial del modelo mediante la utilización de métodos de Runge Kutta. Se espera que sea capaz de estudiar las ecuaciones del modelo, comprenderlas y completar la implementación. Adicionalmente, deberá explorar la característica frecuencial del comportamiento subumbral, así como las características de memoria del modelo (curva I-f, para disparos frente a



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

estímulos continuos) y su respuesta frente a estímulos crecientes (curvas I-t).

- Se espera que el estudiante entregue el código con la implementación completa, los resultados obtenidos, así como un análisis exhaustivo de éstos. La exploración en esta instancia de modelos HH simplificados (vistos en clase) será opcional.

Respecto de la defensa final, en la misma se evaluarán los contenidos teóricos y prácticos vistos en el curso, pudiendo pedirse que se presenten en un tiempo limitado algunos de los trabajos realizados, así como que se desarrollen conocimientos teóricos aprendidos en el curso. Se valorará positivamente que el alumno:

- Responda con pertinencia a las preguntas que se formulen.
- Muestre que es capaz de establecer vínculos dentro y fuera de la enseñanza evaluada, de aportar una visión personal, de desarrollar su espíritu crítico, de sorprender por su creatividad.
- Exponga de manera coherente, sintética y proporcionada, organizando bien el tiempo entre sus diferentes partes.
- Demuestre que ha entendido la materia de la enseñanza y se la ha apropiado.
- Emplee un registro de lengua formal y adecuado a la ocasión.

En cambio, se valorará negativamente:

- La inconexión en el discurso.
- La exposición caótica o sin rumbo.
- La repetición de ideas sin comprender su alcance real, sin apropiación.
- Las ambigüedades.
- El hablar de cosas que no convienen expresamente a lo que se pide.
- Las palabras o frases sin sentido o vacías.
- La mala repartición de tiempo entre teoría y comentario, si es que se da el caso.
- La mala adecuación en el tiempo utilizado



# ¿Qué son las bioseñales?

---

Todos los tipos de sistemas biomédicos generan las señales para influir en el cuerpo humano o analizan bioseñales para extraer información útil sobre el funcionamiento del cuerpo humano.

Señal – es el parámetro que es observable desde el objeto.

Bioseñal es una descripción de fenómenos fisiológicos de cualquier naturaleza.

Bio+Señal = "objeto vivo" + "función que lleva información sobre el comportamiento o estado". Las bioseñales son los objetos clave en Biosystems.

# Ingeniería de Bioseñales

---

- Generación de señales (terapia, calibración, control)
- Codificación y compresión (seguridad)
- Transmisión (telemedicina)
- Registro y medición (diagnóstico)
- Procesamiento (filtración)
- Transformación (muestreo, representaciones en otros espacios)
- Definición de los parámetros (extracción de características)
- Análisis (extracción de información)



# Analisis y tratamiento de Bioseñales

---

- **Conectividad e influencia (entre varios procesos)**
- **Predicción (pronóstico de los valores, estados y eventos futuros)**
- **Clasificación (aprendizaje automático)**
- **Control (sistemas de biorretroalimentación)**
- **Visualización (señales, resultados de análisis)**
- **Almacenamiento (bases de datos, almacenamientos en la nube, etc.)**

# ¿Por qué estudiar bioseñales?

---

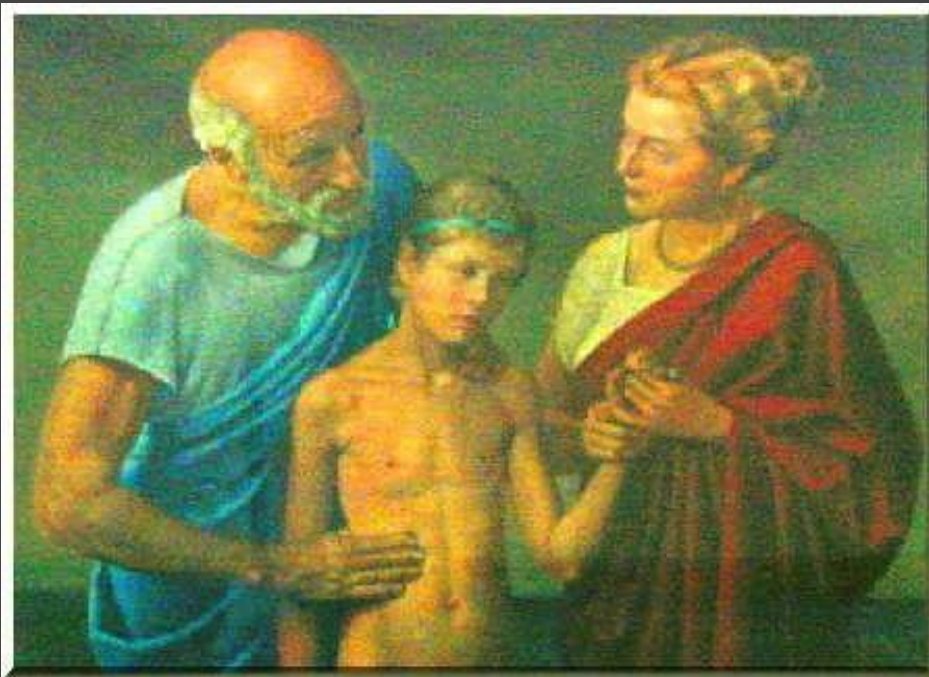
La bioseñal lleva toda la información sobre el objeto vivo. Analizamos las señales que provienen del cuerpo (ECG, EEG, etc.) o están conectadas al cuerpo (imágenes de rayos X, imágenes ultrasónicas).

La bioseñal se puede utilizar para comprender los mecanismos fisiológicos subyacentes de un evento o sistema biológico específico.



# Bioseñales a través de los siglos

---



Hipócrates palpando a un paciente joven (500 aC)



UCI en un hospital moderno (2020 dC)

# Clasificación de bioseñales

---

Según el origen físico de las bioseñales

- Eléctrico
- Magnético
- Químico
- Mecánico (acústico)
- Óptico
- Térmico
-



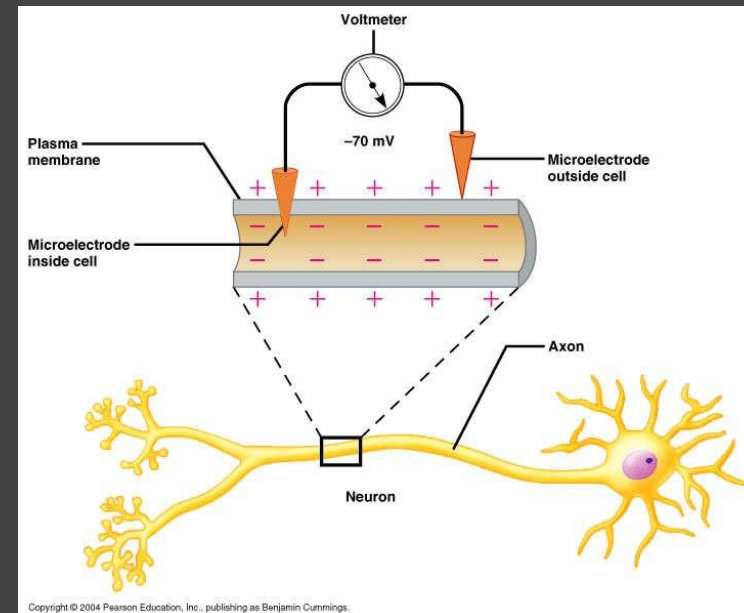
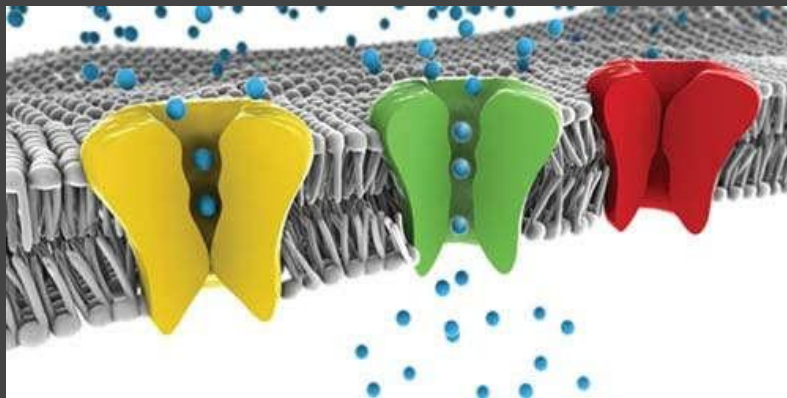
# Clasificación de bioseñales

Según el sistema fisiológico de origen de las bioseñales

- Sistema endocrino
- Sistema nervioso (central y periférico)
- Sistema cardiovascular
- Sistema de visión
- Sistema auditivo
- Sistema musculoesquelético
- Sistema respiratorio
- Sistema gastrointestinal
- Sistema sanguíneo

# Señales eléctricas

El campo eléctrico se genera en las células (nervios y músculos) y órganos debido a las corrientes iónicas intra y extracelulares. Son el resultado de procesos electroquímicos en los canales iónicos individuales.



# Tipos de señales eléctricas

---

*Células neuronales*

*ENG – electroneurograma EEG – electroencefalograma ERG –  
electrorretinograma*

*Células musculares*

*ECG – electrocardiograma EMG – electromiograma Otras  
células*

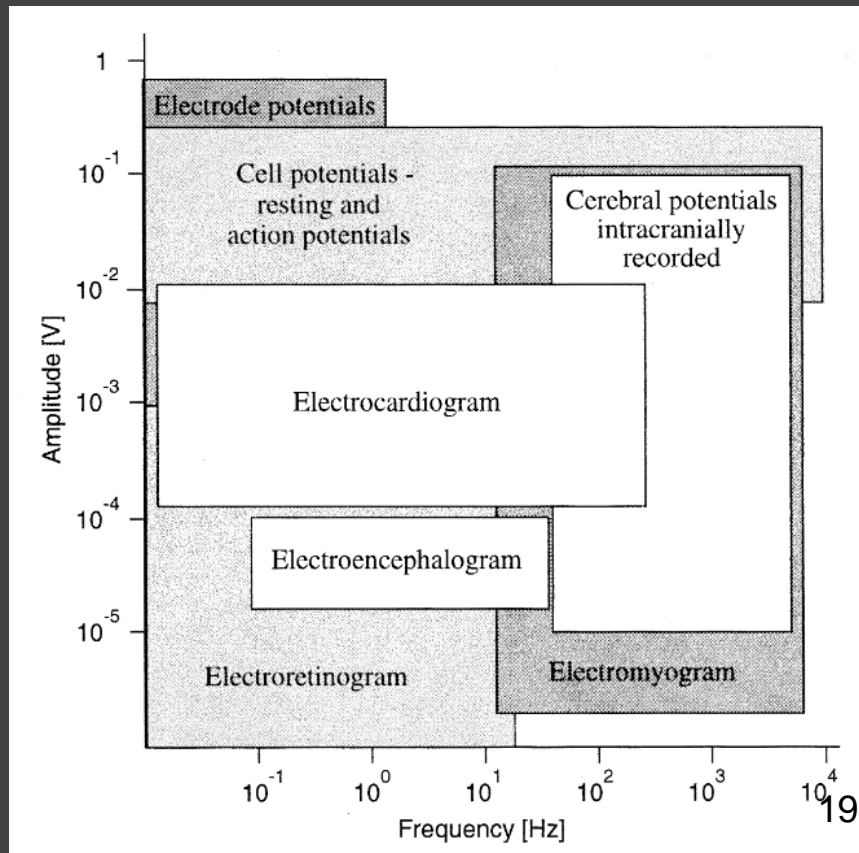
*EOG – electrooculograma*

*GSR – respuesta galvánica de la piel*



# Señales bioeléctricas

Amplitud y rangos espectrales de señales bioeléctricas



# Señales bio-magnéticas

---

Los campos magnéticos débiles son generados por diferentes órganos y células.

Células neuronales

MNG – magnetoneurograma

MEG – magnetoencefalograma

Células musculares

MCG – magnetocardiograma

MMG – magnetomiografía

# Bioseñales mecánicas

---

Las señales biomecánicas reflejan las funciones mecánicas de las partes del cuerpo

Ejemplos:

Presión sanguínea

Señales del acelerómetro que describen los movimientos humanos, la marcha, el equilibrio y la postura (enfermedad de Parkinson, aplicaciones móviles, fitness)

Movimientos torácicos durante la respiración

Características del flujo de aire durante MLV



# Bioseñales acústicas

---

Subconjunto de señales mecánicas que describen el sonido acústico producido por el cuerpo (vibraciones y movimientos). Las señales bioacústicas dan acceso a diversos sonidos corporales:

Sonidos cardíacos (fonocardiografía)

Ronquidos (apnea obstructiva del sueño)

Deglución

Ruidos respiratorios

Crepitaciones de articulaciones y músculos

A menudo se mide en la piel utilizando transductores acústicos como micrófonos y acelerómetros.

# Resumen

Las bioseñales son la única fuente de información que describe el funcionamiento del cuerpo humano en condiciones saludables y de enfermedad.

Las bioseñales son de diversa naturaleza y origen.

Muchas bioseñales pueden contener información sobre el mismo órgano o sistema.

**Los ingenieros biomedicos se ocupan de  
Medición,  
procesamiento,  
análisis,  
interpretación**