



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN**

**CARACTERIZACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES  
ELETROCARDIOGRÁFICOS EN RATA WISTAR MEDIANTE  
TÉCNICAS DE LA DINÁMICA NO LINEAL**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
QUÍMICA FARMACÉUTICA BIÓLOGA**

**PRESENTA:**

**JUANA JASSO HUERTA**

**ASESOR: M. en C. SOLEDAD CARRETO GARCÍA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Caracterización de datos experimentales electrocardiográficos en rata Wistar mediante técnicas de la dinámica no lineal.

Que presenta la pasante: Juana Jasso Huerta

Con número de cuenta: 098549131 para obtener el Título de la carrera: Química Farmacéutico Biológica

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 03 de Septiembre de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en C. Soledad Carreto García	
VOCAL	Dra. Luisa Martínez Aguilar	
SECRETARIO	Q.F.B. Amparo Ramos Aguilar	
1er. SUPLENTE	M. en C. Leticia Zúñiga Gómez	
2do. SUPLENTE	Ing. Mauro Isidoro Romero Acosta	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

IHM/mmgm\*

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias al espíritu creador por la vida que me proporciono, la capacidad de adquirir y asimilar conocimientos y así obtener una licenciatura para servir y apoyar a las personas que así lo requieran.

Doy gracias a mi padre por lo que me dio.

Doy gracias a mi madre por su gran amor, así como el apoyo que me proporciono.

Doy gracias a mis hijas por impulsarme a realizar esta licenciatura.

Doy gracias a Mario Tagle Becerril por el gran interés que mostro durante el trayecto para aprobar la licenciatura.

Doy gracias a Adolfo A. L., que creyó en mí, por todo lo que me enseñó y por todo el sostén que me brindo. (†)

Doy gracias a Salvador Silva C. por sus atinadas observaciones y críticas constructivas.

Doy gracias a la UNAM y a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por el gran legado que me proporcionaron y que llevo cada día.

Doy gracias a todos mis profesores por los conocimientos que me transmitieron,

Doy gracias a la M en C. Soledad Carreto García por el tiempo que le dedico a este trabajo, por sus ánimos, sabios consejos y acertadas enseñanzas.

Le agradezco al profesor José Garduño profundamente por el conocimiento que me transmitió durante sus clases y con su entereza aprendí a derribar barreras.

A mi insustituible y gran amigo Cesar Julio Xicoténcatl Rojas por sus atinados comentarios para la elaboración de este trabajo, le doy mis más sinceros agradecimientos

Doy gracias a todos los compañeros que tuve durante el transcurso de la licenciatura, en especial a C. Julio Rojas X., Sandra Rodríguez Flores, Susana: Vázquez Jiménez así como a Gina María, los cuales me proporcionaron grandes enseñanzas.

Doy gracias a las personas que me conocen y que me apoyan con sus buenos deseos y alentadoras palabras.

A todos los que me faltaron les doy infinitas gracias.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres Benito Jasso D. (†) y Petra Huerta M. (†)

A mis hijas Maritza A. Jasso Y Sandra S. Jasso por el tiempo que no les dedique.

A mis hermanos: Cristina, Miguel, Abundia, R. Javier, M. Guadalupe, Martin, M. de Lourdes, Saúl, Teresa.

A mi asesor M. C. Soledad Carreto García por su guía y paciencia, así como la motivación y confianza que me otorgo.

A Cesar Julio Xicoténcatl Rojas por ser una destellante luz en mi camino.

A Guadalupe Cruz, Lucia y Salvador Silva Cruz por ser un gran estimulante en mi preparación.

# INDICE

	Págs.
1.-INTRODUCCIÓN.....	1
2.-REVOLUCIONES FÍSICAS.....	3
3.-TEORIA DEL CAOS.....	7
3.1-Sistemas dinámicos.....	9
3.2-Clasificación de sistemas dinámicos.....	10
3.3-Geometría y estabilidad de sistemas dinámicos.....	11
4.-ATRACTORES.....	12
4.1-Tipos de atractores.....	12
4.1.1 Atractores clásicos.....	13
4.1.2. Atractor extraño.....	15
4.1.3. Atractor de Lorenz.....	16
5.-FRACTALIDAD.....	17
5.1-Tipos de fractales.....	18
5.1.1. Fractales regulares.....	18
5.1.2. Fractales no regulares.....	19
5.2. La dimensión fractal.....	19
5.3. Algoritmos de escape.....	20
5.4. Funciones iteradas.....	21
5.5. Triángulo de Sierpinski.....	22
5.6 Atractor de Lorentz.....	22
5.7 Fractales aleatorios y celulares.....	23
6.-SISTEMAS BIOLÓGICOS.....	24
6.1- Caos en sistemas biológicos.....	24

6.2- Caos en actividad cardiaca.....	25
7.-SISTEMAS CARDIOVASCULAR.....	26
7.1 Esquema del Corazón.....	27
7.2 Ritmo Cardíaco.....	28
7.3 Circulación Mayor.....	29
7.4 Circulación menor.....	29
7.5 Frecuencia Cardiaca.....	30
7.6 Válvulas Cardiacas.....	31
7.7 Regulación Cardiovascular.....	33
8.-FUNCION DE LA SANGRE.....	34
8.1 Características de la Sangre .....	34
8.2 Fisiología de la Sangre .....	35
9.-ANIMALES DE LABORATORIO.....	35
9.1 Características.....	36
9.2 Fisiología de Rata y Ratón de Laboratorio.....	37
10.- PARTE EXPERIMENTAL.....	38
10.1. Objetivo General.....	39
10.2. Objetivos Particulares.....	39
11.- JUSTIFICACION.....	39
12.- HIPÓTESIS.....	40
13.-MATERIAL, EQUIPO Y METODOS.....	40
14.-RESULTADOS.....	42
15.-ANALISIS DE RESULTADOS.....	46
16.-CONCLUSIONES.....	50
17.-PROYECCIONES.....	51

18.-REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS.....	52
19.-ANEXOS.....	57

## INDICE DE IMÁGENES

Fig.1 Atractor simple híbrido.....	13
Fig. 2 Atractor de punto fijo .....	13
Fig. 3 Atractor de ciclo límite o periódico .....	14
Fig. 4 Atractor de toro límite.....	14
Fig. 5 Atractor extraño.....	16
Fig. 6 Atractor de Lorentz.....	17
Fig. 7 Fractal de glucógeno.....	18
Fig. 8 Fractal en espiral de Mandelbrot.....	21
<i>Fig.9</i> Helecho de Barnsley .....	21
Fig. 10 Lindenmayer y Sierpinski.....	22
Fig. 11. Atractor de Lorentz.....	23
Fig. 12 Atractor de. Difusión y Celular.....	23
Fig. 13 Ritmo periódico normal y Arritmia caótica.....	25
Fig. 14 Esquema de las partes del musculo cardiaco.....	27
Fig.15 Frecuencia de ECG.....	31
Fig. 16 Regulación cardiovascular.....	33
Fig. 17 Elementos figurados de la sangre.....	34
Fig. 18 Diagrama de flujo.....	38
Fig. 19 Caja de acrílico de prueba para rata Wistar.....	38
Fig.20 Evolución del Plot de recurrencia.....	42
Fig. 21 Trayectoria del Atractor extraño.....	43
Fig. 22 Evolución del Plot de recurrencia de Rata Wistar con patología.....	44
Fig.23 Evolución del Diagrama Espacio-Fase de Rata Wistar aparentemente sana del sistema cardiovascular.....	45



## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Características relevantes de la rata y ratón de laboratorio.....37

Tabla. 2 de individuo sin aparente daño cardiaco.....42

Tabla. 3 De parámetros cualitativos y cuantitativos de Recurrencia Visual.....43

Tabla. 4 de individuo con daño cardiaco.....44

Tabla. 5 de parámetros cualitativos y cuantitativos de Recurrencia Visual de rata Wistar que presenta daño cardiaco.....45

## 1.- INTRODUCCIÓN

Desde el principio de las culturas el hombre se ha preguntado acerca de los fenómenos naturales y sus orígenes. En el siglo VI A.c., en Grecia, se inició la búsqueda de las causas racionales que dieran cuenta de toda la realidad. Finalmente, en el siglo IV A.c. Aristóteles reseña todo el conocimiento producido hasta el momento, en donde la física y demás ciencias ganaron un gran impulso en la antigüedad. Sobre las aportaciones del movimiento, caídas de cuerpos pesados (llamados “graves”), de ahí el origen de la “gravedad” y el geocentrismo teoría astronómica sostenida fundamentalmente por Ptolomeo, astrónomo y matemático griego del siglo II, que consideraba a la tierra como centro del universo). La lógica aristotélica dominó los estudios de la física hasta el final de la Edad Media en cuanto a gravedad y geocentrismo[43].

Nicolau Copérnico rompió con más de diez siglos de dominio del geocentrismo, diciendo que la tierra no es el centro del universo. Con esta afirmación se enfrenta a la iglesia católica y hace que la física se vuelva un campo de estudio específico[67].

Para algunos historiadores, la revolución copernicana se consolidó en un siglo después, con los descubrimientos telescópicos, la mecánica de Galileo y las leyes del movimiento de Kepler [15].

En 1687 Newton publicó los principios Matemáticos de la naturaleza, obra que describe la leyes clásicas de la dinámica conocidas como: Leyes de Newton, éstas explican la dinámica de los cuerpos y hace predicciones del movimiento y equilibrio de éstos; y la ley de la gravitación universal de Newton [Pérez A], la cual permite demostrar las leyes de Kepler (de aquí el nombre de gravedad universal). En esta época surgieron los principios básicos de la física, *las leyes de la física son las mismas en cualquier punto del universo*[15].

La palabra caos significa abismo abierto. El estado de completo desorden anterior a la formación del mundo a partir del cual según los mitólogos, se inicia la formación [16]. Hesíodo dice: “Antes de todos los seres estaba el Caos, luego la Tierra de ancho seno” (Teogonía VII 6). Aristóteles combatió esta noción (fis., IV 208b 33ss) ya que admitía la eternidad del mundo. Kant se sirvió de ésta para indicar el estado originario de la materia, del que más tarde se originaron los mundos

En Física y Matemáticas, el comportamiento de sistemas dinámicos es gobernado por leyes determinísticas, el cual es aparentemente azaroso o impredecible. Un término más preciso “Caos Determinístico”, sugiere una paradoja debido a que conecta dos nociones que son familiares y que comúnmente se consideran incompatibles. [48]

La primera es el azar, o impredecible, como el caso de la trayectoria de una molécula en un gas o en la elección de un individuo de una población. En el análisis convencional, el azar fue considerado más aparente que real. Se creía que el mundo era impredecible porque a su vez es complicado. La segunda noción es la de movimiento determinístico, como un péndulo o un planeta, que ha sido aceptada desde el tiempo de Sir Isaac Newton como ejemplo del éxito predictivo de la ciencia, sobre aquello que inicialmente es complejo.[70]

En Mecánica Clásica es el comportamiento de un sistema dinámico que puede describirse geométricamente como el movimiento sobre un “atractor”. [3]

Efectivamente las matemáticas de la Mecánica Clásica reconocen tres tipos de atractores: atractor de punto fijo (que caracteriza estados estacionarios), atractor de ciclo límite (ciclos periódicos) y toros (combinaciones de varios ciclos). En la década de los 60's el matemático americano Stephen Smale descubrió una nueva clase de atractores, a los cuales llamó “atractores extraños” [2].

En 1986, en una prestigiosa conferencia internacional sobre Caos celebrada en la Real Sociedad de Londres se dio una definición más concreta del término

“Comportamiento estocástico” que ocurre en un sistema determinístico. Estocástico significa aleatorio y determinístico es un término introducido por Pierre Laplace, que en dinámica se refiere a las leyes inmutables y precisas que sigue un sistema dinámico [56].

Una gran cantidad de fenómenos como los sistemas biológicos, la bolsa de valores, el cambio climático entre otros, se pueden describir mediante las técnicas de la dinámica no lineal y otras relacionadas como el VRA que son muy complejas y difíciles. Las técnicas de la dinámica no-lineal y otras relacionadas, permiten una aproximación a la caracterización de estos fenómenos, en especial para la anticipación de la posibilidad de su modelado y predicción [4].

La obtención de las series de tiempo que son no-lineales se estudian con las técnicas de la dinámica no lineal como: 1) probabilidad de Distribución, 2) diagramas de espacio de fase y 3) Exponente de Hurst. La obtención de estos parámetros se puede caracterizar y predecir si hay algún daño en el sistema biológico de estudio [26].

## **2.-REVOLUCIONES FÍSICAS**

A través del tiempo las personas han buscado comprender el porqué de la naturaleza y los fenómenos que en ella se observan: los fenómenos climáticos, el movimiento de los astros, las propiedades de los materiales, el paso de las estaciones, reacciones químicas, sistemas biológicos, entre otros. Las primeras explicaciones aparecieron en la antigüedad y se fundamenta en consideraciones puramente filosóficas, sin verificación experimental [1].

Fue en la Grecia antigua donde se realizaron los primeros estudios “científicos” sobre los fenómenos de la naturaleza. Es así como surgen los “filósofos naturales” interesados en racionalizar el mundo sin recurrir a la intervención divina; por lo cual la física se desarrolló en función de la necesidad del hombre de conocer el mundo

y lo que lo rodea para controlar y reproducir las fuerzas de la naturaleza en su beneficio [1].

En Grecia en el siglo V a DE Leucipo T. de Mileto expresó las primeras hipótesis sobre los componentes esenciales de la materia. Nicolau Copérnico rompió con más de diez siglos de dominio del geocentrismo formulando “La revolución copernicana” más tarde, con los descubrimientos del telescopio y la mecánica de Galileo. Newton publicó los principios Matemáticos de la Naturaleza, una obra que describe las leyes clásicas de la dinámica conocidas como: Leyes de Newton y la ley de la gravitación universal de Newton [55].

En 1687 Newton publicó los principios Matemáticos de la Naturaleza, una obra que describe las leyes clásicas de la dinámica conocidas como: Leyes de Newton y la ley de la gravitación universal de Newton .El primer grupo de leyes explica la dinámica de los cuerpos y hacer predicciones del movimiento y equilibrio de cuerpos, la segunda ley permite demostrar las leyes de Kepler del movimiento de los planetas y explicar la gravedad terrestre (de aquí el nombre de gravedad universal). En esta época surgieron los principios básicos de la física, *las leyes de la física son las mismas en cualquier punto del Universo*. El desarrollo por Newton y Leibniz del cálculo matemático proporcionó las herramientas matemáticas para el desarrollo de la física como ciencia capaz de realizar predicciones. En esta época Robert Hooke y Cristian Hayense estudiaron las propiedades básicas de la materia y de la luz [3].

En el siglo XVI nacieron algunos personajes como Copérnico, Stevin, Cardano, Gilbert, Brahe. A principios del siglo XVII Galileo impulsó el empleo sistemático de la verificación experimental y la formulación matemática de las leyes físicas [63].

Galileo descubrió la Ley de la caída de los cuerpos y del péndulo, se le considera como el creador de la mecánica y las bases de la hidrodinámica, la cual continuo su discípulo Torricelli que fue el inventor del barómetro, instrumento que utilizó Pascal para determinar la presión atmosférica. Pascal precisó el concepto de presión en el seno de un líquido y enunció el teorema de transmisión de las

presiones. Boyle formuló la Ley de la compresión de los gases (ley de Boyle-Mariotte) [21].

En óptica, Renato (René) Descartes estableció la ley de la refracción de la luz. Fermat enunció el principio de la óptica geométrica.[57]

A partir del siglo XVIII Boyle y Young desarrollaron la termodinámica. En 1733 Bernoulli uso argumentos estadísticos, junto con la mecánica clásica, para extraer resultados de la termodinámica, iniciando la mecánica estadística. En 1847 Joule formuló la ley de conservación de energía [3]

Aunque las leyes básicas de la óptica geométrica habían sido descubiertas algunas décadas antes, en siglo XVIII se dieron grandes avances, por primera vez se midió la velocidad de la luz y se descubrió la naturaleza espectral de la luz. El siglo concluyó con el experimento de Young de 1801 en el que se ponía de manifiesto la interferencia de la luz demostrando la naturaleza ondulatoria de ésta [21].

A finales del siglo XVIII la física comienza a influir en el desarrollo tecnológico accediendo a un avance más rápido de la propia física. En la primera mitad del siglo XIX estuvo dominada por el estudio de los fenómenos de la electricidad y el magnetismo. Coulomb, Luigi Galvani, Faraday, Ohm y otros físicos estudiaron los fenómenos dispares y contra intuitivos que se asocian a este campo. En 1855 Maxwell unificó las leyes conocidas sobre el comportamiento de la electricidad y en la primera mitad del siglo XIX estuvo dominada por el estudio de los fenómenos de la electricidad y el magnetismo en una sola teoría con un marco común mostrando la naturaleza unida del electromagnetismo. Con las cuatro ecuaciones de Maxwell se pudo predecir y explicar todos los fenómenos electromagnéticos clásicos [21].

En 1895 Roentgen descubrió los rayos X, ondas electromagnéticas de frecuencias muy altas. En 1896 Henri Becquerel descubría la radioactividad. Posteriormente con los trabajos de Pierre Curie, Marie Curie y muchos otros, este campo se desarrolló rápidamente, dando inicio a la física nuclear e inicio de la estructura microscópica de la materia. En 1897 Thompson descubrió el electrón [21].

Thompson descubrió el electrón dando inicio a la física nuclear y en el siglo XX se producen dos revoluciones, el desarrollo de la teoría de la relatividad y el inicio de la mecánica cuántica con Planck, Einstein, Bohr y otros. La física cuántica surge en el siglo XX y rompió con todos los paradigmas de la física que habían prevalecido hasta ese entonces, resolviendo ciertas apariencias engañosas a partir de probabilidades sobre el comportamiento de los átomos de la materia. La cual explica satisfactoriamente los fenómenos a una escala atómica en términos probabilísticos, surgiendo así la teoría del caos [51].

Ilya Prigogine nació en Moscú en 1917, en 1977 recibió el premio nobel de química gracias a su teoría de las estructuras disipativas, así mismo llamado padre de la teoría del Caos gracias a su óptica que en el ser humano como en los movimientos brownianos la simetría deja de existir por la complejidad a causa de sus actos que producen tantas variables negando seguir la línea del tiempo hacia atrás con exactitud que Prigogine consideró como la irreversibilidad del tiempo considerando que esta separación fuese la promotora del olvido del hombre de la ley natural; sólo considerando a los fenómenos simples como modelos del universo. Él consideró que sujeto y objeto constituyen un sistema único en el que todas las partes forman un todo de tipo orgánico por lo que toda fluctuación posee consecuencias que se propagan a través de todo el sistema. El año 2005 ha sido proclamado año internacional de la Física. Uno de los desarrollos más espectaculares de esta ciencia durante el siglo XX ha sido la Física Cuántica que, aunque poco intuitiva al principio, es hoy parte fundamental de la vida a través de numerosas aplicaciones que van desde las células fotoeléctricas que controlan las puertas de entrada de los ascensores y garajes, hasta la generación de energía en las centrales nucleares. En esta contribución, se esbozan los hitos más importantes del desarrollo de la Física Cuántica desde su nacimiento hasta nuestros días [1].

A comienzos del siglo XXI la física sigue enfrentándose a grandes retos, tanto de carácter práctico o teórico. La física teórica continúa sus intentos de encontrar una teoría capaz de unificar todas las fuerzas en un único formulismo en lo que sería una teoría del todo. En la física actual, lo que puede decirse de un electrón es que

es un punto-partícula basado en las leyes mecánico cuántica. La imagen clásica de un punto-partícula hay que cambiarla debido a la incertidumbre cuántica. El electrón es un pequeño lazo que vibra y se somete a la incertidumbre cuántica [36].

### **3. TEORÍA DEL CAOS**

En años recientes, parte de la comunidad científica en todo el mundo ha comenzado a hablar incesantemente de *caos*, *desorden*, *aperiodicidad*, para explicar muchos fenómenos que se suceden en la naturaleza y en experimentos controlados de laboratorio, que se caracterizan por tener un comportamiento que no puede ser descrito por leyes matemáticas sencillas. Más extraño aún es el hecho de que este tipo de caos emerge de fenómenos cuya evolución es inicialmente determinista. Contrariamente a lo que podría esperarse, al aumentar la cantidad de información disponible no se evita la imposibilidad de conocer la progresión futura del sistema. Dicha evolución queda determinada por su pasado y una de las propiedades peculiares del caos es que la mínima incertidumbre en la definición de las condiciones iniciales se amplifica exponencialmente, alcanzando proporciones macroscópicas que impiden conocer lo que sucederá a largo plazo [48].

La teoría del caos por lo tanto es la denominación popular de la rama de las matemáticas, la física y otras ciencias que tratan ciertos tipos de sistemas dinámicos muy sensibles a las variaciones en las condiciones iniciales. Pequeñas variaciones en dichas condiciones iniciales pueden implicar grandes diferencias en el comportamiento futuro; complicando la predicción a largo plazo. Esto sucede aunque estos sistemas son en rigor determinísticos, es decir; su comportamiento puede ser completamente determinado conociendo sus condiciones iniciales [31].

Es por ello que estos modelos teóricos intentan explicar el comportamiento de sistemas dinámicos deterministas, tanto físicos, matemáticos y gran parte de los fenómenos naturales, entre los que encontramos el movimiento de las partículas de los fluidos y la homeostasis de sistemas biológicos entre otros [31].



Un ejemplo de estos modelos son las reacciones catalíticas que se llevan a cabo en un reactor industrial que se presentan, bajo ciertas condiciones dinámicas complejas, imaginemos que el reactor catalítico es nuestro cuerpo. Por lo general, la composición química del organismo humano se mantiene constante, y si bien uno renueva constantemente sus estructuras, las reacciones que se producen en su seno son necesariamente alimentadas por sustancias que la persona toma del exterior. Estas sustancias son el oxígeno y los alimentos. En condiciones extremas, los alimentos en presencia del oxígeno se queman para dar productos termodinámicamente estables, como el bióxido de carbono y el agua. Pero en el cuerpo reaccionan a la temperatura ambiente con el oxígeno en presencia de catalizadores muy eficientes: las enzimas. Por acción de ellas los animales, por ejemplo, transforman el oxígeno y la mayoría de los alimentos en gas carbónico y agua, pero este paso se acompaña de otro en el cual parte de las sustancias se convierten en los materiales de los cuales están constituidos los seres, que no son el producto final que dicta la termodinámica del proceso. Obviamente estas últimas (llamados productos meta estables), se convertirán en los productos más estables, lo cual permitirá la producción de trabajo o simplemente de calor. Si todas las reacciones que conducen al equilibrio termodinámico están acompañadas de un aumento de la entropía del sistema, es decir, de una degradación del orden que le caracteriza, podría parecer contradictorio el hecho de que se generen estructuras tan ordenadas como las que poseen los seres vivientes. Durante mucho tiempo prevaleció la idea de que las reacciones bioquímicas inevitablemente convergían de inmediato a un estado termodinámicamente estacionario y que éste era único. Gracias a los trabajos de Prigogine, mencionados con anterioridad, se demostró que en un sistema abierto que intercambia energía y materia con el medio exterior, en el caso de que los suministros externos sean suficientemente grandes, el sistema puede tender hacia un régimen constante que no es precisamente el del equilibrio. Acaso se trata de un estado estacionario no equilibrado y se relaciona con lo que hoy se conoce como *estructuras disipativas*, es decir, estructuras que se crean y se mantienen gracias a intercambio de energía con el mundo exterior en condiciones de no equilibrio [56].

La teoría del caos, un paradigma multidisciplinar constituye un conjunto de resultados matemáticos, que tienen vida propia, independientemente de que se apliquen o no a fenómenos observados [22].

Edward Lorentz se le considera el padre del caos, fue un meteorólogo del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts), que trató de explicar por qué es tan difícil obtener las previsiones meteorológicas, dando lugar a una revolución científica llamada teoría del caos, El profesor Lorentz fue el primero en reconocer lo que ahora se denomina comportamiento caótico en el modelado matemático de los sistemas meteorológicos. A principios del decenio de 1960, Lorentz se dio cuenta de que las pequeñas diferencias en un sistema dinámico podrían desencadenar enormes y, a menudo, insospechados resultados, esto le llevo a formular lo que se conoce como el efecto mariposa, presentado en 1972 en un artículo titulado: "Previsibilidad: *¿Debe el aleteo de una mariposa en Brasil originar un tornado en Texas?* [22].

Las ideas de Lorentz dieron lugar al comienzo de un nuevo campo de estudio que favoreció no sólo a las matemáticas, sino prácticamente a cada rama de la ciencias - biológicas, físicas y sociales [9].

### **3.1 Sistemas Dinámicos**

Un sistema dinámico es un sistema físico cuyo estado evoluciona con el tiempo. El comportamiento en dicho estado se puede caracterizar determinando los límites del sistema, los elementos y sus relaciones; de esta forma se pueden elaborar modelos que buscan representar la estructura del mismo sistema [1].

Al definir los límites del sistema se hace, en primer lugar, una selección de aquellos componentes que contribuyan a generar los modos de comportamiento, y luego se determina el espacio donde se llevará a cabo el estudio, omitiendo toda clase de aspectos irrelevantes [2].

En cuanto a la elaboración de los modelos, los elementos y sus relaciones, se debe tener en cuenta:

1. Un sistema está formado por un conjunto de elementos en interacción.
2. El comportamiento del sistema se puede mostrar a través de diagramas causales.
3. Hay varios tipos de variables: variables exógenas (son aquellas que afectan al sistema sin que éste las provoque) y las variables endógenas (afectan al sistema pero éste sí las provoca) [30].

### 3.2 Clasificación de Sistemas Dinámicos

Discretos y continuos [2].

Los sistemas dinámicos pueden dividirse en dos grandes grupos: aquellos en los que el tiempo varía continuamente y aquellos que transcurre lentamente. Los sistemas de tiempo continuo. Se expresan con ecuaciones diferenciales: éstas pueden ser ecuaciones diferenciales ordinarias, ecuaciones diferenciales en derivadas parciales [44].

#### **Autónomos y No Autónomos [2 ]**

Un sistema dinámico es **autónomo** si está representado por una ecuación diferencial ordinaria o no forzada de la forma

$$\dot{X}=F(x)..... (1)$$

Mientras que si al sistema dinámico lo modela la ODA **no-autónoma** o forzada

$$\dot{X}=F(x, t)..... (2)$$

El sistema dinámico es no autónomo. La diferencia la ecuación 1 y 2 radica en que la primera no contiene ningún estímulo externo al sistema dependiente. [ 30 ] si no conozco lo elimino.

## Lineales y No Lineales

Un sistema dinámico es lineal si cumple

$$X=F (a x + b x) = a F (x) + b F (y)..... (3)$$

Es decir, es lineal si la función F que relaciona la tasa de incremento de las variables de estado con sus valores cumple con el principio de superposición.

Los sistemas lineales son sencillos de analizar y trabajar. Existen técnicas ampliamente usadas para analizar estos sistemas como son la transformada de Laplace, el principio de superposición, la transformada de Fourier, entre otros.

Si la ecuación (3) falla en un sistema se dice que la ecuación es no lineal; el hecho de ser no lineal hace que su análisis sea más complejo. En la mayoría de los ocasiones no se podrán encontrar soluciones analíticas exactas a los problemas no lineales, por lo cual la representación de la dinámica del sistema se auxilia de técnicas geométricas de visualización y análisis [2].

### 3.3.-Geometría y Estabilidad de los Sistemas Dinámicos

La forma de visualizar el comportamiento de estado de un sistema puede ser en forma de serie de tiempo (gráfica de una variable de estado contra tiempo), o en forma de espacio fase. El espacio fase de un sistema  $n$ - dimensional  $\dot{x} = F(x)$  es el espacio donde todos los posibles estados de un sistema son representados, cada parámetro del sistema se representa como un eje de un espacio multidimensional y cada punto del espacio representa un posible estado de las variables de sistema. En este tipo de representación el tiempo se vuelve un parámetro implícito. El espacio fase está descrito por un *campo vectorial* F que rige el recorrido de las variables del sistema  $x(t)$  en el tiempo, el recorrido de estas variables recibe el nombre de *trayectoria*. Se dice que una característica del espacio fase es *estable* o *sumidero* o *atractor* si toda la trayectoria que comienza cerca de ella se aproxima

a ella conforme el tiempo transcurre. Si dicha región atrae a todas las trayectorias del espacio fase, recibe el nombre de *atractor global*. [2]

#### **4.-ATRACTORES**

Los atractores son partes del espacio de fases del sistema dinámico. Hasta los años 60, se creyó que los atractores eran conjuntos geométricos del espacio de fases (puntos, líneas, superficies o volúmenes) y que los conjuntos topológicamente extraños eran frágiles anomalías.

Stephen Smale demostró que su mapa de herradura de caballo era estructuralmente robusta y que su atractor tenía la estructura de un conjunto de Cantor [47].

Por lo cual un atractor es el conjunto al que el sistema evoluciona después de un tiempo suficientemente largo. Para que el conjunto sea un atractor, las trayectorias que le sean suficientemente próximas han de permanecer próximas incluso si son ligeramente perturbadas. Geométricamente, un atractor puede ser un punto, una curva, una variedad o incluso un conjunto complicado de estructura fractal conocido como atractor extraño. La descripción de atractores de sistemas dinámicos caóticos ha sido uno de los grandes logros de la teoría del caos. [47]

La trayectoria del sistema dinámico en el atractor no tiene que satisfacer ninguna propiedad especial excepto la de permanecer en el atractor; puede ser periódica, aperiódica, caótica o de cualquier otro tipo. [47]

##### **4.1-Tipos de atractores**

El punto fijo y el ciclo límite son atractores simples o clásicos. Cuando los conjuntos son complicados de describir, nos encontramos ante un atractor extraño [17].

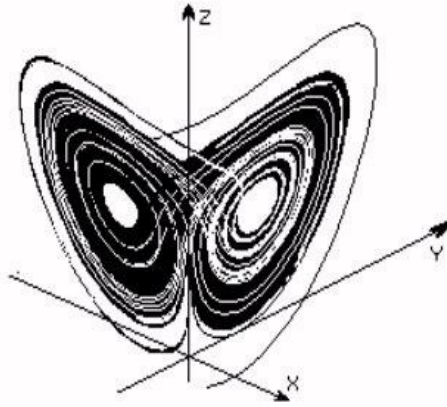


Fig.1 Atractor simple de comportamiento periódico y caótico, que a simple vista se observa una estructura periódica, pero en la evolución se detecta comportamiento híbrido. [17]

#### 4.1.1-Atractores clásicos

En los atractores clásicos, todas las trayectorias convergen en un único punto, es decir, todas las trayectorias terminan en un estado estacionario.

##### **Punto fijo**

Un punto fijo o punto de equilibrio es el punto correspondiente al estado del sistema que permanece constante en el tiempo. Ejemplos: el estado final de una piedra que cae, un péndulo o un vaso con agua.

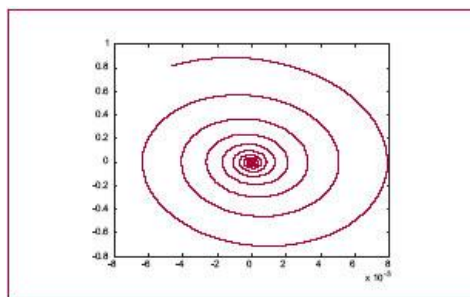


Fig. 2 Atractor de punto fijo su estructura se visualiza un comportamiento periódico [17].

## Ciclo límite

Un ciclo límite es una órbita periódica del sistema que está aislada. Ejemplos: el circuito de sintonía de una radio.

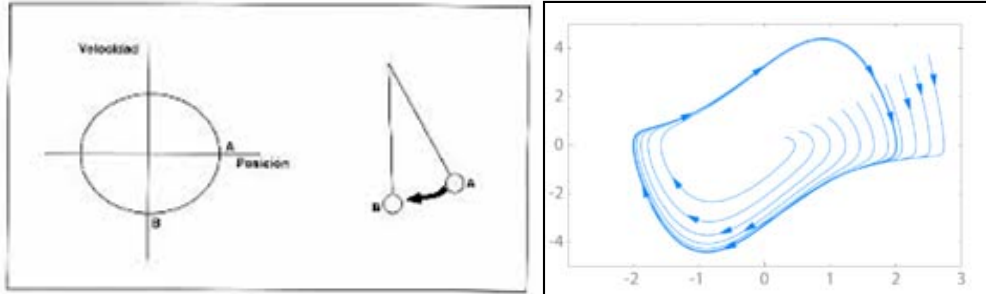


Fig. 3 Atractor de ciclo límite o periódico es una trayectoria cerrada aislada, inherentemente no lineal. [17]

## Toro límite

Una trayectoria periódica de un sistema puede ser gobernada por más de una frecuencia. Si dos de estas frecuencias forman una fracción irracional (es decir, si son inconmensurables), la trayectoria no se cerrará y el ciclo límite se convertirá en un toro o toroide [16].

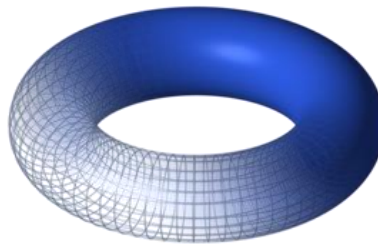


Fig. 4 Atractor de toro límite es un sistema que tiene un comportamiento más complejo que el ciclo límite donde sus movimientos son cuasi periódicos [16].

#### **4.1.2.-Atractor extraño**

Los atractores extraños se creían que eran curvas del espacio fase que describen trayectorias elípticas; pero hoy en día se ha comprobado que cada sistema complejo describe trayectorias no predecibles. Un sistema con estas características es impredecible, conocer su configuración en un momento dado en el cambio de sus condiciones iniciales, de todas formas, el movimiento no es absolutamente aleatorio. En la mayoría de sistemas dinámicos se encuentran elementos que permiten un tipo de movimiento repetitivo y, a veces geométricamente establecido. Los atractores son los encargados de que las variables que inician en un punto de partida mantengan una trayectoria establecida, y lo que no se puede establecer de una manera precisa son las oscilaciones que las variables puedan tener al recorrer las órbitas que lleguen a establecer los atractores. Los atractores extraños pueden llegar a tener una enorme complejidad como, por ejemplo, el modelo tridimensional del sistema climático de Lorentz. El atractor de Lorentz es, quizá, uno de los diagramas de sistemas caóticos más conocidos, no sólo porque fue uno de los primeros, sino también porque es uno de los más complejos y peculiares, pues desenvuelve una forma muy peculiar más bien parecida a las alas de una mariposa [54].

Los atractores extraños están presentes tanto en los sistemas continuos dinámicos como en algunos sistemas discretos. Otros sistemas dinámicos discretos tienen una estructura repelente, de tipo Conjunto de Julia, la cual se forma en el límite entre las cuencas de dos puntos de atracción fijos. Julia puede ser sin embargo un atractor extraño. Ambos, atractores extraños y atractores tipo Conjunto de Julia, tienen típicamente una estructura de fractal [54].

Los atractores extraños tienen dos propiedades difíciles de reconciliar: las trayectorias permanecen confinadas en una región del espacio de fases y el mecanismo básico que subyace bajo esta dinámica es conocido como “stretching and folding” (estiramiento y plegado): en un atractor extraño el flujo típicamente estira los volúmenes y luego los pliega sobre sí mismo siguiendo un tipo de



“aplicación pastelera”. Este proceso genera una dependencia sensible respecto a condiciones iniciales [54].

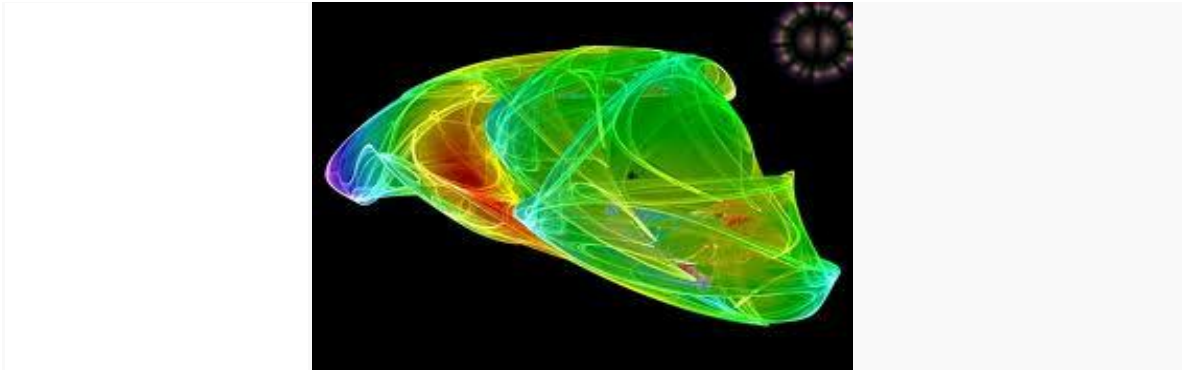


Fig. 5 Atractor extraño tiene dos propiedades difíciles de reconciliar: las trayectorias permanecen confinadas en una región del espacio de fases pero se separan de sus vecinas a velocidad exponencial [54].

#### **4.1.3.-El Atractor de Lorentz**

El primer “investigador” de la Teoría del caos propiamente dicho fue un meteorólogo, Edward Lorentz inicio en la década de los sesentas una serie de investigaciones dirigidas a resolver el problema de la predicción meteorológica. Para ello diseñó un modelo matemático simplificado basado en tres ecuaciones diferenciales bien conocidas en el ámbito de la física de fluidos: Modelo simplificado de Lorentz: [52]

$$dx/dt = \delta \cdot (y - x)$$

$$dy/dt = r \cdot x - y - x \cdot z$$

$$dz/dt = x \cdot y - b \cdot z$$

La representación en un espacio tridimensional de los valores que las variables  $x$ ,  $y$ ,  $z$  adoptan con el tiempo a partir de unos valores iniciales dados y para unos valores de los parámetros da como resultado la imagen que se muestra conocida como el atractor de Lorentz. La representación de las órbitas seguidas (secuencia de valores de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  para cada instante de tiempo) configuran una imagen

tridimensional asociada a la dinámica caótica del sistema que se denomina *atractor extraño*. En este puede observarse que las trayectorias se pliegan sobre sí mismas, confinadas en una región del espacio, moviéndose infinitamente sin pasar nunca por el mismo sitio, sin cruzarse nunca. [54]



Fig. 6 A trator de Lorenz es un sistema dinámico determinístico tridimensional no lineal [54].

## 5.- FRACTALIDAD

El experto en matemática Benoit Mandelbrot fue el responsable de desarrollar en 1975, el concepto de fractal, que proviene del vocablo latino *fractus* (puede traducirse como “quebrado”). El término acuñado por el francés pronto fue aceptado por la comunidad científica e incluso ya forma parte del diccionario de la Real Academia Española (RAE).

Un fractal es una figura, que puede ser espacial o plana, formada por componentes infinitos. Su principal característica es que su apariencia y la manera en que se distribuye estadísticamente no varían aun cuando se modifique la escala empleada en la observación.

Los fractales son, por lo tanto, elementos calificados como semi geométricos (por su irregularidad no pertenecen a la geometría tradicional) que disponen de una estructura esencial que se reitera a distintas escalas.

El fractal puede ser creado por el hombre, incluso con intenciones artísticas, aunque también existen estructuras naturales que son fractales (como los copos de nieve).

De acuerdo a Mandelbrot, los fractales pueden presentar 3 clases diferentes de auto similitud, lo que significa que las partes tienen la misma estructura que el conjunto total:

- \* Auto similitud exacta, el fractal resulta idéntico a cualquier escala;
- \* Cuasiautosimilitud, con el cambio de escala, las copias del conjunto son muy semejantes, pero no idénticas;
- \* Auto similitud estadística, el fractal debe tener dimensiones estadísticas o de número que se conserven con la variación de la escala [17].

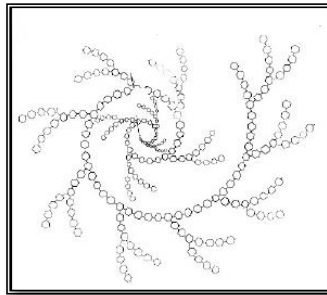


Fig. 7 Fractal de glucógeno se ha comprobado que esta molécula tiene naturaleza fractal [17].

## 5.1.-Tipos de fractales

Dentro de la geometría fractal podemos distinguir dos tipos de fractales:

- Objetos contruidos a partir de copias exactas (escaladas) de sí mismos llamados **fractales regulares**
- Objetos auto-semejantes, pero que no están contruidos sólo a partir de copias exactas de si mismos llamados **fractales no regulares** [17].

### 5.1.1 Los fractales regulares

Se definen generalmente de la siguiente manera:

- Se parte de una figura inicial
- Se aplican unas reglas de transformación, que generan varias nuevas figuras a partir de la inicial
- A cada una de las nuevas figuras se le aplica de nuevo las reglas de transformación y así hasta el infinito
- Sólo podemos dibujar aproximaciones finitas (unas cuantas iteraciones) [17].

### 5.1.2 Fractales no regulares

Algunos se pueden definir, igual que los regulares como el límite de una sucesión de conjuntos:

- Se parte de una figura inicial (conjunto de puntos)
- A partir del conjunto inicial se genera uno nuevo aplicando un conjunto de funciones, generalmente transformaciones afines:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}$$

- Ejemplos: hojas, árboles, etc.

Otros se definen como los puntos para los que una serie converge (ejemplo conjunto de Mandelbrot) [46].

### 5.2 Dimensión fractal

La geometría clásica no es lo suficientemente amplia como para abarcar los conceptos necesarios para medir las diferentes formas fractales. Si tenemos en cuenta que se tratan de elementos cuyo tamaño cambia incesantemente no es fácil, por ejemplo, calcular su longitud. La razón es que si se intenta realizar una medición de una línea fractal utilizando una unidad tradicional, existirán siempre componentes tan pequeños y delgados que no podrán ser delimitados dicha noción. Es por eso que se ha creado el concepto de dimensión fractal que permite, cuando hablamos de líneas fractales, conocer de qué manera o en qué grado ocupa una porción de plano. [60]

Calculo de dimensión fractal:

$D_f = 2 - \text{Exponente de Hurst}$

En relación con la geometría tradicional, un segmento posee dimensión uno, un círculo, dos, y una esfera, tres. Dado que una línea fractal no abarca toda la porción del plano, el cual debe tener una dimensión que no llegue a dos. Por ejemplo los sistemas biológicos: los pulmones, el sistema sanguíneo, el cerebro, con estructuras

de fractales regulares, se ajustan a la propiedad de auto semejanza en los cambios de escala. Los pulmones con una superficie cerrada poseen curvas de longitud infinita con grandes grupos de perfiles curvos con exactamente los mismos límites. Así es como maximizan los pulmones su superficie de intercambio, los bronquios en sus siete primeras ramificaciones tienen una dimensión fractal diferente a la dimensión de las ramificaciones de mayor nivel. [33]

El cerebro humano es el órgano conocido más importante del planeta; simplemente al ser observado, se comprende que su estructura es fractal. Si bien es irónico que, siendo capaz de haber deducido las reglas que rigen el universo, no ha sido capaz de descubrir por las que se rige él mismo. Este entendimiento es el mayor reto que enfrenta actualmente la humanidad; pues bien, la geometría fractal está presente y liderando los trabajos de investigación que se están llevando en los sistemas biológicos. [56]

### **5.3 Algoritmos de escape**

El fractal de Mandelbrot, se genera mediante un algoritmo de escape. Para cada punto se calculan una serie de valores mediante la repetición de una fórmula hasta que se cumple una condición, momento en el cual se asigna al punto un color relacionado con el número de repeticiones. Los fractales de este tipo precisan de millones de operaciones, por lo cual sólo pueden dibujarse con la inestimable ayuda del ordenador. Una característica especial del fractal Mandelbrot (y de otros tipos afines) es la de generar un infinito conjunto de fractales, ya que por cada punto se puede generar un fractal tipo Julia, que no es sino una ligera modificación en la fórmula del Mandelbrot. [71]

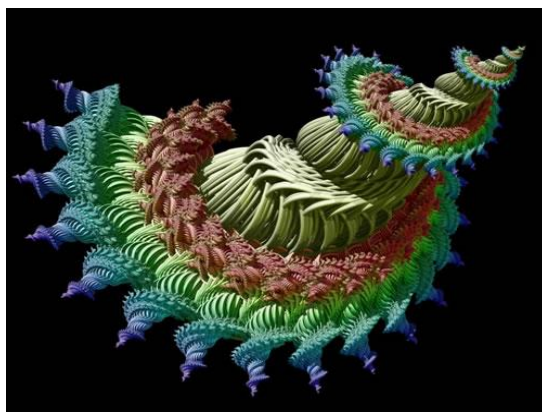


Fig. 8. Fractal en espiral de Mandelbrot es un ejemplo de la espiral Q con una densidad alta de interconexiones en espiral que se produce en ciertos fractales [71].

#### 5.4 Funciones iteradas

El sistema de funciones iteradas (IFS) es un método creado por M. Barnsley, basándose en el principio de auto semejanza. En un fractal IFS siempre se puede encontrar una parte de la figura que guarda una relación de semejanza con la figura completa. Esa relación es a menudo muy difícil de apreciar, pero en el caso del helecho es bastante clara, cualquier hoja es una réplica exacta de la figura completa [70].



Fig.9. *Helecho de Barnsley* es asociación geométrica de la fractalidad y teoría del caos [70].

## 5.5 Triángulo de Sierpinski

La idea es sencilla y antigua. Un triángulo en el que se aloja otro, uniendo los puntos medios de cada uno de sus lados. Esto se repite con todos y cada uno de los triángulos formados que tengan la misma orientación que el original, y así sucesivamente.

El triángulo de Sierpinski es uno de los pocos fractales que se puede dibujar con exactitud sin ayuda de un ordenador, siguiendo las instrucciones anteriores. [54]

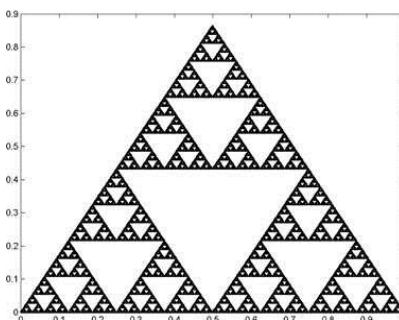


Fig. 10 Lindenmayer y Sierpinski mecanismo simple que se basa en la aplicación sucesiva de transformaciones anteriores de afinidad triangular [54].

## 5.6 Atractor de Lorenz

En 1963, Edward Lorenz (1917-2008), quien se interesaba en el problema de la convección en la atmósfera terrestre, simplificó de forma drástica las ecuaciones de Navier-Stokes de la mecánica de fluidos, conocidas por su complejidad. El modelo atmosférico de Lorenz es lo que los físicos llaman un modelo de juguete: aunque probablemente no corresponda con la realidad, Lorenz, no tardó mucho en darse cuenta que era un modelo matemático muy interesante. Las ecuaciones de Lorenz dependen de tres números  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , de manera que cada punto del espacio  $(x, y, z)$  representa un estado de la atmósfera y para estudiar su evolución hay que seguir un campo de vectores [68].

El atractor de Lorenz se obtiene llevando esa incertidumbre hasta el extremo, es una representación bidimensional. Básicamente está formada por un hilo

infinitamente largo que va describiendo una trayectoria tridimensional acercándose y alejándose de dos puntos de atracción [69].

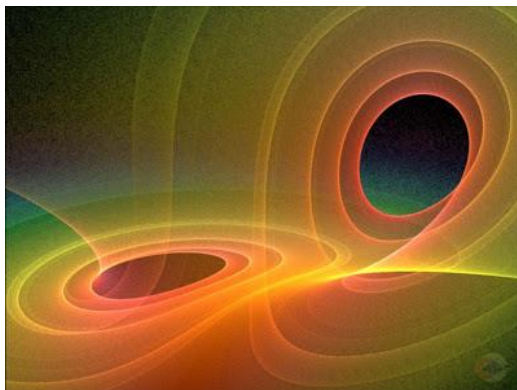


Fig. 11. Atractor de Lorenz es un sistema dinámico determinista no lineal derivado de las ecuaciones simples [69].

## 5.7 Fractales aleatorios y celulares

Ciertas categorías de fractal no se ajustan del todo dentro de las características que hemos descrito en algún otro sitio. Estructuras como el plasma o las imágenes de difusión (figura 5) dependen en cierta medida del azar, por lo cual son únicas e irrepetibles.

Los autómatas celulares están en el otro extremo; funcionan con sencillas reglas que colorean zonas a partir del color de las adyacentes. Pese a que en principio pueda parecer que las imágenes conseguidas con este método vayan a ser sencillas y simétricas, no tiene por qué ser así [26].

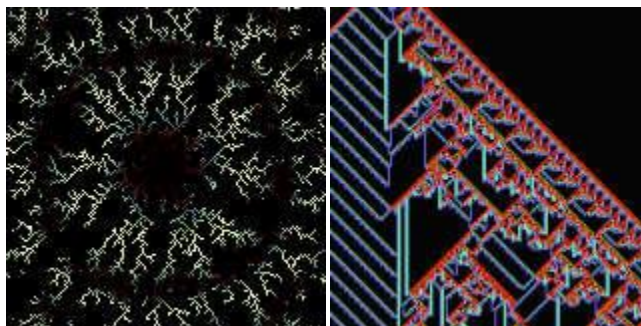


Fig. 12. Atractor de. Difusión y Celular [26].



## **6.- SISTEMAS BIOLÓGICOS**

Es un conjunto de sistemas complejos que se relacionan entre sí y actúan de manera coordinada realizando un equilibrio bioquímico.

Cada sistema cumple una función particular y es esencial para el funcionamiento del sistema en su totalidad. Los sistemas biológicos debido a su ontología compleja poseen una serie de características que los diferencian de cualquier sistema simple. Su todo es superior a la suma de sus partes, las propiedades del sistema son resultado de las conexiones y difieren de las propiedades individuales. Las propiedades sistémicas son destruidas cuando el sistema es diseccionado en elementos aislados, por tanto los sistemas complejos no son fragmentables y se caracterizan por ser irreducibles. Sus relaciones causa-efecto se encuentran ligadas a múltiples variables, es decir, un efecto puede no siempre tener una misma causa y una misma causa no tiene por qué dar lugar siempre a un mismo efecto. A su vez, los sistemas complejos no son computables y no los podemos fabricar de forma artificial [56]

### **6.1 Caos en Sistemas Biológicos**

Se ha observado la presencia del comportamiento caótico en la mayoría de sistemas naturales, bursátiles, sociales, así como los biológicos. En los sistemas biológicos y biomédicos importantes destacan los estudios sobre el comportamiento de los sistemas metabólicos (glicólisis), el análisis de las enfermedades cardíacas, la actividad cerebral, en epidemiología, entre otros. En el ámbito de la fisiología y la salud, sin duda el corazón y el cerebro son los sistemas que más estudio han recibido debido a su comportamiento de desorden, caos y linealidad, así como otros procesos tales como la movilidad o peristaltismo en el tracto gastrointestinal que exhiben dinámicas complejas.

Desde hace mucho tiempo en cardiología ya se describe un tipo particular de electrocardiograma (ECG) como ECG caótico. Otros estudios han mostrado que la calificación de caótica (puramente descriptiva y no está basada en un análisis de un

procesamiento matemático para visualizar su dinámica) era acertada dentro de los postulados de la TC (teoría del caos).

El estudio de arritmias cardiacas a través de datos bioeléctricos del sujeto de estudio, el cual se realiza mediante la excitación periódica del músculo cardiaco en animales de experimentación mediante pulsos de corriente y el estudio subsiguiente del ritmo obtenido. Se han desarrollado modelos matemáticos del ritmo cardiaco cuyas predicciones se ajustan de forma razonable a las observaciones experimentales. Otros estudios han presentado un fenómeno opuesto al anterior, ejemplo la aparición de episodios de periodicidad “excesiva” en los ECG en pacientes antes de presentar un paro cardiaco. [32].

## 6.2 Caos en la actividad cardiaca

La presencia del caos en la actividad cardiaca es un ejemplo en el que la asociación de esta con el caos es una connotación de no patológica

Obsérvese en el siguiente ECG una aparente evolución periódica, pero cuando se realiza un acercamiento se descubre un avance caótico; si fuese lineal, el sujeto de estudio no presentaría signos de vida. Se hace énfasis que un corazón sano exhibe un evolución de menor lineal y mayor caoticidad, como se muestra en la figura (a). En la figura (b) acontece lo opuesto.

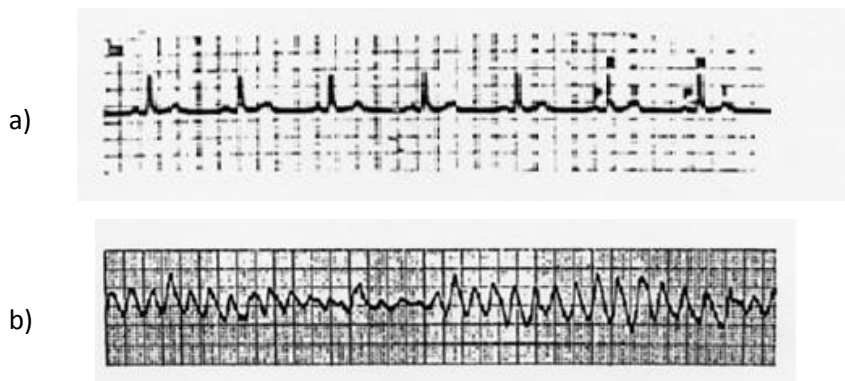


Fig. 13 a) Ritmo periódico normal aparente. b) Arritmia caótica altamente lineal característica de un proceso de fibrilación ventricular [32].

Otros estudios mostraron que la calificación de caótica es acertada dentro de los postulados de la TC. El estudio de arritmias cardiacas mediante el empleo de modelos experimentales se realiza mediante la excitación periódica del músculo cardiaco a través de pulsos de corriente en animales de experimentación, y el estudio subsiguiente del ritmo obtenido.

El análisis de los ECG de personas sanas pone de manifiesto la existencia de una cierta aperiodicidad cuyo origen no es la actividad aperiódica del sistema nervioso que controla la actividad cardiaca. También se ha observado que con la edad los ECG se hacen más regulares.

El caos es sinónimo de salud y la periodicidad de patología en el caso de la actividad cerebral, sin embargo el comportamiento del corazón no es completamente caótico, presentado cierto grado de linealidad. [32]

## **7.0 EL CORAZÓN**

El corazón es un órgano muscular hueco que actúa en el organismo como una doble bomba: impulsa la sangre hacia los pulmones para su oxigenación, y bombea la sangre oxigenada hacia todas las zonas del organismo. La fibra muscular cardíaca posee automatismo, excitabilidad y conductibilidad eléctrica. Y sus válvulas son la bicúspide, tricúspide y semilunares. Las arterias poseen paredes más anchas y elásticas que las venas, pero estas últimas poseen válvulas y un sistema de exclusas.

La sangre es un líquido rojo, espeso con flujo turbulento por el sistema vascular sanguíneo; formado por un plasma amarillento compuesto de suero y fibrinógeno y de elementos sólidos en suspensión: eritrocitos, leucocitos y plaquetas.

Las funciones de la sangre son: el transporte de elementos nutritivos, oxígeno, dióxido de carbono y además protege al cuerpo; estas funciones en la sangre son desarrolladas por los glóbulos blancos, glóbulos rojos, plaquetas y el plasma. [6]

## 7.1 Esquema del corazón:

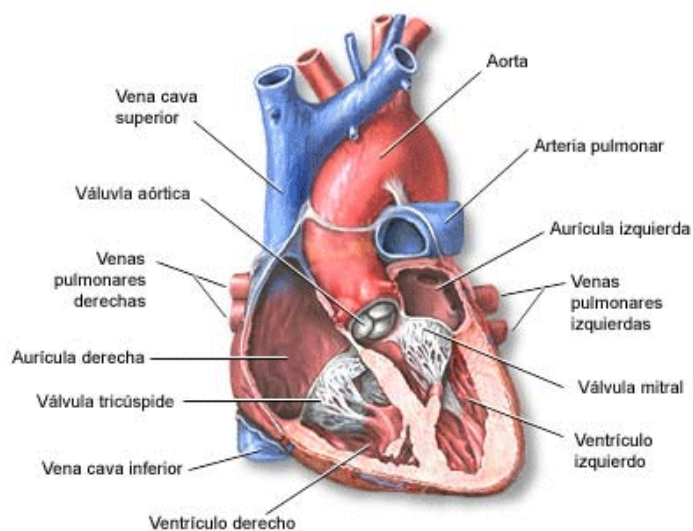


Fig. 14 Esquema de las partes del musculo cardiaco. [6]

Características de la fibra muscular cardíaca:

Automatismo: Funciona en forma automática.

Excitabilidad: Tiene la posibilidad de excitarse solo.

Conductibilidad: Capacidad de conducción, sin necesidad del sistema nervioso central.

Válvulas cardíacas:

1. Válvula bicúspide: válvula mitral: la aurícula izquierda, se comunica con el ventrículo izquierdo a través de esta.
2. Válvula tricúspide: situada en el orificio aurícula ventricular derecho del corazón, está formada por tres valvas, que conecta la aurícula izquierda y el ventrículo derecho.
3. Válvulas semilunares: son tres formaciones unidas, comunican los grandes vasos con el corazón.

## **7.2 Ritmo cardíaco**

Tiene dos etapas: sístole y diástole. [6]

Sístole: es el movimiento de contracción del corazón.

Diástole: es el movimiento de relajación del corazón.

*Regulación extrínseca del corazón:*

Es la encargada de aumentar o disminuir la frecuencia cardíaca. Es más compleja y ocurre en cuatro partes del corazón:

- a. Nodo Sino auricular: genera ondas eléctricas que generan el ritmo cardíaco. Son distribuidas por las aurículas, que se contraen.
- b. Nodo aurículo-ventricular: absorbe la carga eléctrica y la pasa al haz de Hiss.
- c. El Haz de His retrasa el impulso eléctrico para el vaciado de las aurículas.
- d. Luego trasmite los impulsos por el Sistema de Purkinge, que los distribuye por todo el ventrículo. [6]

### **Presión arterial.**

El primer ruido de la presión arterial es la presión sistólica también conocida como ruido Korotkoff que se produce cuando el corazón se contrae y el segundo ruido es durante la diástole cuando el corazón se dilata por la llegada del flujo sanguíneo y reiniciar el ciclo. Anteriormente se creía que se desarrollaba bajo un comportamiento constante. Pero con el avance matemático, científico, tecnológico y computacional se ha verificado que obedece a un comportamiento no lineal; ya que si fuera un comportamiento lineal o periódico sufriría una alteración fisiológica a causa de emociones inesperadas.

Frecuencia cardíaca de humanos en reposo:

- Recién nacido de 100-160 latidos por minuto
- Niños de 1 a 10 años de 70 a 130 latidos por minuto.

- Niños de más 10 años y adultos incluyendo ancianos de 60 a 100 latidos por minuto.
- Atletas bien entrenados de 40 a 60 latidos por minutos

La fórmula con la cual se obtiene la frecuencia cardiaca máxima en hombres  $FreC = 220 - \text{Edad}$ , para mujeres  $FreC = 226 - \text{Edad}$ .

Existen dos tipos de ritmo cardiaco el regular e irregular, para ello se debe de medir la distancia entre R y RR de los distintos latidos. Si el ritmo es regular esta distancia es similar de un latido a otro dando un comportamiento de un sistema periódico manifestándose en un desorden patológico y si es irregular en prueba un buen funcionamiento del músculo cardiaco, ya que se trata de un sistema complejo de comportamiento altamente caótico, con las técnicas de la teoría del caos se obtiene conocimiento de cómo se genera la turbulencia sanguínea la cual rompe la regularidad circulatoria y cardiaca.

Normalmente se observa el ritmo a través del ECG, que para su interpretación es necesario tener presente: las medidas básicas obtenidas de blanco. [33]

### ***7.3 Circulación Mayor***

Es la de transporte de sangre por los vasos sanguíneos entre el ventrículo izquierdo y la aurícula derecha. [33]

### ***7.4 Circulación Menor***

Circulación menor o de oxigenación. Es el transporte de la sangre por los vasos sanguíneos entre el ventrículo derecho y la aurícula izquierda. [33]

#### ***Diferencia principal entre arteria y venas***

La principal diferencia es que las arterias llevan sangre del corazón a todos los tejidos del cuerpo y sus paredes son gruesas y elásticas, en cambio las venas transportan la sangre de los tejidos nuevamente hacia el corazón, sus paredes son más delgadas menos elásticas que las arteriales. Tienen algunas excepciones las

arterias pulmonares llevan sangre carbo-oxigenada y la vena pulmonar trae sangre al corazón. [45]

### **7.5 Frecuencia cardiaca**

La frecuencia cardíaca (FC) es el número de contracciones del corazón por minuto. Fundamental es saber su valor y variación por su utilidad en la dosificación del ejercicio y el cálculo del umbral anaeróbico [45].

La FC se incrementa con la intensidad del ejercicio; a partir del 75%-92% de intensidad de trabajo, los incrementos de la FC son menores. Esta zona de disminución, para autores como el profesor Francesco Conconi, coincide con la zona del umbral anaeróbico, lo cual permite determinar dicho umbral de forma muy sencilla, entre los cuales se tienen Métodos directos:

Concentración de lactato en pruebas de campo

OPLA: comienzo de la acumulación de lactato en plasma

OBLA: comienzo de la acumulación de lactato en sangre [45].

Un método directo es aquel que mediante tomas de muestras de sangre se mide la concentración plasmática o sanguínea de lactato y se establece la carga de trabajo o la intensidad relativa (%) en la que se alcanzan 4 mmol/l, siendo la concentración que se ha determinado como el mayor nivel que el lactato puede mantenerse en estado estable; siempre y cuando se mantengan constantes las condiciones de ejercicio en las que se alcanzó [45].

El umbral anaeróbico es un concepto complejo de gran difusión y uso en la evaluación de la respuesta cardio-respiratoria al ejercicio. El umbral anaeróbico se ha extendido por todo el mundo, usándose tanto en el campo del entrenamiento deportivo como en el de rehabilitación médica [45].

Es elemental diferenciar entre la respuesta del individuo deportista y la respuesta del individuo sedentario. El deportista posee en general una frecuencia cardíaca en reposo menor. Es así como se va mejorando su entrenamiento sin sufrir hipoxia [45].

Para establecer unas bases sólidas de entrenamiento debemos conocer ciertos aspectos de nuestro corazón como por ejemplo: la frecuencia cardíaca en reposo (FCR) y la frecuencia cardíaca máxima (FC máx.) [45].

Se denomina frecuencia a la repetición menor o mayor de un suceso. Por ejemplo: *“En esta ciudad llueve con demasiada frecuencia”, “El protagonista equivoca la letra con frecuencia”* [45].

También hay frecuencia en los sistemas biológicos por ejemplo la frecuencia cardíaca en el hombre, en animales de laboratorio (rata Wistar), entre otros.

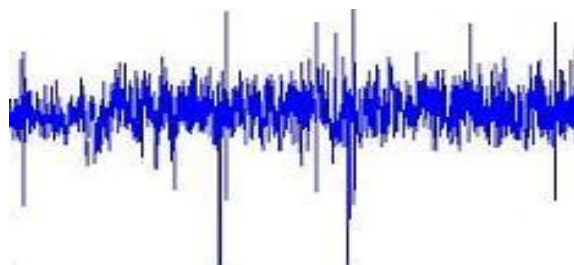


Fig.15 Frecuencia presente en un de ECG [45].

El término proviene del latín *frequentia*, también permite hacer referencia a la cantidad de veces que un proceso periódico en tiempo basal aparente se repite por unidad de tiempo. El Sistema Internacional señala que las frecuencias se miden en Hertz (Hz), una unidad que lleva el nombre del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz. Un Hz es un suceso que se repite una vez por segundo; por eso, la unidad también se conoce como ciclo por segundo (cps). [62]

## 7.6. Válvulas cardiacas

El corazón está compuesto por cuatro cavidades, dos aurículas situadas en la parte superior que reciben la sangre y dos ventrículos en la parte inferior que la bombean



fuera del corazón. Existe una válvula entre cada cavidad del corazón por los cuales la sangre debe pasar antes de salir de ellas. Las válvulas evitan el retorno del torrente sanguíneo. Las valvas son como aletas que se localizan en la salida de cada ventrículo, que actúan como compuertas de entradas en las cavidades superiores y de salidas en las cavidades inferiores. Las válvulas normales tienen tres aletas, excepto la válvula mitral, la cual solo tiene dos, las cuatro válvulas son:

- La válvula tricúspide localizada entre la aurícula derecha y el ventrículo derecho.
- La válvula mitral se encuentra entre la aurícula izquierda y el ventrículo izquierdo.
- La válvula aortica situada entre el ventrículo izquierdo y la aorta
- La válvula pulmonar localizada entre el ventrículo derecho y la arteria pulmonar. [10]

Funcionamiento de las válvulas cardiacas:

Las válvulas que comunican las aurículas y los ventrículos (mitral y tricúspide) son diferentes a la forma de las que se localizan entre los ventrículos y las arterias pulmonares y aorta (válvulas pulmonares y aórticas).

Las primeras constan de un anillo que las sujeta al orificio situado entre la aurícula [10]

Cuando el músculo cardiaco se contrae y se relaja las válvulas del miocardio se abren y se cierran con cada latido enviando la sangre en dos fases (diástole y sístole). [10]

Cada mitad del corazón funciona de forma independiente: la parte derecha es responsable del retorno de la sangre pobre en oxígeno y la parte izquierdo envía la sangre oxigenada al resto del cuerpo. Tras la contracción del ventrículo izquierdo, la válvula aórtica se cierra y la válvula mitral se abre, permitiendo que la sangre pase desde la aurícula izquierda, hasta el ventrículo izquierdo. [10]

La sangre pobre en oxígeno y nutrientes, procedente de la vena cava, entra primero a la aurícula derecha. Cuando esta cavidad se llena, la válvula tricúspide se abre y la sangre baja hacia el ventrículo derecho, cuando éste se llena, envía la sangre hacia los pulmones por la arteria pulmonar para que la sangre se oxigene. Ya rica en oxígeno, la sangre fluye por las venas pulmonares hacia la aurícula izquierda. Cuando esta cavidad se llena, la válvula mitral se abre y la sangre, va hacia el ventrículo izquierdo, que bombea la sangre a través de la válvula aórtica para distribuir ésta por todo el organismo. El ventrículo izquierdo baja a mayor presión porque es el responsable de enviar la sangre al sistema circulatorio sistémico o general. [10]

## 7.7 Regulación Cardiovascular

El objetivo de la regulación es controlar el flujo de sangre que llega a los diferentes órganos, ya que de él depende la nutrición y la limpieza de los tejidos. [62]

El flujo sanguíneo depende de la presión y la resistencia:  $F = P/R$ .

Si se mantiene constante la presión el flujo dependerá sólo de la resistencia.

El control de la presión arterial se lleva a cabo con un mecanismo de retroalimentación, basado en el reflejo presor receptor o bar receptor:

Receptor → Centro cardiovasculares → Efecto sobre el corazón y los vasos [62]

$P = GC \times RVP$

Si los receptores detectan un incremento en la presión arterial esta información es enviada al centro cardiovascular donde se procesa y se elabora una respuesta:

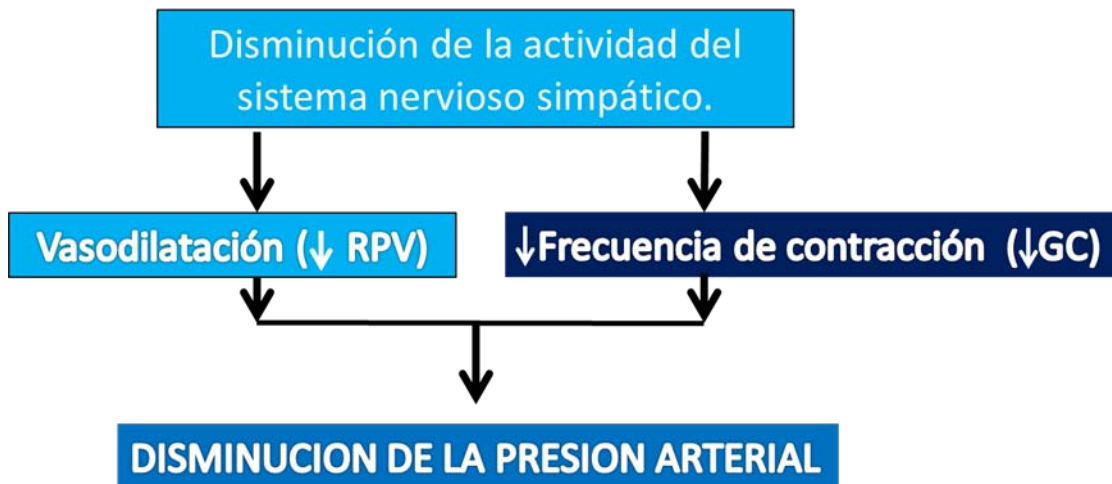


Fig. 16 Regulación cardiovascular [62].

## 8.- FUNCIÓN DE LA SANGRE

Las funciones de la sangre son: el transporte de elementos nutritivos, oxígeno, dióxido de carbono y además protege al cuerpo.

Estas funciones en la sangre son desarrolladas por los glóbulos blancos, glóbulos rojos, plaquetas y el plasma [42].

### 8.1 Características de la Sangre

Líquido rojo, espeso circulante por el sistema vascular sanguíneo, formado por un plasma incoloro compuesto de suero y fibrinógeno y de elementos sólidos en suspensión: eritrocitos, leucocitos y plaquetas [42].

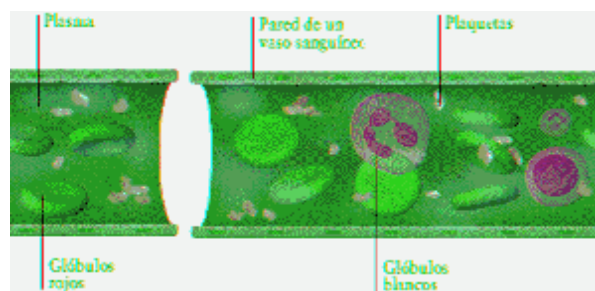


Fig. 17 Elementos figurados de la sangre [42].

## 8.2 Fisiología

La sangre está formada por un líquido amarillento denominado plasma, glóbulos rojos, llamados eritrocitos o hematíes; corpúsculos o glóbulos blancos que reciben el nombre de leucocitos y plaquetas, denominadas trombocitos. La sangre también transporta muchas sales y sustancias orgánicas disueltas. [33]

## 9.- ANIMALES DE LABORATORIO

La experimentación con animales o experimentación "in vivo" es el uso de animales no humanos en experimentos científicos. Se calcula que cada año se utilizan entre 50 y 100 millones de animales vertebrados (desde peces hasta primates no humanos) [65].

Se utilizan las ratas Wistar para investigación porque su genoma es parecido al del ser humano, se proliferan fácilmente y en mayor cantidad, cuando se realiza un experimento se tienen que usar cantidades significativas de animales, para que los resultados sean coherentes. Además no están en extinción, y no hay problemas con la sociedad protectora de animales, son fáciles de cuidar y los resultados se pueden extrapolar. No debe experimentarse directamente en seres humanos, pero si se pueden probar los resultados obtenidos de los animales, ya que estos son biomodelos experimentales que tienen la cualidad necesaria para dar respuesta al cuestionamiento de cómo estudiar las enfermedades que afectan al hombre, a la especie que está estudiando, y a las demás especies productivas y domésticas, las ratas, ratones y cerdos, entre los que responden más uniformemente a esos requerimientos, son de fácil manejo y poseen las características zootécnicas adecuadas. [65]

Hay miles de líneas y sublíneas de ratones, que replican las enfermedades del ser humano. [65]

Hoy existen ratas y ratones para muchas de las enfermedades que padece el hombre; hay ratas obesas e hipertensas, ratones diabéticos, asmáticos,

inmunodeficientes; unos por mutaciones espontáneas y otros inducidos por el hombre. [65]

Los animales de laboratorio se utilizan, en la industria médico farmacéutica, para la obtención de productos biológicos (anticuerpos monoclonales, vacunas, entre otros); en pruebas biológicas para el control de la calidad de estos; en los estudios toxicológicos; la experimentación, y la docencia. [65]

Las características que han hecho del ratón de laboratorio el modelo biológico y biomédico más utilizado en las investigaciones científicas son:

1. Su fácil manejo
2. Bajo costo
2. Su tamaño apropiado para la crianza y manipulación
3. No requieren demasiados cuidados.
4. Tienen un sistema inmune similar al del ser humano.
5. Tienen un alto número de crías. (50 a 100 al año)
6. Poseen un breve período de gestación (19-21 días), y su destete es rápido.
7. Las hembras producen un gran número de óvulos, los cuales al ser fecundados son muy resistentes.
8. Al ser mamíferos euterios, poseen un genoma muy similar al de los seres humanos [65].

### **9.1 Características de los Animales de Laboratorio**

Las características más importantes que deben conocerse en la rata Wistar y ratón de experimentación se encuentran en la siguiente tabla; que serán de gran utilidad en la selección del animal de laboratorio para un experimento en particular.

Tabla 1 Características de la rata y ratón de laboratorio. [63]

CARACTERISTICAS	RATON ( <i>Mus musculus</i> )	RATA ( <i>Rattus rattus</i> )
Pubertad	35 días	40 - 60 días
Tiempo de crianza	Todo el año	Todo el año
Periodo de preñez	20 días	23 días
Crías por camada	4 - 12	6 - 8
Tiempo de vida	2 - 3 años	2 - 3 años
Desarrollo a adulto	6 meses	5 meses
tiempo de Lactancia	21 días	21 días
Camadas / año	4	7
Temp. Corporal	37.9 - 39.2 °C	37.7 - 38.8 °C
Frec. Respiratoria	136 - 216 / min.	100 - 150 / min.
Presión sanguínea	147 / 106	130 / 95
Volumen sanguíneo	7.5 %	7.5 %

## 9.2 Fisiología de rata Wistar y ratón de laboratorio [63].

- Esperanza de vida 3-4años, 2-3años
- Peso corporal del adulto 400-800g, 20-40g
- Frecuencia respiratoria 70-150 rpm, 100-250 rpm
- Volumen tidal 1.5-1.8ml, 0.15ml
- Frecuencia cardiaca 260-450 ppm, 500-600 ppm
- Volumen sanguíneo 50ml/kg, 80ml/kg
- Temperatura rectal 38°C, 37.5°C
- Valor hematocrito 46%, 40%
- Recuento GR  $8.5 \times 10^{12}/L$ ,  $9.3 \times 10^{12}/L$
- Concentración Hb 14.2g/dl, 11.1g/dl
- Recuento GB  $9.8 \times 10^9 /L$ ,  $13.6 \times 10^9/L$
- Neutrófilos 25%, 17%
- Linfocitos 74%, 72%
- Ingestión agua/24h: 10ml/100g, 15ml/100G

## DISEÑO EXPERIMENTAL

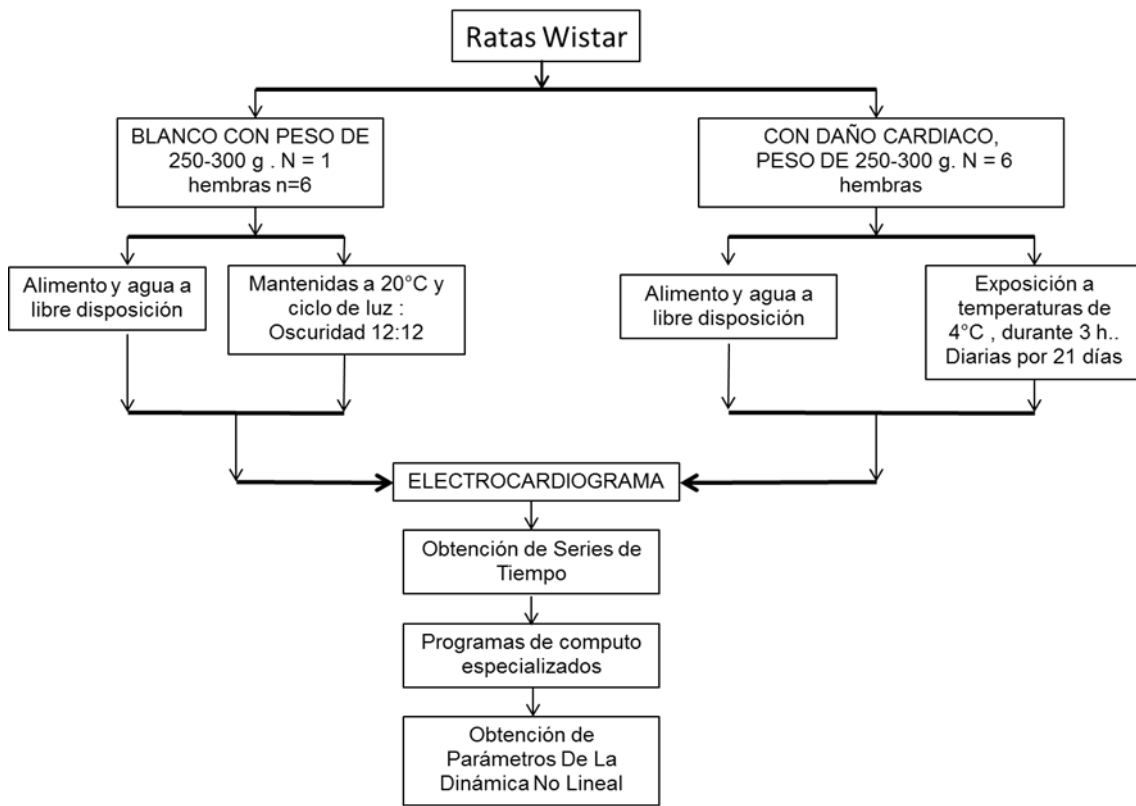


Fig. 18 Diagrama de flujo para la obtención de ECG de ratas Wistar y procesamiento de series de tiempo.

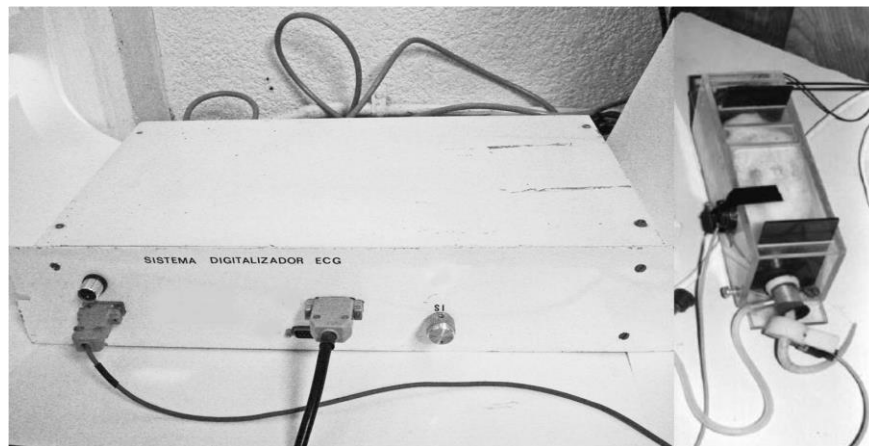


Fig. 19 Caja de acrílico de prueba para rata Wistar, conectada a un sistema de captura de electroencefalografía la cual permite obtener series de tiempo para procesar parámetros de la dinámica no lineal.

## **10.- PARTE EXPERIMENTAL**

### **10.1 Objetivo General**

Caracterizar la patología por medio de datos electrocardiográficos de rata Wistar Blanco y con Daño Cardíaco (estrés inducido ), aplicando técnicas de dinámica no lineal (Probabilidad de Distribución, Exponente de Hurst, Diagrama Espacio Fase y Análisis de Recurrencia Visual), para observar la estructura del atractor extraño.

### **10.2 Objetivos Particulares**

Obtener los atractores extraños a partir de los ECG obtenidos de ratas Wistar blanco y con daño cardíaco, para comparar la uniformidad de los parámetros de los individuos de estudio.

Usar técnicas de la dinámica no lineal en el procesamiento de las series de tiempo y obtener los parámetros cuantitativos que soporten la distribución del atractor extraño.

Diferenciar la estructura del atractor extraño mediante la obtención de series de tiempo experimentales de datos electrocardiográficos para comparar la patología de estudio.

Realizar la comparación de la parte experimental que existe entre individuos testigo vs individuos con daño cardíaco (estrés inducido), mediante parámetros de la Dinámica No Lineal.

## **11.- JUSTIFICACIÓN**

Conocer la evolución de las series de tiempo en músculo cardíaco mediante la inducción de estrés de rata Wistar y de rata Wistar sana bajo las mismas condiciones para ser proyectado en humanos para prevenir y controlar una patología cardíaca en el mismo.



## 12.- HIPÓTESIS

Si con el procesamiento de los datos electrocardiográficos con técnicas de la dinámica no lineal se podrá estudiar a mayor profundidad las patologías cardiacas presentes, para apoyar y fortalecer el diagnóstico clínico.

## 13.- EQUIPO, MATERIAL Y MÉTODO

- Electrocardiograma para animal de experimentación (*Rattus norvegicus* cepa Wistar).
- Equipo digitalizador.
- Sistema de cómputo y software especiales.
- *Rattus norvegicus* cepa Wistar, hembras con estrés y blanco, con peso de 250-300 gr.
- Selección de muestra biológica N = 7 Ratas Wistar con daño cardiaco.
- Método

Registro de datos electrocardiográficos en rata Wistar por medios de métodos incruentos, minimizando las molestias del espécimen de estudio.

Digitalización de datos experimentales

Obtención de series de tiempo.

Procesamiento de las series de tiempo por métodos computacionales.

Obtención de diagrama de espacio fase o atractor extraño y parámetros

Cuantitativos y Cualitativos a través de técnicas de la Dinámica No Lineal:

- Atractor Extraño (Diagrama espacio fase), el cual esta soportado por parámetros cuantitativos y cualitativos: probabilidad de distribución cuya estructura exhibe si el sistema presenta una tendencia periódica o caótica y a la vez esta soportado por Curtosis y Asimetría.
- Probabilidad de distribución, donde se observa la tendencia a ser altamente periódica mediante asimetría y Curtosis, en patologías cardiacas.

- Exponente De Hurst, cuantifica el grado de rugosidad y la irregularidad que existe en el Atractor extraño y se relaciona con distribución fractal
- Exponente De Liapunov, mide la tasa de separación de trayectorias infinitesimalmente cercanas y sus diferentes orientaciones.
- Curtosis indica hacia donde migran los datos en la probabilidad de distribución y el tipo de tendencia (positiva o negativa)
- Asimetría muestra el tipo de distribución: platicurtica, mesocurtica y leptocurtica
- Trama de recurrencia revela el tipo de fractalidad que presenta el Atractor extraño.

## 14.- RESULTADOS

*Resultados de parámetros de la dinámica no lineal de rata Wistar aparentemente sana del sistema cardiovascular.*

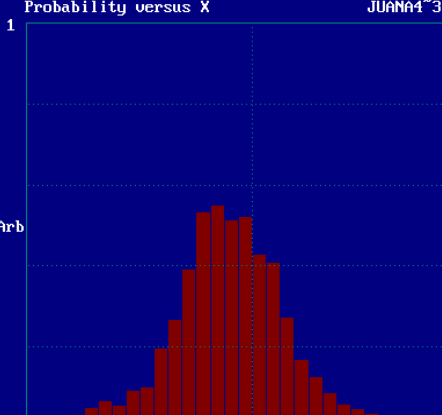
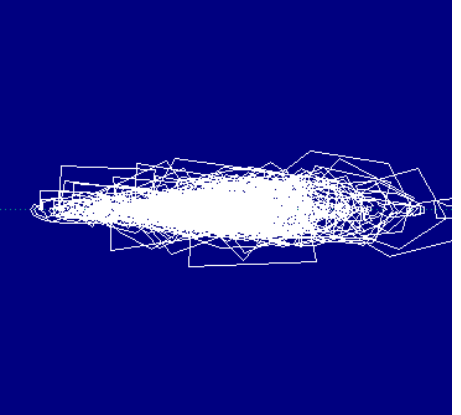
Probabilidad de distribución	Diagrama espacio fase	Exponente de Hurst
		<b>0.4076086</b>

Tabla. 2 Observe que la estructura de la distribución de probabilidad es diferente a la campana de Gauss indicando un comportamiento no periódico, el cual es confirmado por la trayectoria que exhibe el atractor extraño, además se ratifica con el valor numérico del parámetro exponente de Hurst.

## Resultados de Análisis de Recurrencia Visual en Rata Wistar aparentemente sana del sistema cardiovascular.

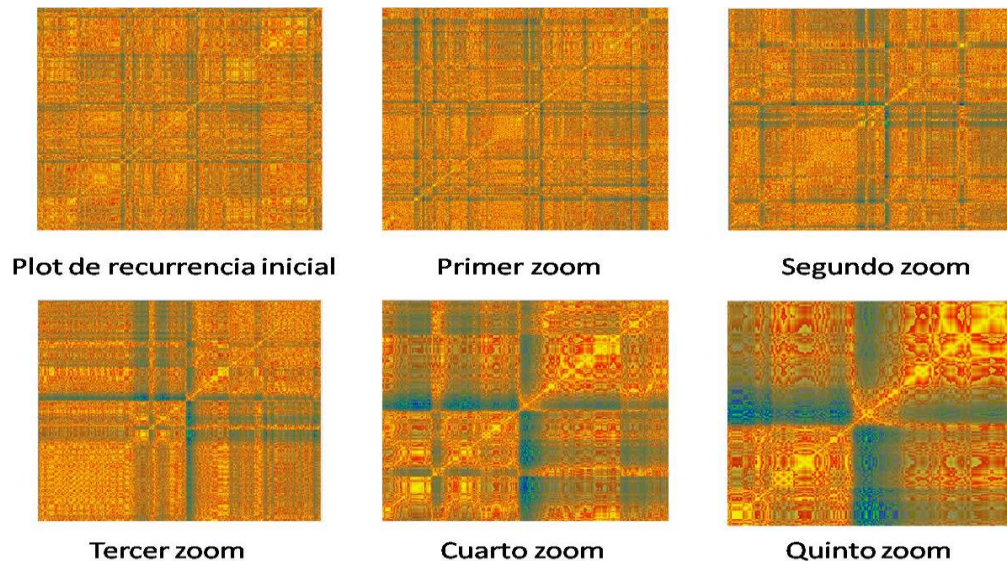


Fig.20 Evolución del plot de recurrencia de rata sana: obsérvese la diferencia del comportamiento en cada zoom del plot de recurrencia, que es altamente caótico y de baja periodicidad, revalidando que no existe daño.

Otro método comparativo que soportan los resultados anteriores es a través de los parámetros estadísticos:

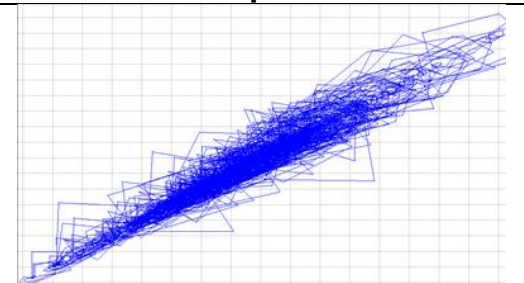
Plot de espacio-fase	Kurtosis	Asimetría
	0.9601	0.2633

Tabla. 3 El comportamiento del atractor extraño es caótico confirmándose por la no periodicidad de las figuras que forman las series de tiempo durante la trayectoria; esto lo fortalece el valor numérico de Curtosis y asimetría.

### Secuencia de la Evolución del Diagrama Espacio-Fase de Rata Wistar sin aparente daño en sistema cardiovascular.

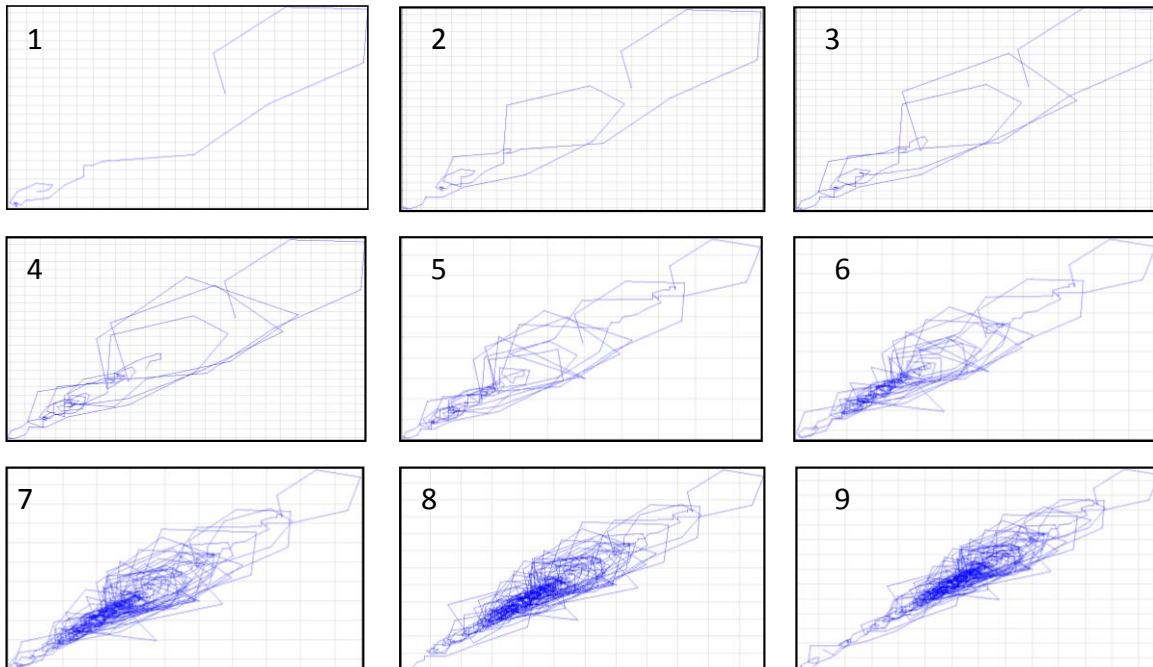


Fig.21 La trayectoria del atractor extraño exhibe diferente estructura durante su formación indicando comportamiento no lineal propio de un sistema biológico que no presenta daño del músculo cardíaco "sano".

## Resultados de parámetros de la Dinámica No Lineal de Rata Wistar con patología en sistema cardiovascular.

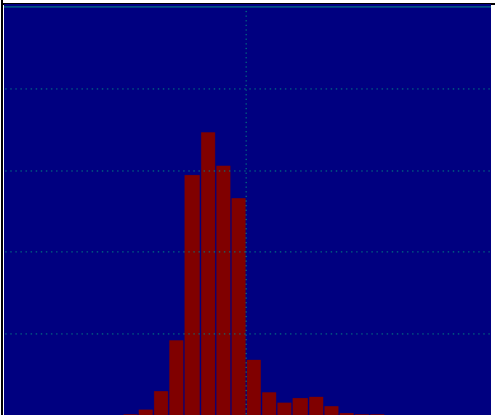
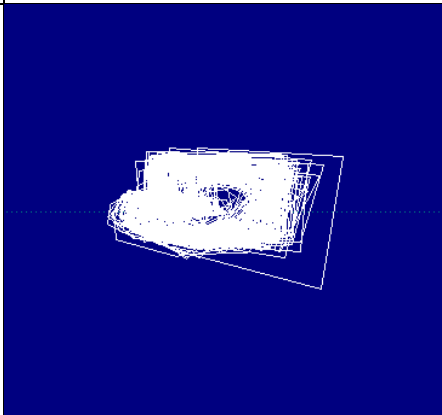
Probabilidad de distribución	Diagrama espacio fase	Exponente de Hurst
		<b>0. 1229858</b>

Tabla. 4 Al observar la estructura de la probabilidad de distribución parece indicar que no hay daño cardíaco, pero al visualizar el comportamiento del atractor extraño que es altamente periódico y el valor del exponente de Hurst exhibe la presencia de daño; de aquí la importancia de utilizar técnicas de la dinámica no lineal que apoyan a detectar con mayor profundidad el comportamiento del sistema complejo.

### Análisis de Resultados del Plot de Recurrencia Visual en Rata Wistar con patología en sistema cardiovascular.

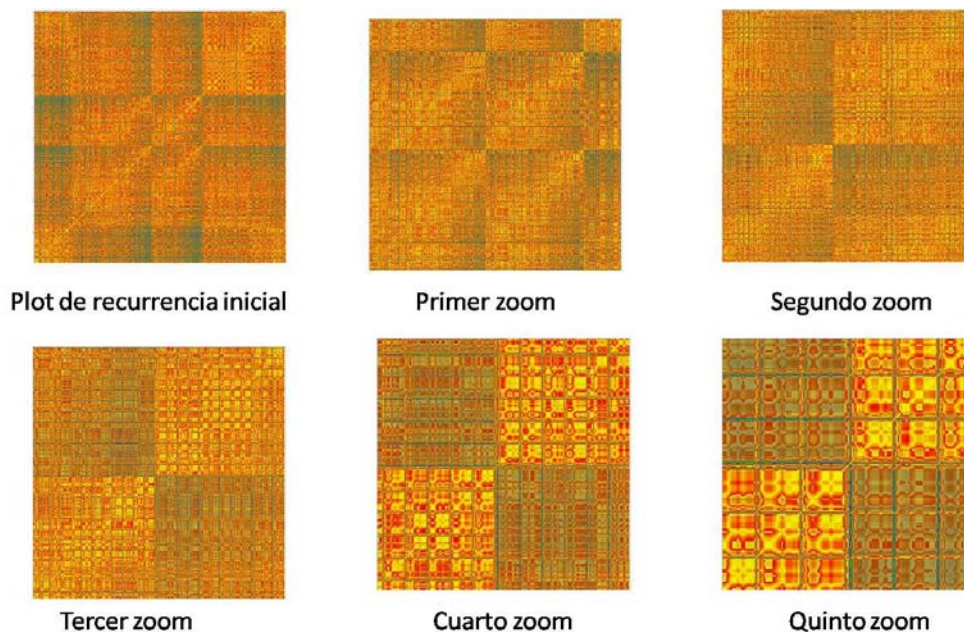


Fig. 22 Evolución del Plot de recurrencia de Rata Wistar con patología: al observar cada zoom el comportamiento es altamente periódico, corroborando el daño presente en el fenómeno de estudio, el cual se confirma con la trayectoria de las series de tiempo en el diagrama espacio fase.

## Parámetros estadísticos que avalan el comportamiento del diagrama espacio fase

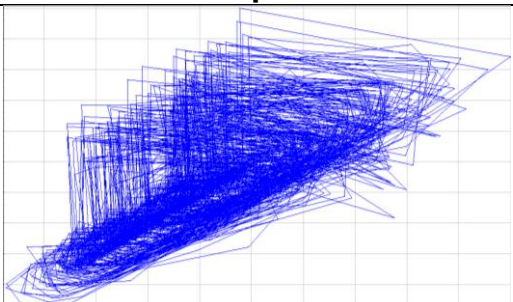
Plot de espacio-fase	Kurtosis	Asimetría
	1.6484	0.8002

Tabla. 5 Obsérvese que el valor de Kurtosis es casi el doble del individuo “sano” así como el valor de asimetría que aporta un valor cuatro veces mayor que el “normal” ratificando un comportamiento periódico del atractor extraño indicando la presencia del daño.

## Secuencia de la Evolución del Diagrama Espacio-Fase de Rata Wistar con daño en el sistema cardiovascular.

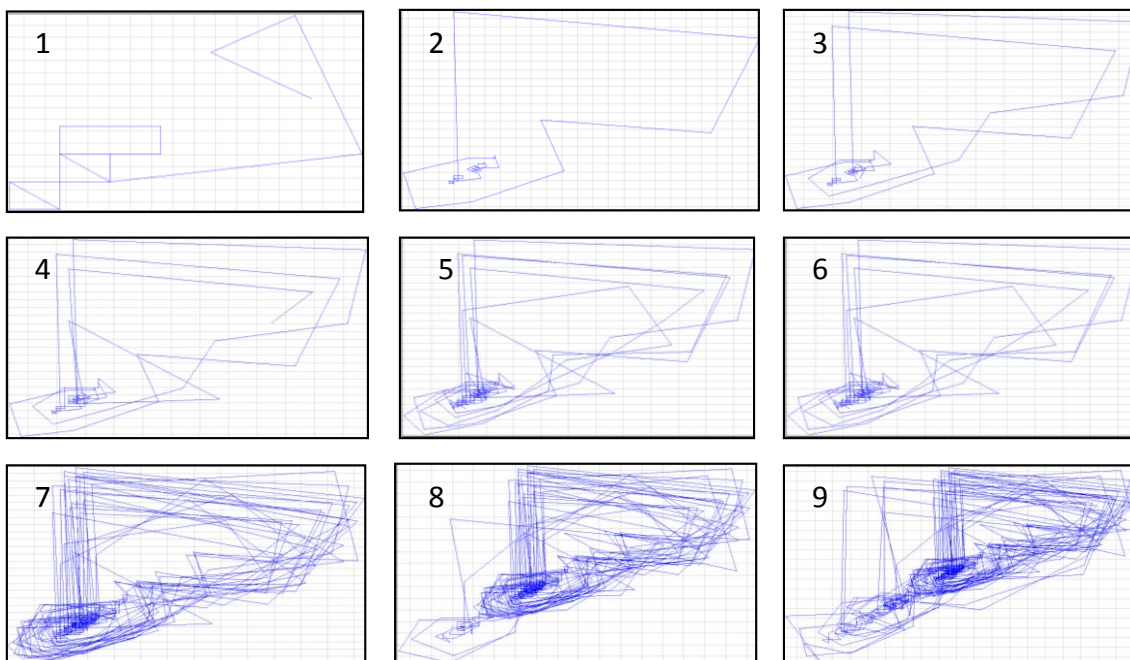


Fig.23 Evolución del Diagrama Espacio-Fase se visualiza el comportamiento periódico en músculo cardiaco en la Rata de estudio reafirmando la patología cardiaca.

## 15.- ANALISIS DE RESULTADOS EN DATOS ESTADISTICOS

Análisis de Distribución de Probabilidad (Curtosis y Asimetría.)

La distribución de probabilidad suele conocerse como campana de Gauss y es una función de un suceso definido sobre una variable aleatoria que nos indica un suceso ocurrido; está definida por un conjunto de todos los sucesos ocurridos.

Al tener diversas campanas de Gauss las cuales presentan similitud en forma y concentración de valores, siguiendo una misma distribución alrededor de un punto central, se utilizan medidas de distribución, las cuales permiten identificar la forma en que se separan o se aglomeran los valores de acuerdo a su representación gráfica cuyo gráfico se fortalece a través de los valores de Curtosis y asimetría.

De acuerdo a lo anterior al realizar el análisis mediante la comparación de las gráficas de la campana de Gauss que se le realizaron con los datos experimentales en rata Wistar se visualiza que en la rata control se obtuvo un valor de Curtosis = 0.9601 y un valor de asimetría = 0.2633.

Al presentar un valor de Curtosis mayor a cero ( $K > 0$ ); la distribución de probabilidad es Leptocurtica, presentando una distribución más afilada, con una elevación superior a la curva normal. Con respecto a la asimetría se observa un valor mayor a cero la curva es asimétricamente negativa por lo que los valores tienden a desplazarse hacia la parte izquierda que en la derecha de la media.

Al realizar la comparación del gráfico de la rata Wistar que presenta daño cardiaco y los valores de Curtosis y asimetría, se observa que la campana de Gauss arroja una Curtosis = 1.6484 y una asimetría = 0.8002, indicando que la Curtosis presenta una distribución Leptocurtica y es asimétricamente positiva. De los datos obtenidos se puede inferir que al tener una Curtosis mayor a uno, el individuo presenta un mayor daño en el sistema cardiaco, la patología se refuerza con los valores incrementados.

De aquí la importancia de las herramientas estadísticas para el estudio de los sistemas complejos, en especial los biológicos. A través de los datos

experimentales del sujeto de estudio que presenta la patología, lo que permite obtener resultados de mayor confiabilidad y a la vez visualizar una posible prevención para controlar y dar apoyo al diagnóstico clínico.

### **Análisis del Diagrama Espacio Fase o Atractor Extraño**

Un atractor extraño es un sistema que evoluciona con el tiempo suficientemente largo, éste puede ser un punto una curva o una variedad de ambos, incluso formar una estructura fractal.

El atractor no satisface ninguna propiedad y puede ser de tipo periódico, aperiódico, cuasi periódico, caótico o de cualquier otro tipo. Es por ello que al realizar la comparación de los atractores obtenidos de los datos electrocardiográficos de rata Wistar control y la que presenta daño cardiaco, se observa que en la figura que representa la evolución del Atractor extraño de la rata control se establecen diversas líneas en diferentes trayectorias que forman una estructura no lineal, revelando que el sistema biológico de estudio no presenta aparente daño, por el contrario al visualizar el inicio de la evolución del Atractor de rata Wistar con daño cardiaco se visualiza que desde un inicio se forman figuras geométricas periódicas, siguiendo así una trayectoria lineal hasta el final de la evolución del Atractor, indicando con esto la formación de una estructura no caótica que confirma la presencia de una patología cardiaca debido a que el corazón no tiene una respuesta favorable a los cambios emocionales de su entorno.

### **Análisis de parámetros del método comparativo.**

#### **Exponente de Hurst.**

El Exponente de Hurst es un parámetro que se utiliza para analizar los diversos comportamientos de un sistema a lo largo del tiempo, tiene la gran ventaja de poder caracterizar partes de una curva con una pendiente que describe su irregularidad y rugosidad.

El valor del exponente de Hurst en el rango de  $0.5 < H < 1$  corresponde a series temporales que muestran procesos persistentes.



Un exponente de Hurst en el rango de  $0 < H < 0.5$  corresponde a un comportamiento anti persistente que se caracteriza por un mayor contenido de alta frecuencia cercano a cero.

En los datos obtenidos del Exponente de Hurst = 0.4076086 en la rata control, se observa que un valor cercano al rango de 0.5 indica una mayor caoticidad y por ende una mejor respuesta en el sistema biológico de estudio, esto se puede corroborar visualizando la estructura obtenida del atractor extraño de la rata Wistar control que presenta una estructura con una elevada irregularidad y rugosidad en la trayectoria que esta proyecta.

Al realizar la comparación con el exponente de Hurst = 0.1229858 el cual se aleja del 0.5 y cercano a cero, indica una mayor linealidad la cual se debe a que la estructura del Atractor extraño presenta una estructura de menor irregularidad y rugosidad, por lo tanto se detecta un daño en el sistema biológico de estudio, como antes se mencionó este parámetro ratifica el comportamiento del Atractor extraño a lo largo del tiempo permitiendo cuantificar el daño cardiaco obtenido en rata Wistar.

### **Análisis de Plot de recurrencia visual**

Otro método que se utilizó para confirmar los resultados por método comparativo entre rata Wistar control y rata Wistar de estudio es el de recurrencia visual.

El gráfico de recurrencia visual es un conjunto de puntos en un cuadro de dimensión donde los ejes o los lados del cuadrado representan una secuencia cronológica de los vectores en un espacio. En dicho gráfico al valorar claramente los segmentos paralelos a la bisectriz obtenida indican una alta periodicidad, por lo tanto el gráfico de recurrencia es un procedimiento cualitativo para diferenciar un sistema lineal, cuasi periódico, caótico o estocástico.

Al analizar el Plot de recurrencia visual de rata Wistar control se observa que las líneas paralelas no son del mismo grosor y tamaño, así mismo también se visualiza una diversa gama de colores oscuros cuyo comportamiento representa caoticidad, que indican el buen funcionamiento del órgano (corazón). Al realizar un aumento ó

un zoom del 40% en la diagonal superior e inferior se denota un comportamiento de puntos, líneas y colores irregulares denotando que existe un comportamiento caótico.

Al comparar el Plot obtenido de la rata Wistar sana con el de la rata Wistar con daño cardiaco, se observa que en el Plot de recurrencia visual existen colores tenues, lo cual indica líneas delgadas y repetitivas que se pueden observar en mayor proporción y con tendencia a un comportamiento paralelo. Al realizar el zoom se confirma su comportamiento demostrando una linealidad y periodicidad; indicando la presencia del daño en musculo cardiaco.

## 16.- CONCLUSIONES

El comportamiento del atractor extraño, parámetros cuantitativos, cualitativos y métodos de comparación obtenidos del procesamiento de los datos bioeléctricos del músculo cardíaco de ratas Wistar con daño patológico en el miocardio exhibe un comportamiento altamente periódico el cual se corrobora al compararlos con el atractor extraño y demás parámetros de una rata Wistar sana o blanco, cuyo comportamiento y valores numéricos son característicos de una evolución caótica sinónimo de salud.

La aplicación de la dinámica no lineal es una nueva herramienta que permite estudiar a mayor profundidad el comportamiento de los sistemas biológicos complejos; al utilizar un incremento superior a la información electrofisiológica que se maneja en el sector salud obteniendo una mayor precisión y evolución en el comportamiento: periódico, caótico, cuasiperiódico, aperiódico, estocástico y periódico-caótico del sistema de estudio, fortaleciendo el diagnóstico clínico a través de los parámetros que soportan la estructura del atractor extraño o diagrama espacio fase.

La utilización de ratas Wistar en laboratorio son un excelente espécimen para obtener y comprobar el comportamiento de los datos experimentales electrocardiográficos, las cuales permiten observar si existe una patología en el miocardio o el grado de daño en este.

Al presentar algún daño, uno de los parámetros que permite corroborar es la estructura del atractor extraño y sus parámetros semicualitativos y cuantitativos.

## 17.-PROYECCIONES

A finales del siglo XIX la tecnología se basaba solo en la matemática clásica y en la geometría euclidiana no permitiendo el estudio de la existencia de los sistemas complejos cuyo comportamiento no era lineal y no cumplía con la expectativa de la geometría clásica. Sin embargo con la evolución de la matemática y la física hoy se cuenta con técnicas más especializadas que ayudan y soportan el estudio de estos sistemas, cuya estructura geométrica puede ser interpretada por la geometría fractal. Así mismo esta teoría puede aplicarse al estudio de diversos sistemas complejos biológicos y no biológicos.

La teoría del caos es una ciencia que permite estudiar los sistemas biológicos en animales de laboratorio y extrapolar los resultados a seres humanos beneficiando con ello la calidad de vida de los mismos y obtener una disminución en el impacto social, económico, ambiental, nutricional, neurológico reflejándose en el óptimo o mal funcionamiento del miocardio.

Es por ello que al trabajar con animales de laboratorio (ratas Wistar) permite extrapolar este estudio a nivel humano debido a la similitud que existe entre los genomas.

El resultado de esta investigación manifiesta que hay nuevas herramientas que fortalecen el diagnóstico en seres vivos y así poder detectar, prevenir, controlar las patologías cardíacas antes de que evolucionen provocando un mayor daño.

Es vital que el sector salud acepte el beneficio de la medicina alternativa (CMLF) y el avance científico-tecnológico como complemento en la posología de la patología en el paciente.

## 18.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Angol, M. (2003). "Conceptos Universales en Física no lineal, caos y fractales. Rev. Esp. Fis. Vol. 17, No. 5
2. Angol, M. (2005). Dinámica no Lineal: Orígenes y Futuro. Rev. Esp. Fis. Vol. 19, No. 9.
3. Arnold, V. (1988). Mecánica clásica. Métodos matemáticos. Ed.: Ediciones Paraninfo. Madrid, España.
4. Belairer J. (2001). Recurrence Plots in Nonlinear Time Series Analysis: Free Software. Ed. Universidad de Valencia. España.
5. Bertalanffy, L. (1968) Teoría General de Los sistemas. Ed. Fondo de la Cultura Económica. México.
6. Canals, L. (2005). Rev. Med. Chile. Geometría de los sistemas vivos e importancia en medicina. v.133 n.9. Santiago de Chile
7. Carabello, T., Kloeden, P., Langa, J. (2001). Departamento de ecuaciones diferenciales y análisis numérico, España
8. Carbajal, R., Caminal, P. (200) XXI. Rev. Mex. Ing. Biomed. Análisis no lineal de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en casos normales y cardiopatías. Vol. 21. No. 2 México.
9. Cuestas E. (2010). Análisis de Variabilidad de los Sistemas Complejos Utilizando Entropía Aproximada. Revista de la Facultad de Ciencias Médicas. 67 (2). España.
10. De Capello, M. Pérez , V. (1981). Biología 3, Buenos Aires Argentina.
11. De la peña, L. (2006). Introducción a la mecánica cuántica 3ª edición. D.F. Fondo de la cultura económica. México.
12. Devaney, R. L. (1990). (Ed.) Addison-Wesley. P. Chaos, Fractals and Dynamics: computer experiments in mathematics. Ed. Edisson-Wesley California.
13. Enciclopedia autodidactica Océano. Tomo III.
14. Enciclopedia Hispánica, Edición 3, Tomo 8, Buenos Aires 1994

15. Espinosa A. (2014) Differentiation of Astronomy: Self-descriptions and Heliocentric Conception on the Horizon of World Society. Revista Mad. No 31. Chile.
16. Falconer K. "Fractal Geometry: mathematical foundations and applications" (2ed. Wiley 2003)
17. Falconer K. "The Geometry of Fractal Sets" (Cambridge University Press 1985)
18. Feigenbaum, M. (1978). "Quantitative Universality For a class of Nonlinear Transformations", J. Stat. Phys.
19. Feigenbaum, M. (1979). "The Universal Metric Properties of Nonlinear Transformations" J. Stat. Phys.
20. Flores P. Infante O. (2002). "Detección de Signos Vitales en Ratas Mediante Métodos No Invasivos". Revista Veterinaria México. Vol. 33 No.2 México.
21. Freedman, Y. (2013). Física universitaria U.N.A.H
22. Gallego V. (2010) Aplicación de la teoría de caos para el análisis y pronóstico de series de tiempo financieras en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ingeniería Administrativa
23. González, J. R. Tutorial de Electrocardiograma. Servicio de cardiología UCC Complejo Hospitalario Universitario de Santiago de Compostela.
24. Gonzalez, M. (2004) Synchronization and control of Chaos. An introduction for scientists and engineer. Ed. Imperial College Press. Londres. Inglaterra.
25. Gran Larousse Universal. Tomo 19. 3º ED. Ed. Larousse. México.
26. Hasting, M., Sugihara, G. (1993). Fractals, a user's for the natural sciences. Oxford University. Ed Press Oxford. California.
27. Institute for Laboratory Animal Research. (1988). "Use of Laboratory Animals in Biomedical and Behavioral Research", The National Academies Press, Also see Cooper, Sylvia.
28. Jorge, B. (2001). Recurrence Plots in Nonlinear Time Series Analysis: Free Software. Departamento de Análisis Económico. Valencia (España)
29. Julián D. G. y col. (2005) *Cardiology*, 8th Ed. Philadelphia: WB Saunders.
30. Lacomba, E. (2000) UAMI. Los sistemas dinámicos, ¿Qué son y para que sirven? México, México Miscelánea matemática núm. 32 vol. 50

31. Larios, B., Castillo, L. (2007), Teoría del Caos. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras.
32. Lederer WJ. Cardiac electrophysiology and the electrocardiogram. En Boron WF, Boulpaep EL (Ed), *Medical Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders, 2003.
33. Liotta, D. (1988) (Ed.) Corregidor. Anatomía, Fisiología, Fisiopatología en la Practica Medica Vol. I Buenos Aires, Argentina.
34. López A. Camacho C. (2001). El Grafico de Recurrencia de Análisis de Series Temporales: El Programa VRA. Revista Electrónica de Metodología Aplicada. Vol:6 No. 1. Sevilla (España)
35. López, A. M. Etal. (2001). (Ed.) Revista Electrónica de Metodología Aplicada. Vol. 6 no.
36. López, L. (2004) cuántica y relatividad
37. Martínez, F. (2009). La física a través del tiempo
38. Melendez, R., Melendez, E. (1999). The Fractal Structure of Glycogen: A Clever Solution to Optimize Cell Metabolism. *Biophysical Journal*. Vol. 77, No. 3
39. A, Miguel. (2003). "Conceptos Universales en Física No Lineal: Caos y Fractales. Japan Prize 2003", *Rev. Esp. Fis.* 17, 5
40. Miguel A. (2005). Dinámica No Lineal: Orígenes y Futuro. Ed. Rever. Madrid (España).
41. Mosterin, J. (1982). Kant como filósofo de la ciencia. *Henraonar*. Vol. 4. p.p 11-22
42. Océano Uno, diccionario enciclopédico ilustrado (2006). Ed. Océano. México.
43. Otero Carvajal, (2007). "La Teoría cuántica y la discontinuidad en la física". *Rev. Umbral*, Facultad de Estudios Generales de la Universidad de Puerto Rico, recinto de Rio Piedras.
44. Ott, E. (2002). *Chaos in Dinamical Systems*. 2º Ed. Cambridge University Press. New. York.
45. *Beeson, P. Mcdermott, W.* (1972). *Tratado de Medicina Interna*. Ed. Interamericana. Buenos Aires, Argentina.
46. Peitgen; Jurgens; Saupe. (1991). *Fractals for the classroom*. Springer-Verlag. Vol. I, (1992) Vol. II.

47. Poveda, G. (1997). Atractores extraños (caos) en la Hidro - climatología de Colombia. Rev. de la Academia de Colombia No. 21 (81) Colombia
48. R. M. May, (1976) "Simple Mathematical Models with Complicated Dynamics", Nature 261, 459
49. Rañada, A. F. (1988). "Phenomenology of chaotic motion", Methods and applications of non-linear dynamics. Edited. by A. W. Saenz (World Scientific Singapur).
50. Regan, T. (2006). ISBN. *Jaulas Vacías. El Desafío de los Derechos de los Animales*. Publicado por Fundación Altarriba. Barcelona.
51. Sánchez, C. (1984), Historia de la física. Ed. Esfinge, México
52. Schiffer. I. (1996). La Ciencia del Caos. Ed. Fondo de Cultura Económica. México
53. Schmitt, dt. (2007). Fractal scale-invariant and no linear properties of cardiac dynamics remains stable with advanced age: A new mechanistic picture of cardiac control in healthy elderly. Rev. America Journal Physiol Regul Integr Comp Physiol. Vol 293. No 5. U.S.A.
54. Sobrino, P. et al (2003) Teoría del Caos y Efecto Mariposa. Universidad de Ada, A. Byron, Perú"
55. Torres, D. (2006) Teoría del Caos en los Sistemas biológicos. Universidad de la Laguna Med. Chile.
56. Trilla, A, (1998). El caos y la predicción médica. Rev. Medicina Clínica. Vol 110. No. 16. Barcelona.
57. Udias, A. (2004). Historia de la física: de Arquímedes a Einstein. Ed. Síntesis. España
58. Vulpiani, A. (2000) caos determinístico.
59. (Meléndez, Meléndez., Meléndez-Hevevia, E. Canela, E. I.(1999) The fractal structure of glycogen: a clever solution to optimize the cell metabolism. *Biophysical Journal* 77,1327-1332
60. [http://casanchi.com/mat/03\\_gfracta01.pdf](http://casanchi.com/mat/03_gfracta01.pdf)
61. <http://definicion.de/fractal/#ixzz2kfp6lFKQ>
62. <http://fisicaulvio.blogspot.mx/p/fisica-en-los-siglosxvi-y-xvii.html>
63. [http://www.vetjg.com/shared/php/page.php?page=artic\\_peq\\_medicina\\_rata](http://www.vetjg.com/shared/php/page.php?page=artic_peq_medicina_rata) Por qué utilizar ratones para experimentación?



64. <http://www.xatakaciencia.com/matematicas/que-son-los-fractales-y-como-se-construyen>
65. <http://ztfnews.wordpress.com/2013/04/22/atractores-extranos>
66. [http://www.oni.escuelas.edu.ar/2002/buenos\\_aires/infinito/fractal.htm#Órbita](http://www.oni.escuelas.edu.ar/2002/buenos_aires/infinito/fractal.htm#Órbita)
67. [www.revistasefinge.com/filosofía/filósofos/itemlist/user/1017-francescxaviercapacet](http://www.revistasefinge.com/filosofía/filósofos/itemlist/user/1017-francescxaviercapacet)

## 19.- ANEXOS

### **EXPONENTE DE HURST: RELACION CUANTITATIVA**

Exponente de Hurst	
Rata Wistar blanco	Ratas Wistar con daño
0.4076086	0.1257108
	0.1283129
	0.1405264
	0.1792337
	0.182493
	0.1906823

Tabla comparativa del individuo blanco vs individuos que presentan daño cardiaco. Obsérvese que no existe en los individuos de estudio valores que tiendan acercarse a el valor de referencia de 0.5 el cual indica caoticidad.

### **ASIMETRIA: RELACIONA LINEALIDAD VS CAOTICIDAD**

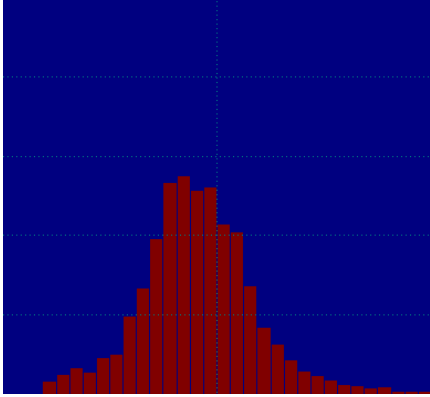
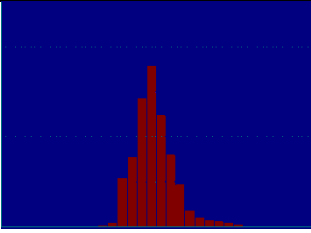
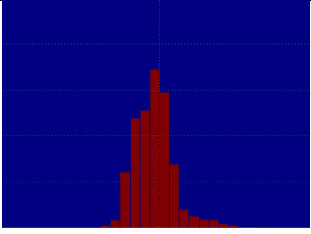
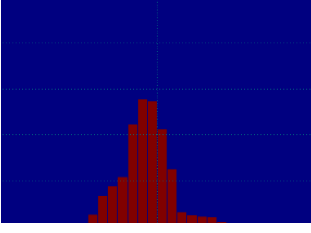
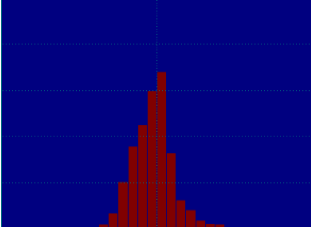
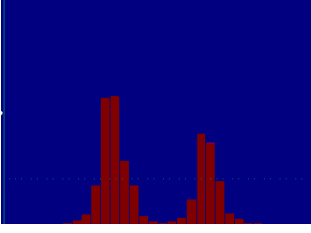
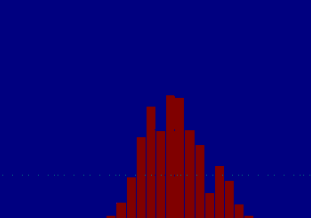
Asimetría	
Rata Wistar Blanco	Ratas Wistar con daño
0.2633	1.9299
	0.8002
	0.4007
	0.6130
	0.3003

Tabla de Asimetría. Permite comparar la asimetría de los individuos de estudio, observando que al encontrarse valores menores a la unidad tienden a presentar una asimetría negativa la cual denota la reunión de estos valores en la parte derecha de la media, lo cual indica una linealidad en los individuos con daño

### **CURTOSIS:**

Curtosis	
Rata Wistar Blanco	Ratas Wistar con daño
0.9601	0.9647
	1.6484
	1.0172
	3.7123
	0.8531

Tabla de Curtosis: se observa que los valores obtenidos de los individuos enfermos tienden a sobrepasar la unidad indicando una distribución Platicúrtica, la cual presenta picos más bajos que una Distribución Normal y Colas ligeras, demostrando la existencia de linealidad en el sistema biológico de estudio.

<b>Probabilidad de Distribución</b>	
<b>RATA Wistar blanco</b>	<b>Ratas Wistar con daño</b>
	
	
	
	
	
	

Comparación de diagrama de Probabilidad de Distribución de Rata Wistar Blanco vs Ratas Wistar Enfermas, se visualiza distribuciones con datos aglomerados hacia la derecha al igual que las colas de los datos de los individuos con daño cardiaco.

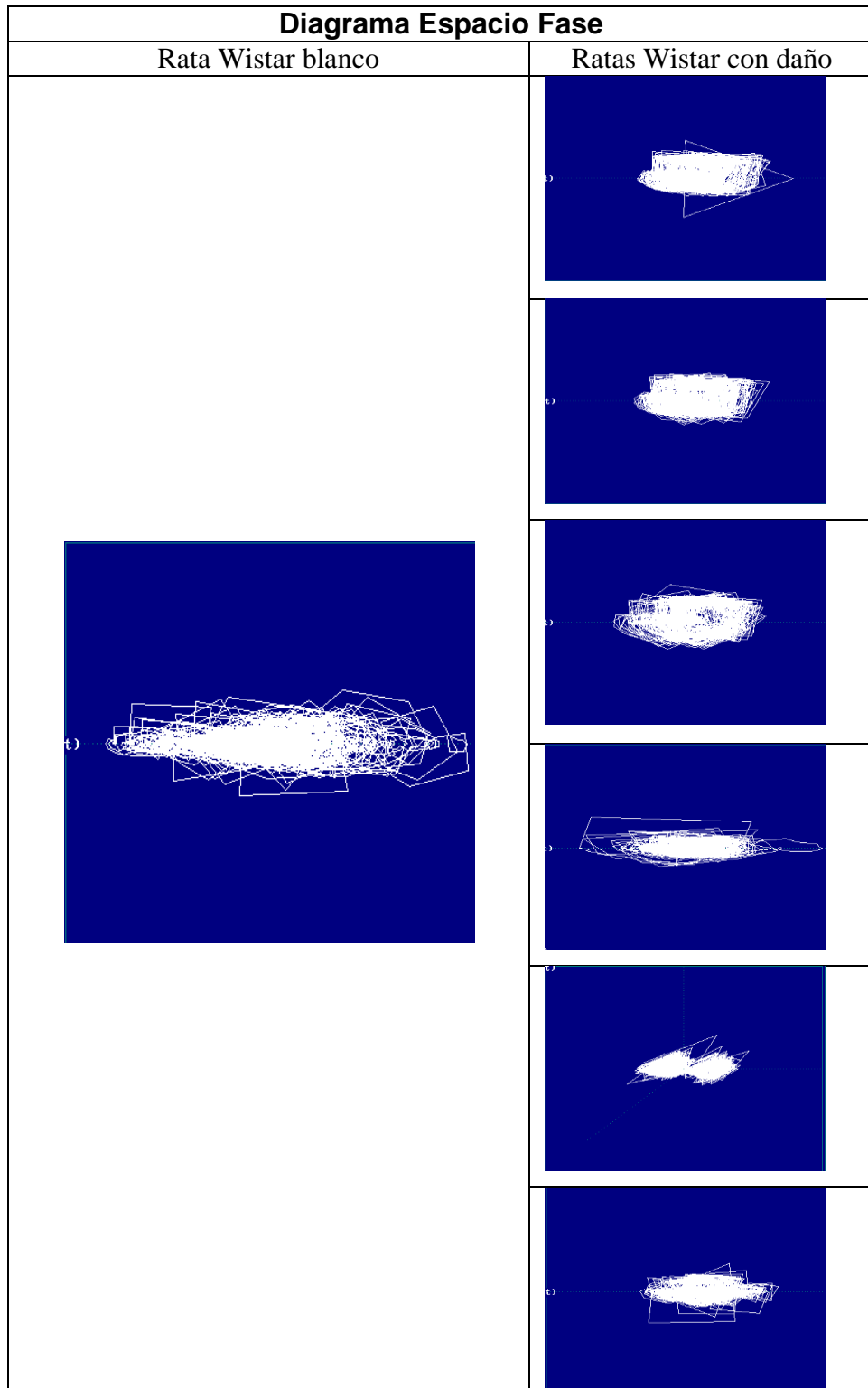


Grafico Diagrama Espacio Fase (atractor); muestra el comportamiento de los sistemas biológicos de estudio con daño vs sin daño, corroborando la existencia de una linealidad en los individuos de estudio con daño cardiaco.

## EVOLUCION DE ATRACTOR EXTRAÑO

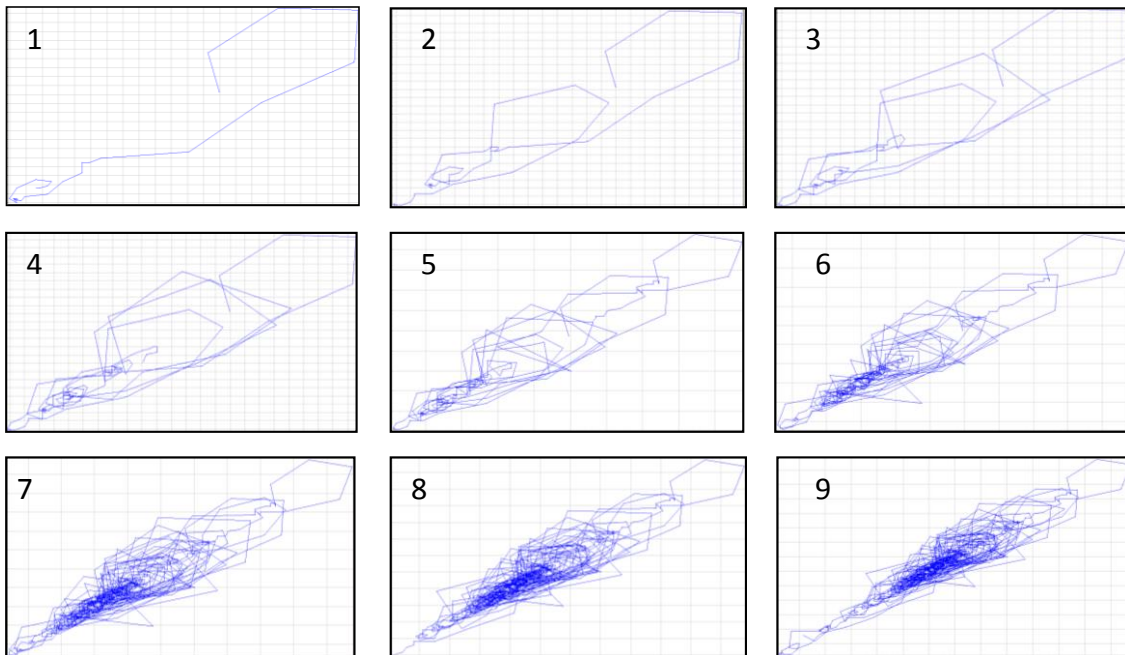


Imagen de la evolución del Atractor Extraño de Rata Wistar Blanco, se observa la alta caoticidad presente.

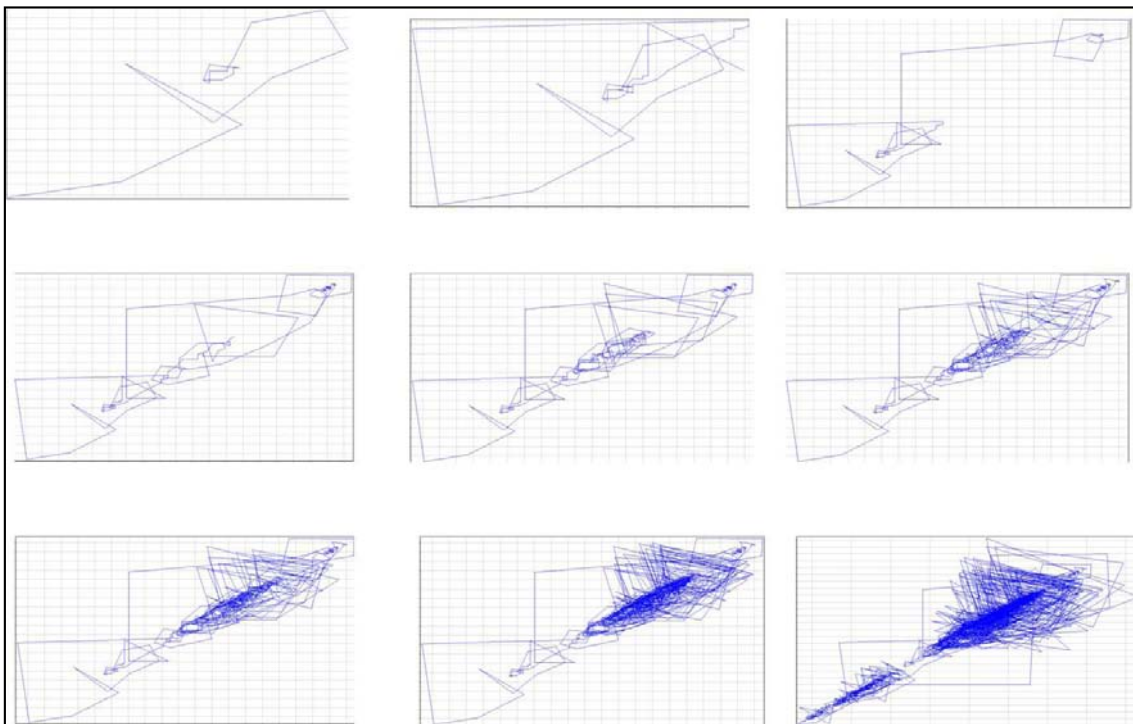


Imagen de la evolución del atractor extraño de Rata Wistar 1 con daño cardiaco en donde se observa la formación de líneas que forman figuras geométricas que indican una alta linealidad.

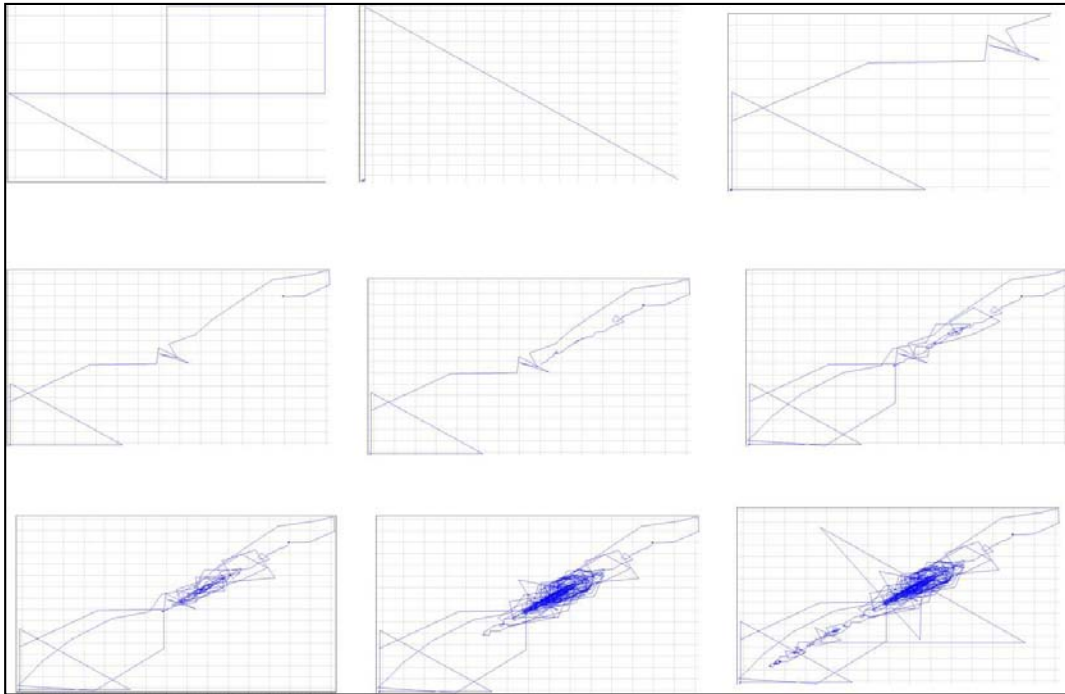


Imagen de la evolución del atractor extraño de Rata Wistar 2 con daño cardíaco, se observa la formación de líneas que forman figuras geométricas que indican una alta linealidad con una ligera caoticidad.

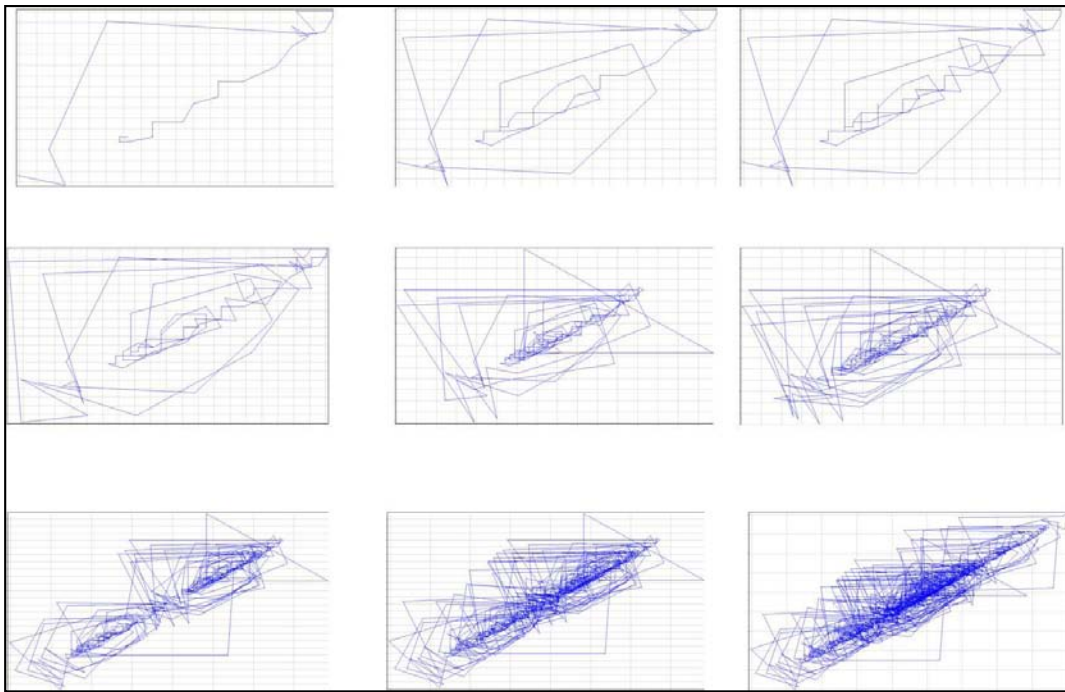


Imagen de la evolución del atractor extraño de Rata Wistar 3 con daño cardíaco en donde se visualiza alta formación de figuras geométricas que indican una alta linealidad.

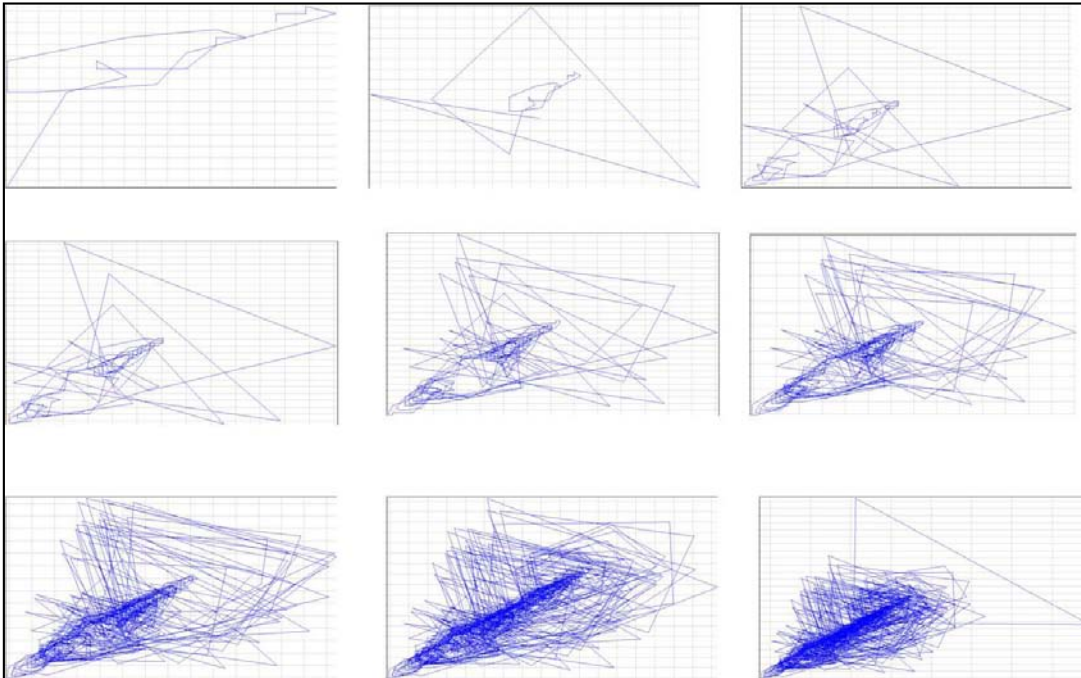


Imagen de la evolución del atractor extraño de Rata Wistar 4 con daño cardiaco en donde se observan figuras geométricas que se replican obteniendo un atractor de forma lineal.

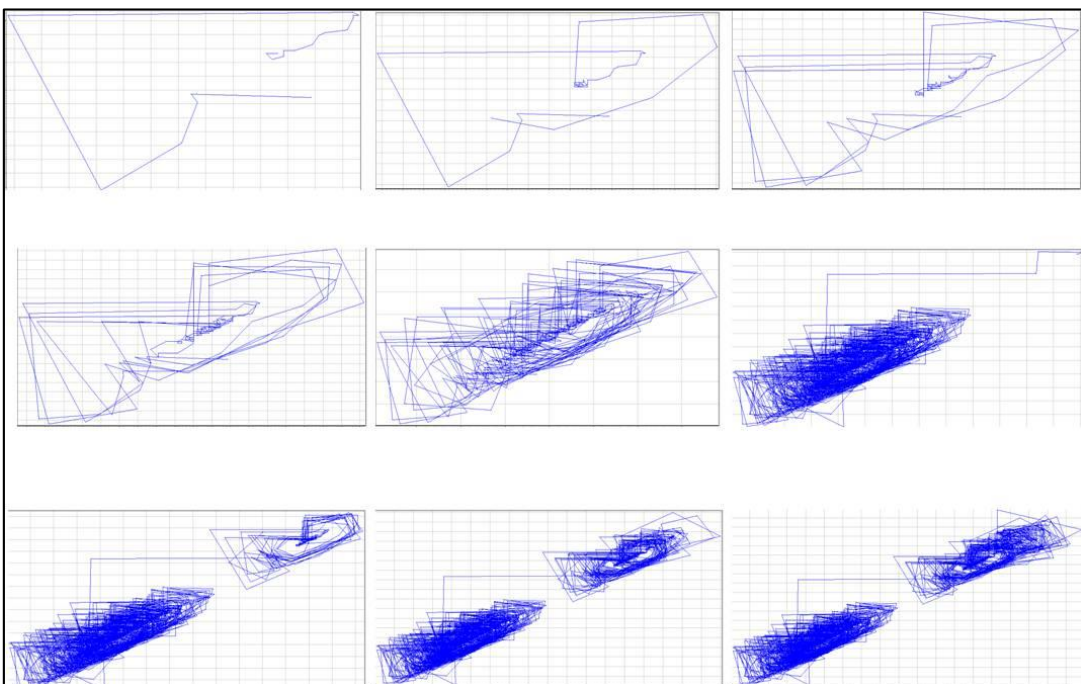


Imagen de la evolución del atractor extraño de Rata Wistar 5 con daño cardiaco en donde se observa la formación de estructuras semejantes que forman figuras geométricas que indican una alta linealidad con baja caoticidad.

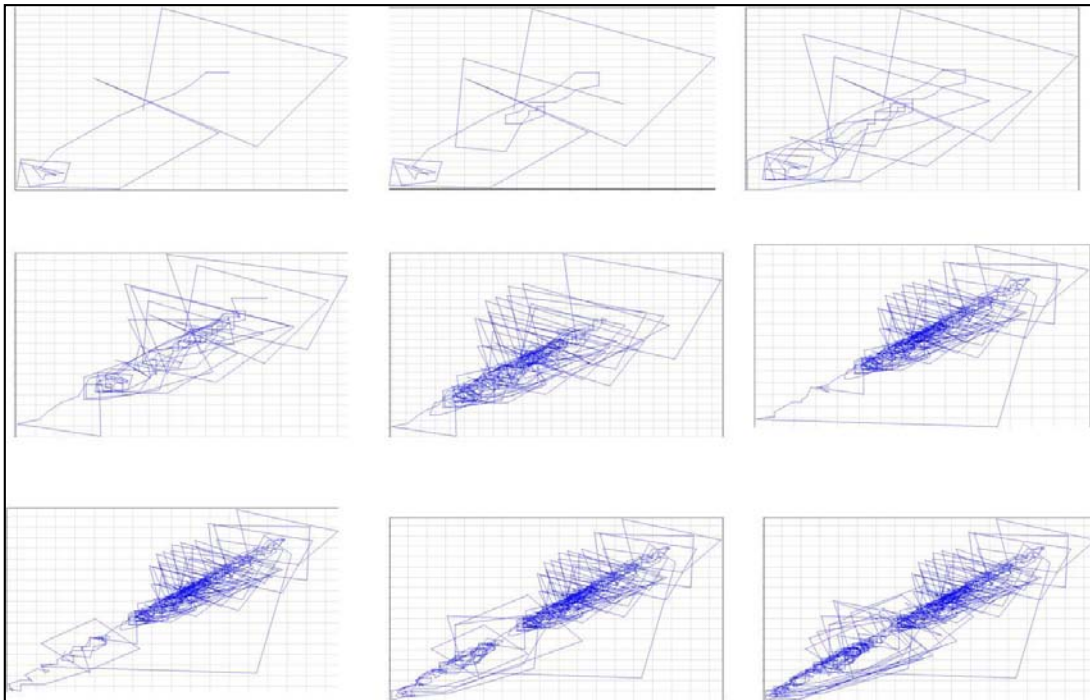
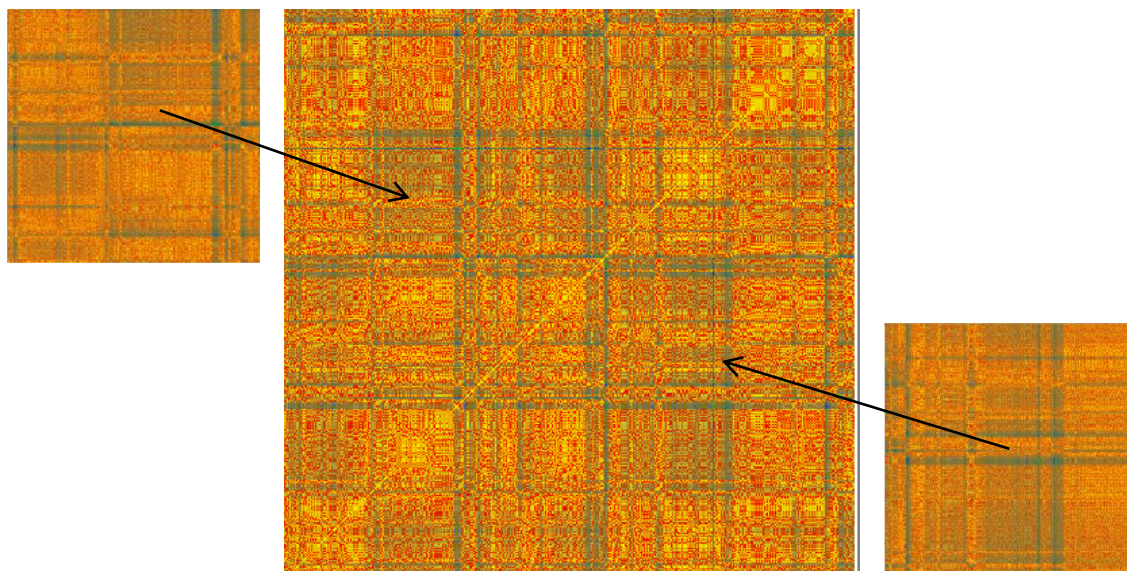


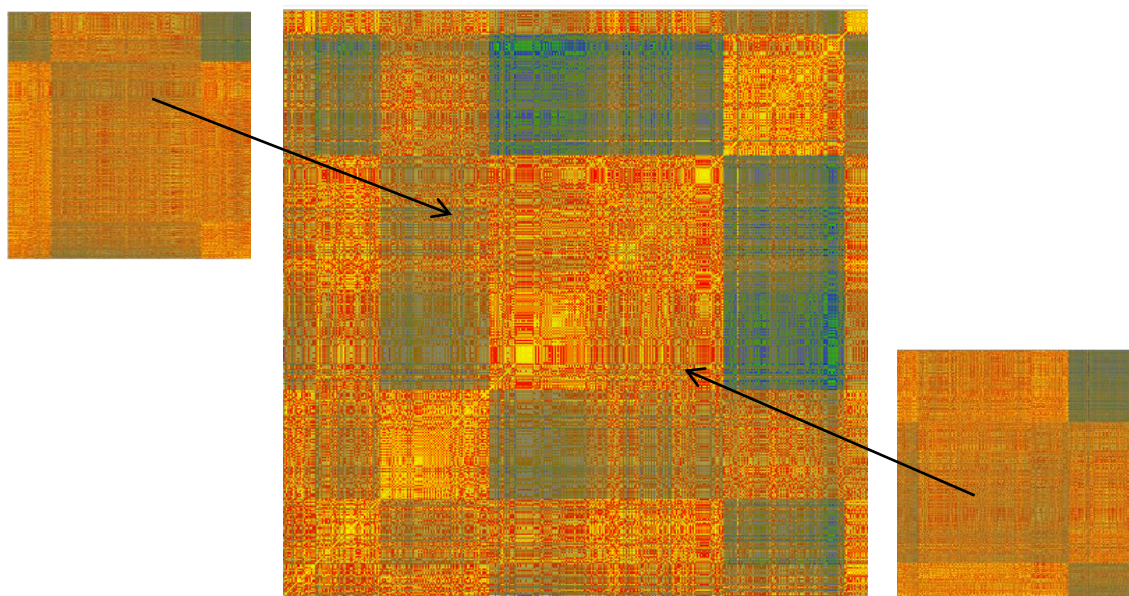
Imagen de la evolución del atractor extraño de Rata Wistar 6 con daño cardíaco en donde se forman figuras geométricas que indican una elevada periodicidad.



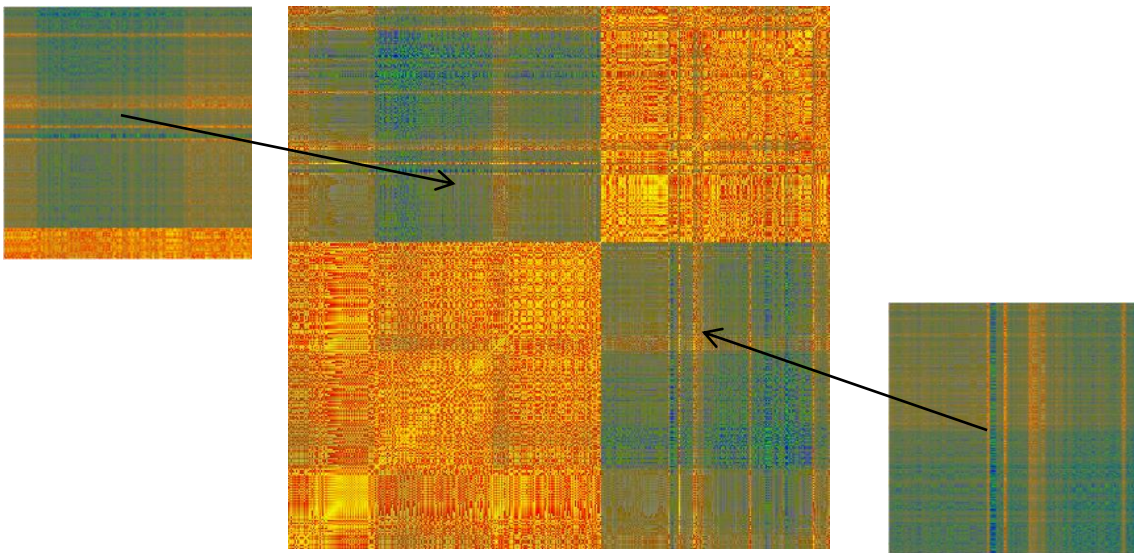
## TRAMA DE RECURRENCIA



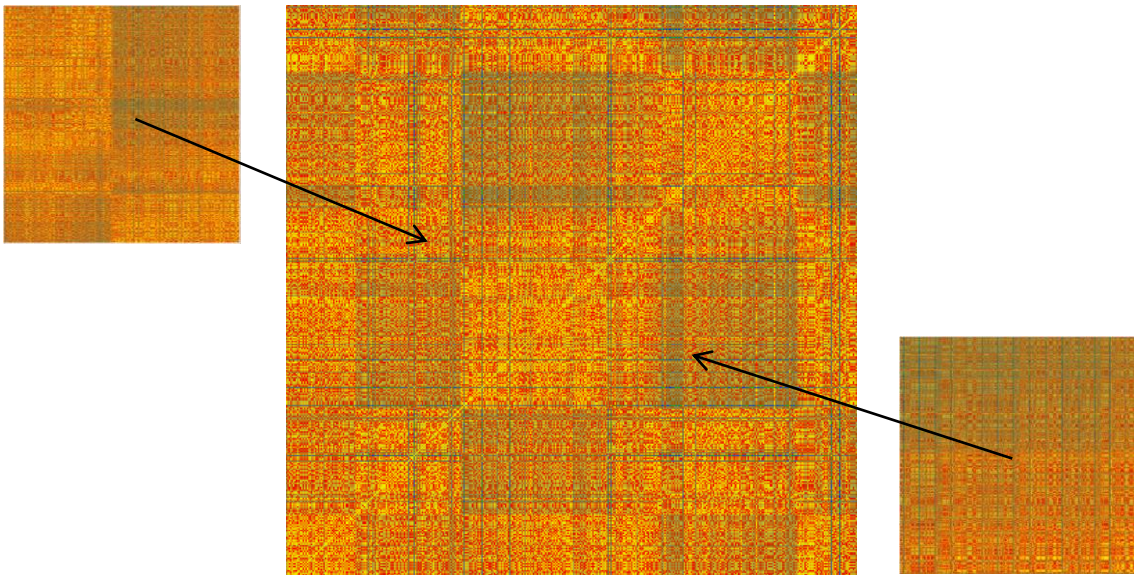
Plot de recurrencia visual de Rata Wistar Blanco



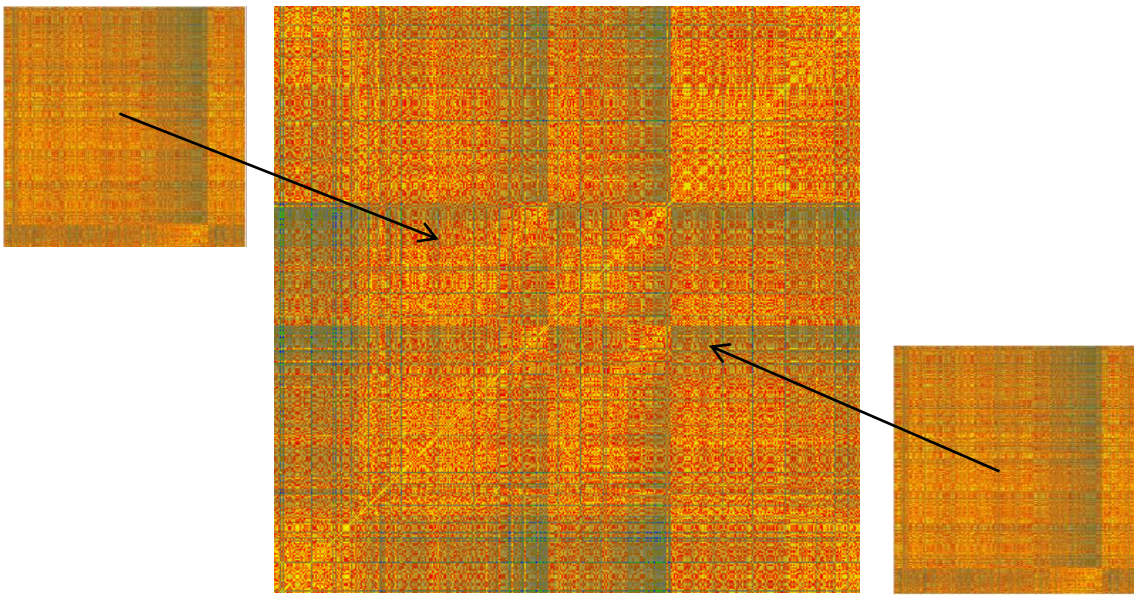
Plot de recurrencia visual de Rata Wistar con daño 1



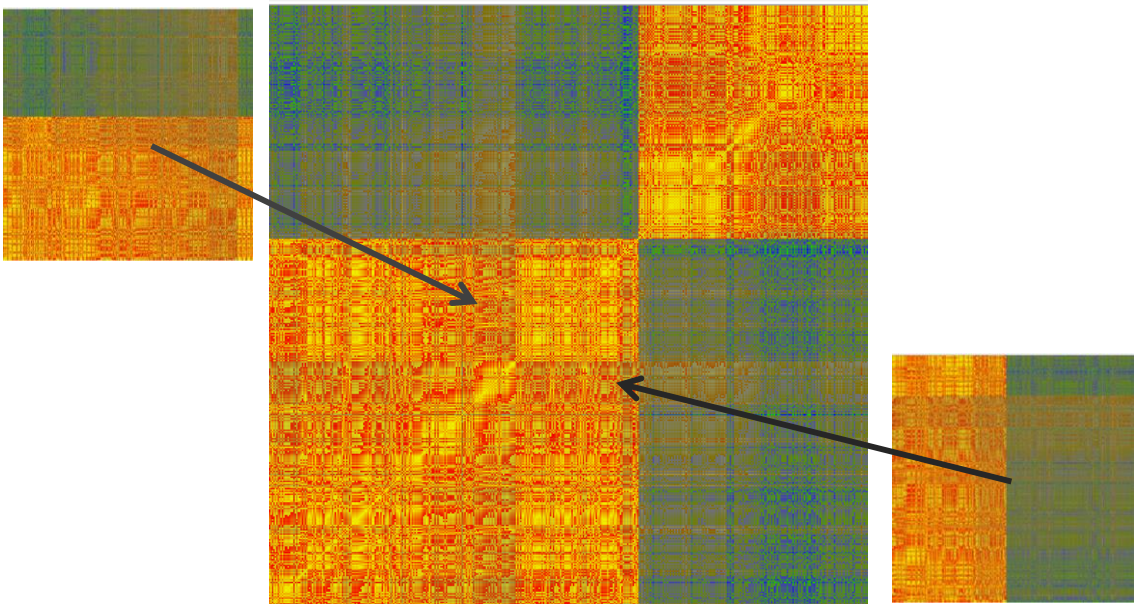
Plot de recurrencia visual de Rata Wistar con daño 2



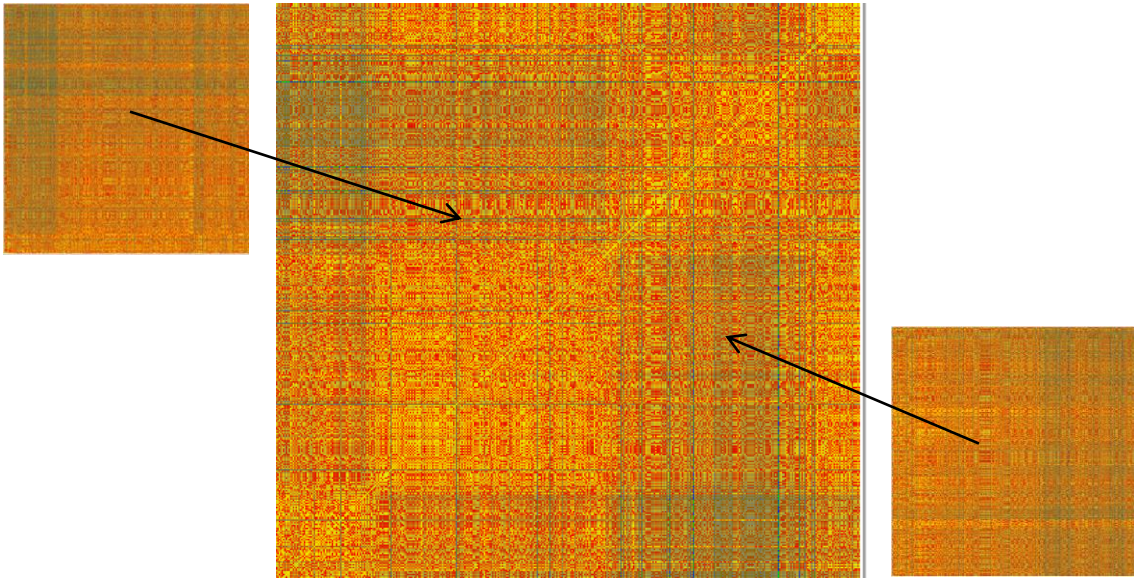
Plot de recurrencia visual de Rata Wistar con daño 3



Plot de recurrencia visual de Rata Wistar con daño 4



Plot de recurrencia visual de Rata Wistar con daño 5



Plot de recurrencia visual de Rata Wistar con daño 6