



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN C.1**

**TRATAMIENTO CON CAMPO MAGNÉTICO EN PACIENTES  
DIAGNOSTICADOS CON EPILEPSIA CARACTERIZADOS  
MEDIANTE LA TEORÍA DEL CAOS.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO**

**PRESENTA:**

**CESAR JULIO XICOTÉNCATL ROJAS**

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



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

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

Tratamiento con campo magnético en pacientes diagnosticados con epilepsia caracterizados mediante la Teoría del Caos.

Que presenta el pasante: Cesar Julio Xicotencatl Rojas

Con número de cuenta: 088280156 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 09 de Octubre de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en C. Soledad Carreto García	
VOCAL	Q.F.B. Martha Patricia Zúñiga Cruz	
SECRETARIO	Q.F.B. Héctor Coss Garduño	
1er. SUPLENTE	Dra. Esther Agacino Valdés	
2do. SUPLENTE	Q.F.B. Verónica Ruiz Solorio	

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

IHM/mmgm\*

## AGRADECIMIENTOS

A DIOS por permitirme vivir una de las experiencias más enriquecedoras de mi vida.

A la UNAM por formarme como profesional y permitirme conocer a mucha gente importante durante estos años, es una satisfacción y un orgullo pertenecer a la máxima casa de estudios.

A mi asesora de tesis M. en C. Soledad Carreto García por todo el apoyo y consejos brindados durante la realización de este trabajo y abrirme la puerta hacia un campo nuevo de investigación que cambio mi vida.

A mis profesores de FES Cuautitlán por compartir todo su tiempo, conocimiento y paciencia.

A mi familia por el apoyo obtenido durante la terminación de la carrera, sin ustedes esto no podría haberse logrado.

A Juana Jasso Huerta por todos esos buenos momentos que pasamos y los que no también e indudablemente por ser una gran amiga y compañera de carrera hasta el final de este camino en la FESC.

A mis amigos Sandra, Rosa, Gabino, Dulce, Gina; por vivir esta gran experiencia juntos, no hubiera sido lo mismo sin ustedes.

A Lety Cubillo Carrillo por toda la comprensión, el amor y el apoyo brindado durante la realización de este trabajo; tú sabes lo importante que eres y serás para mí.

Y por último a mí mismo, sé que suena hilarante, pero sin mis ganas y mi necesidad no lo hubiera podido lograr. ☺

**ESTE TRABAJO SE REALIZO EN EL LABORATORIO DE DINAMICA  
NO LINEAL DE SERIES DE TIEMPO ELECTROFISIOLOGICAS, FES  
CUAUTITLAN CAMPO 1 A CARGO DE LA PROFESORA M. EN C.  
SOLEDAD CARRETO GARCÍA**

# INDICE

GENERALIDADES.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
HISTORIA DE LA TEORÍA DEL CAOS.....	5
Teoría del caos.....	7
ATRACTORES.....	9
Tipos de atractores.....	10
Punto fijo.....	10
Ciclo límite.....	11
Toro límite.....	11
Atractor extraño.....	11
FRACTALES.....	12
Tipos de fractales .....	13
Fractales lineales.....	14
Fractales no lineales.....	14
DINÁMICA NO LINEAL.....	16
Sistemas dinámicos.....	19
Sistemas Lineales y No Lineales.....	20
SERIES DE TIEMPO.....	22
PARÁMETROS DE LA DINÁMICA NO LINEAL.....	23
Probabilidad de Distribución.....	24
Diagrama Espacio Fase.....	25
Exponente De Hurst (H).....	26

El Exponente de Hurst y la Dimensión Fractal.....	27
Exponente de Lyapunov (L).....	28
Dimensión de Correlación.....	29
Dimensión de Capacidad.....	31
Espectro de Potencia.....	31
Transformada Rápida de Fourier.....	33
Clasificación del Espectro de Potencia:.....	33
Frecuencia Dominante.....	34
ANÁLISIS DE RECURRENCIA VISUAL.....	35
Gráficos de recurrencia.....	36
SISTEMAS BIOLÓGICOS.....	37
Componentes principales de un sistema biológico.....	38
SISTEMA NERVIOSO.....	40
El Sistema Nervioso Periférico.....	41
Sistema nervioso central.....	42
Médula Espinal.....	43
Encéfalo.....	43
Bulbo raquídeo.....	43
Cerebelo.....	43
El tronco del encéfalo o tronco cerebral.....	44
Cerebro.....	45
Sistema Límbico.....	47
FUNCION DE LOS HEMISFERIOS.....	48

Hemisferio Izquierdo.....	49
Hemisferio derecho.....	50
NEURONAS.....	50
Composición de la neurona.....	52
EPILEPSIA.....	53
Clasificación internacional de las crisis epilépticas.....	54
Crisis generalizadas.....	54
Descripción clínica de las crisis convulsivas generalizadas.....	55
Descripción clínica de las crisis generalizadas no convulsivas.....	56
Crisis Parciales.....	56
Descripción clínica de las crisis parciales simples.....	57
Las manifestaciones clínicas de las crisis parciales simples.....	57
Descripción de las crisis parciales complejas.....	58
ANTIPILEPTICOS.....	58
Mecanismos de acción.....	60
Efectos secundarios.....	61
Efectos secundarios en los fármacos de 1ª generación.....	62
Efectos secundarios en los fármacos de 2ª generación.....	62
Efectos secundarios en los fármacos de 3ª generación.....	63
ELECTROENCEFALOGRAMA (EEG).....	63
Descripción detallada del EEG.....	64
Cómo leer el Electroencefalograma.....	65
Tipos de Montajes.....	66



CAMPO MAGNÉTICO.....	67
El Campo Magnético Terrestre.....	68
Biofísica del Campo Magnético.....	69
Efectos Biológicos.....	70
Aplicación del campo magnético en la Medicina.....	72
OBJETIVOS.....	77
Objetivo general.....	77
Objetivos Particulares.....	77
METODOLOGÍA.....	78
DIAGRAMA DE FLUJO.....	79
RESULTADOS.....	80
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
CONCLUSIONES.....	101
PROYECCIONES.....	102
PERSPECTIVAS.....	102
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA MAGNETOTERAPIA.....	103
COSTOS.....	104
COMPARACION CON OTROS METODOS TRADICIONALES.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXO.....	112

## INDICE DE FIGURAS

Fig.1 Atractor de Punto Fijo.....	10
Fig.2 Atractor Ciclo Límite.....	11
Fig.3 Atractor Toro Límite.....	11
Fig.4 Atractor de Lorentz.....	12
Fig.5 Fractales Lineales.....	14
Fig.6 Fractales No Lineales.....	14
Fig.7 Fractal Plasmático.....	15
Fig.8 Campana de Gauss.....	24
Fig.9 Atractor Extraño.....	25
Fig.10 Secuencia de los espectros de potencia.....	32
Fig.11 Clasificación del Espectro de Potencia.....	33
Fig.12 Clasificación de Frecuencia Dominante.....	35
Fig.13 Sistema Nervioso.....	40
Fig.14 Sistema Nervioso Central.....	42
Fig.15 Funciones de la corteza Cerebral.....	47
Fig.16 Estructura del Cerebro.....	48
Fig.17 Partes de la neurona y sinapsis.....	52
Fig.18 Sinapsis Neuronal.....	54
Fig.19 Crisis generalizada (ataque epiléptico tónico – clónico).....	55
Fig.20 Crisis generalizadas.....	56
Fig.21 EEG Normal vs. Crisis Parciales.....	57
Fig.22 Electrodo dispuestos a nivel de la piel.....	64
Fig.23 Tipos de Ondas Cerebrales.....	64
Fig.24 Electroencefalograma.....	65
Fig.25 Localización cerebral.....	66
Fig.26 Montaje Transversal.....	67
Fig.27 Montaje Longitudinal.....	67
Fig.28 Montaje Referencial.....	67
Fig.29 EEG obtenido de paciente sin daño aparente.....	80

Fig.30 EEG obtenido de paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.....	80
Fig.31 EEG obtenido de paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF.....	80
Fig. 32 Grafica de probabilidad de distribución, Campana de forma Leptocúrtica en Paciente Blanco.....	81
Fig. 33 Grafica de probabilidad de distribución, de forma Platicúrtica de Paciente con Daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.....	81
Fig.34 Grafica de probabilidad de distribución de forma Leptocúrtica en Paciente con Daño epiléptico después de la terapia de CMBF.....	81
Fig. 35 Grafica de atractor extraño de paciente Blanco.....	83
Fig. 36 Grafica de atractor extraño de paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.....	83
Fig. 37 Grafica de atractor extraño de paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF.....	83
Fig. 38 Falsos Vecinos Cercanos individuo Blanco.....	85
Fig. 39 Falsos Vecinos Cercanos paciente con epilepsia.....	85
Fig. 40 Falsos Vecinos Cercanos paciente con epilepsia después de tomar la terapia de CMBF.....	85
Fig.41 Trama de recurrencia visual inicial del Individuo blanco.....	86
Fig.42 Trama inicial del Paciente con epilepsia.....	86
Fig.43 Trama de recurrencia visual del Paciente después de recibir la terapia de CMBF.....	87
Fig. 44 Evolución de atractor extraño de paciente blanco.....	88
Fig. 45 Evolución de atractor extraño de paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.....	88
Fig. 46 Evolución de atractor extraño de paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF.....	88

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla. 1 Fármacos Antiepilépticos Fármacos antiepilépticos.....	60
Tabla. 2 Comparación de valores experimentales de Curtosis.....	82
Tabla. 3 Comparación de valores experimentales de Asimetría.....	82
Tabla. 4 Comparación de valores experimentales de Exponente de Hurts.....	84
Tabla. 5 Comparación de valores experimentales de Exponente Lyapunov.....	84
Tabla. 6 Comparación de valores obtenidos de Dimensión Correlación.....	84
Tabla 7 Comparación de valores de Dimensión de Capacidad.....	84



## GENERALIDADES

---

La palabra caos ha estado tradicionalmente asociada a los conceptos de confusión y desorden. De hecho el Diccionario de la Real Academia Española lo define como aquel estado amorfo e indefinido que se supone anterior a la ordenación del cosmos.

Sin embargo desde hace más de tres décadas en el mundo científico habla reiteradamente de Teoría del Caos, cuyo significado alude un conjunto de leyes que sirve para ordenar los conocimientos de una serie de fenómenos y al mismo tiempo de Caos. Esta Teoría puede ser definida como el estudio cualitativo del comportamiento dinámico aperiódico mostrado por sistemas deterministas no lineales. Hay que precisar que caos alude a sistemas dinámicos, es decir aquellos que experimentan variaciones en el tiempo. Si estas variaciones son tales que ninguna de las propiedades o variables que caracterizan los cambios observados experimenta repeticiones regulares de sus valores.

El primer “investigador” de la Teoría del Caos propiamente dicho fue un meteorólogo, Edward Lorenz inicio en la década de los sesenta 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 y la variación que existe entre ellas y los parámetros del sistema, dando como resultado una imagen tridimensional llamado atractor extraño. En donde se observa que las trayectorias obtenidas se pliegan sobre sí mismas, confinadas en una región del espacio, moviéndose infinitamente sin pasar nunca por el mismo sitio, sin cruzarse nunca.

Desde su aparición de la Teoría del Caos en el panorama científico los investigadores en los campos de la Biología y la Medicina se sintieron atraídos por las implicaciones que pudiera tener en estos ámbitos a la hora de enfocar el análisis de los problemas dinámicos clásicos de sus disciplinas.

De entre las muchas áreas y sistemas en los que se han producido desarrollos significativos como resultado de la aplicación de los principios de la Teoría del Caos en sistemas biológicos y biomédicos destacan los estudios sobre el comportamiento de los sistemas metabólicos (glicólisis), el análisis de las enfermedades cardiacas o la actividad cerebral así como en epidemiología. En el ámbito de la fisiología y la salud, sin duda el corazón y el cerebro son los sistemas que más atención han recibido



debido a la frecuencia con la que su comportamiento manifiesta aparente desorden y caos.

En una de las tantas ciencias en que se puede utilizar y ser observada en la teoría del Caos ha sido en las manifestaciones de la actividad neuronal donde se acentúa un comportamiento caótico en los registros de actividad eléctrica y las diversas regiones del sistema nervioso. Un claro ejemplo es la Epilepsia, donde la actividad neuronal periódica advierte en un periodo de convulsión en los movimientos externos del individuo; a diferencia de las condiciones normales la actividad eléctrica se torna caótica debido a que el sistema biológico manifiesta un entorno de buena salud.

En el Laboratorio de Dinámica No Lineal de Series de tiempo Electrofisiológicas se determina el grado de convulsión que sufre el individuo realizando el estudio mediante los parámetros cuantitativos y cualitativos de la dinámica no lineal, que es una ciencia que se encuentra ligada a la Teoría del Caos.

En el laboratorio se intenta comprobar que la terapia de CMBF es eficaz en enfermedades neurodegenerativas como la epilepsia debido a que reduce el número de convulsiones en pacientes con esta patología, corroborando los resultados mediante parámetros de la Dinámica No Lineal.



## INTRODUCCIÓN

---

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX en el área de física se dio una revolución de ideas científicas que no son conocidas por el público en general. Han florecido nuevas teorías que permiten entender y describir fenómenos complejos presentes en las diferentes ramas del conocimiento. <sup>[10]</sup>

En campos como el de la física, las matemáticas, la biología, la medicina, la economía, la lingüística, por mencionar sólo algunos, descubriendo que puede tener más de un comportamiento al ser tratadas con procedimientos nuevos, ya que la geometría euclidiana limitaba el estudio de los sistemas impredecibles. Con los nuevos avances científicos se han podido explicar satisfactoriamente descubriendo que efectivamente un sistema complejo tiene comportamiento lineal y no lineal. <sup>[10]</sup>

A raíz de lo anterior, parte de la comunidad científica en todo el mundo ha discutido continuamente la presencia del caos en todo sistema complicado, explicando así muchos fenómenos que se suceden en la naturaleza, en experimentos controlados de laboratorio, y fenómenos provocados por el hombre que se caracterizan por tener un comportamiento que no puede ser descrito por leyes matemáticas sencillas. El descubrimiento de la Teoría del Caos determinista ha forzado un cambio sustancial en la filosofía de la ciencia: por una parte, establece límites a nuestra capacidad para predecir un comportamiento; por otra, abre un nuevo espacio para comprender muchos fenómenos aleatorios que suceden en la mayoría de los campos del conocimiento. <sup>[69]</sup>

Cuando se enfrenta un problema por primera vez, y se quiere comprender cómo funciona normalmente se hacen simplificaciones. Por ejemplo al estudiar el movimiento de un cuerpo era fácil despreciar su fricción facilitando su estudio, pero hoy en día se toman en cuenta todos los factores que intervienen en el movimiento descubriendo una trayectoria diferente en función de los factores. De aquí la importancia de que no siempre las cosas o fenómenos físicos, químicos, biológicos, etc., se pueden representar tan fácil como se quisiera. <sup>[69]</sup>

Actualmente la teoría del caos es uno de los temas importantes en relación con la física moderna que ha permitido descubrir el comportamiento impredecible en los



sistemas biológicos. Es por ello que este trabajo de tesis está diseñado para abordar el estudio de los sistemas biológicos a partir de los datos electrofisiológicos directamente de pacientes con enfermedades neurodegenerativas “Epilepsia” para caracterizar su comportamiento antes y después de la terapia de campo magnético de baja frecuencia (CMBF) a través del atractor extraño y parámetros que avalan su estructura aplicando técnicas de la dinámica no lineal, que son obtenidas mediante programas computacionales como Matlab y Mathematics. [69]

Esta investigación nace de la profunda curiosidad de conocer un tema nuevo y poco común de los generalmente tratados, la teoría del caos que intenta explicar el comportamiento de sistemas dinámicos en los sistemas biológicos que en un principio parecen desarrollarse periódicamente; sin embargo se ha descubierto que tienen un comportamiento aleatorio, exponiendo una nueva manera de estudiar y comprender la realidad. De este modo, la teoría de caos permite explicar tanto los fenómenos naturales como los fenómenos físicos, matemáticos, químicos, fisicoquímicos, entre otros. [69]

En términos generales, la teoría del caos, hace alusión a aquella tendencia general al desorden en la naturaleza por lo que es importante destacar, que en este desorden o caos no implica confusión, por el contrario, este tipo de sistemas caóticos tienen como característica una gran adaptación al cambio, y por ende, gran estabilidad. [69]

Cuando se habla de un sistema complejo hablamos de un comportamiento no lineal altamente caótico, pero es hasta el siglo XX cuando se realizan estudios más profundos de los sistemas naturales y biológicos, que confirma que la mayoría de estos tienen un comportamiento heterogéneo altamente caótico, de lo contrario estos no soportarían los cambios constantes que sufren y su estudio se limitaría por su aparente estabilidad de un comportamiento lineal, que antiguamente se creía que solo este comportamiento era digno de estudio. [69]

En el comportamiento caótico, una mínima diferencia en sus condiciones iniciales hace que el sistema evolucione de manera totalmente distinta y nunca se conocen con exactitud los parámetros que fijan las condiciones iniciales. [70]





Es entonces que el cuerpo humano al estar formado por sistemas complejos que al romper su equilibrio bioquímico, altera su organismo provocando cambios que se manifiestan en diversas enfermedades deteriorando con esto su calidad de vida.<sup>[70]</sup>

Al estudiar el comportamiento del cerebro mediante un electroencefalograma (EEG) en la enfermedad de la epilepsia, se observa que el cerebro es un sistema complejo natural que forman un gráfico de forma desordenada indicando que éste se encuentra sano; en cambio si se observa un sistema lineal (figura armónica y ordenada) indica la presencia de una alteración. Esto implica, que un cerebro sano está preparado para responder a perturbaciones externas e internas, mientras que el enfermo no podrá hacerlo con la misma capacidad. Es por ello, que es un sistema complejo con un alto grado de caoticidad es un sistema biológico sano que puede procesar la información sensorial que controla y coordina el movimiento y el comportamiento que llega a dar prioridad a las funciones corporales homeostáticas, como los latidos del corazón, la presión sanguínea, el balance de fluidos, la temperatura corporal, entre otras.<sup>[70]</sup>

Es por esto que al estudiar mediante la dinámica no lineal el comportamiento que tiene el cerebro en la enfermedad como es la epilepsia y mediante el tratamiento con campo magnético de baja frecuencia podemos saber en un determinado periodo si el paciente puede llegar a disminuir el número de convulsiones logrando con esto un progreso de la enfermedad y su integración en la sociedad.<sup>[70]</sup>

## **HISTORIA DE LA TEORÍA DEL CAOS**

---

Al hablar de la teoría del caos debemos remontarnos al siglo XIX, en dónde, nace esta teoría que tiene como representante al químico belga Ilya Prigogine, que plantea que el mundo no sigue estrictamente el modelo del reloj, previsible y determinado, sino que tiene aspectos caóticos.<sup>[10]</sup>

Un ejemplo típico sería el clima. En donde los procesos para que se de este fenómeno dependen de un enorme conjunto de circunstancias inciertas, determinan que cualquier pequeña variación en un punto del planeta, genere en los próximos días o semanas un efecto considerable.<sup>[70]</sup>

En la época de los 90's, biólogos, astrónomos y economistas crearon un modelo teórico que les sirviera para comprender la complejidad que se observa en la



naturaleza. La nueva disciplina, llamada ciencia del caos o teoría del caos, que ofrece un método para descubrir orden en donde antes sólo se veía el azar, la irregularidad, lo impredecible, en una palabra, lo caótico. Como lo apunta Douglas Hofstadter, en 1979, uno de los matemáticos que más intensamente que se ha ocupado del tema: "Sucede que una misteriosa clase de caos acecha detrás de una fachada de orden y que, sin embargo, en lo más profundo del caos acecha una clase de orden todavía más misterioso". [1]

A principio de los años cincuenta, el matemático americano, E. Lorenz por casualidad, descubrió que, al resolver numéricamente utilizando los ordenadores de que se disponía entonces, pequeñísimas diferencias en las condiciones iniciales de un problema conducían a soluciones muy diferentes. [1]

Edward Lorenz, fue por esto uno de los padres de la teoría del caos, su descubrimiento por casualidad fue un trabajo predecir el tiempo; para tal efecto, tenía una computadora que calculaba el tiempo con 12 ecuaciones; y sin embargo, La máquina no predijo el tiempo, pero en principio predijo como sería el tiempo probablemente. Un día, en 1961, Lorenz quiso ver unos datos nuevamente. Introdujo los números de nuevo a la computadora, pero para ahorrar papel y tiempo, solo calculó con 3 números decimales en vez de 6; los resultados le salieron totalmente diferentes. Lorenz intentó encontrar la explicación de eso. Así surgió la teoría que está tan de moda en nuestros días: la teoría del caos. [1]

Según las ideas convencionales, los resultados habrían tenido que ser prácticamente los mismos. Lorenz corrió el mismo programa y los datos de inicio casi fueron iguales y concluyó que esas diferencias muy pequeñas no pueden tener efecto verdadero en los resultados finales. Lorenz demostró que esa idea era falsa. Al efecto que tienen las diferencias pequeñas e iniciales después se le dio el nombre efecto mariposa. [69]

Lorenz acuñó el término efecto mariposa (el aleteo de una mariposa en California, que puede provocar una tormenta tropical en Australia) para indicar aquellas situaciones en las que una pequeña causa puede multiplicarse de tal modo que acabe produciendo un resultado catastrófico. [69]



Este fenómeno, y toda la teoría del caos son también conocidos como dependencia sensitiva de las condiciones iniciales. Un cambio pequeño puede cambiar drásticamente el comportamiento a largas distancias de un sistema. [67]

El comportamiento caótico de un sistema físico lo podemos encontrar prácticamente en todas partes y es una representación real de la naturaleza. La representación y modelización de estos sistemas complejos puede ser complicada, sin embargo, su tratamiento no es imposible y abre una muy interesantes perspectivas a la investigación científica en todos los campos. [67]

A diferencia de los fenómenos de los que se ocupan la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, los sistemas que ahora se describen como caóticos pueden observarse sin telescopios ni microscopios. Y es que, a pesar de haber surgido de un arduo esfuerzo matemático, la teoría del caos es un saber de lo cotidiano, de cosas que incluso intrigan a los niños: ¿cómo se forman las nubes? o ¿por qué el viento produce remolinos de arena? Todos estos procesos aparentemente desordenados presentan ciertas características cuantificables: su desarrollo en el tiempo depende muy sensiblemente del estado actual, es decir, de cómo están distribuidas las variables en el instante en que se comienza la observación del fenómeno en cuestión, razón por la cual, aun no siendo aleatorio, lo parece. [67]

## TEORÍA DEL CAOS

---

Teoría del caos es la denominación popular de la rama de las matemáticas y la física que trata ciertos tipos de comportamientos impredecibles de los sistemas dinámicos, estos sistemas dinámicos se pueden clasificar básicamente en:

- Estables.
- Inestables.
- Caóticos.

Un sistema estable tiende con el tiempo a un punto, u órbita, según su dimensión (atractor), un sistema inestable se escapa de los atractores y un sistema caótico manifiesta los dos comportamientos. [70]



Una de las mayores características de un sistema inestable es que tiene una gran dependencia de las condiciones iniciales. De un sistema del que se conocen sus ecuaciones características, y con unas condiciones iniciales fijas, se puede conocer exactamente su evolución en el tiempo. [35]

En el caso de los sistemas caóticos, una mínima diferencia en esas condiciones hace que el sistema evolucione de manera totalmente distinta y nunca se conocen con exactitud los parámetros que fijan las condiciones iniciales (en cualquier sistema de medición, por definición, siempre se comete un error, por pequeño que éste sea) hace que aunque se conozca el modelo, éste difiera de la realidad pasado un cierto tiempo. Algunos ejemplos de estos sistemas son el movimiento de las placas tectónicas, el sistema solar, el cerebro, el crecimiento de la población, el clima, etc... [35]

Por lo tanto para poder clasificar el comportamiento de un sistema como caótico, el sistema debe tener las siguientes propiedades:

- Debe ser sensible a las condiciones iniciales.
- Debe ser transitivo.
- Sus órbitas periódicas deben formar un conjunto denso en una región compacta del espacio básico.

Cuando hablamos de sensibilidad a las condiciones iniciales significa que dos puntos en tal sistema pueden moverse en trayectorias muy diferentes en su espacio de fase incluso si la diferencia en sus configuraciones iniciales es muy pequeña. [70]

Un ejemplo de tal sensibilidad es el así llamado "efecto mariposa", en donde el aleteo de las alas de una mariposa puede crear delicados cambios en la atmósfera, los cuales durante el curso del tiempo podrían modificarse hasta hacer que ocurra algo tan dramático como un tornado.



La sensibilidad a las condiciones iniciales está relacionada con el exponente Lyapunov (es una cantidad que caracteriza el radio de separación de trayectorias infinitesimalmente cercanas).<sup>[70]</sup>

Por lo tanto 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, caótica o de cualquier otro tipo.<sup>[36]</sup>

En la Teoría del Caos los sistemas dinámicos son estudiados a partir de su "Espacio de Fases", es decir, la representación coordinada de sus variables independientes. En estos sistemas caóticos, es fácil encontrar trayectorias de movimiento no periódico, o casi-periódicas.<sup>[35]</sup>

## **ATRACTORES**

---

Un atractor es el conjunto de puntos y líneas en el que un sistema evoluciona después de un tiempo suficientemente largo. Geométricamente, un atractor puede ser un punto, una curva, una variedad o incluso un conjunto complejo 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.<sup>[72]</sup>

Una manera de visualizar el movimiento caótico, o cualquier tipo de movimiento, es hacer un diagrama de fases del movimiento. En tal diagrama el tiempo es implícito y cada eje representa una dimensión del estado. Por ejemplo, un sistema en reposo será dibujado como un punto, y un sistema en movimiento periódico será dibujado como un círculo. Algunas veces el movimiento representado con estos diagramas de fases no muestra una trayectoria bien definida, sino que ésta se encuentra errada alrededor de algún movimiento bien definido. Cuando esto sucede se dice que el sistema es atraído hacia un tipo de movimiento, es decir, que hay un atractor.<sup>[72]</sup>

De acuerdo a la forma en que sus trayectorias evolucionen, los atractores pueden ser clasificados como periódicos, cuasi-periódicos y extraños. Estos nombres se relacionan exactamente con el tipo de movimiento que provocan en los sistemas. Un atractor periódico, por ejemplo, puede guiar el movimiento de un péndulo en



oscilaciones periódicas; sin embargo, el péndulo seguirá trayectorias erráticas alrededor de estas oscilaciones debidas a otros factores menores.<sup>[38]</sup>

## Tipos de atractores

Los atractores son partes del espacio de fases de un 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 (herradura de Smale) era estructuralmente robusta y que su atractor tenía la estructura de un conjunto de Cantor.<sup>[10]</sup>

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.

- Atractores simples o clásicos, todas las trayectorias convergen en un único punto, es decir, todas las trayectorias terminan en un estado estacionario.<sup>[10]</sup>

### ➤ Punto fijo

Un punto fijo o punto de equilibrio es el punto correspondiente al estado del sistema que permanece constante el tiempo. Ejemplos: el estado final de una piedra que cae, un péndulo o un vaso con agua.<sup>[10]</sup>

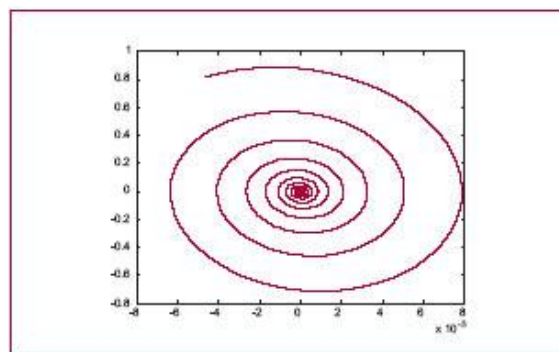


Fig. 1 Atractor de Punto Fijo.<sup>[10]</sup>



### ➤ Ciclo límite

Un ciclo límite es una órbita periódica del sistema que está aislada. Ejemplos: el circuito de sintonía de una radio. [10]

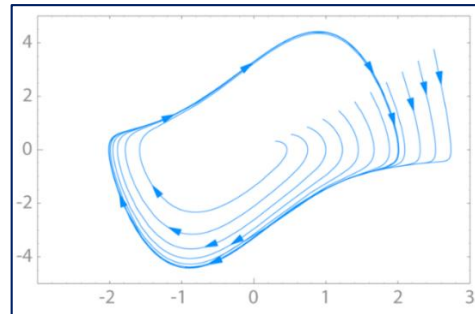


Fig.2 Atractor Ciclo Límite. [10]

### ➤ 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. [10]

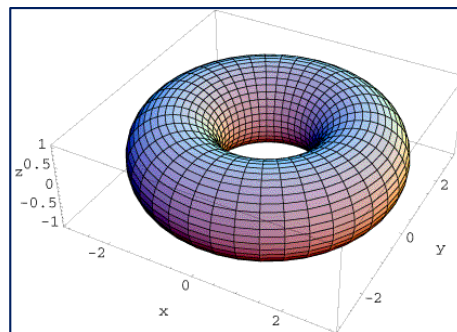


Fig. 3 Atractor Toro Límite. [10]

### ➤ Atractor extraño

Atractor extraño, a diferencia de los atractores clásicos, los atractores extraños tienen estructura a todas las escalas. Un atractor es extraño si tiene dimensión de Hausdorff no entera (o "fractal") o si la dinámica en el atractor es caótica. [10]

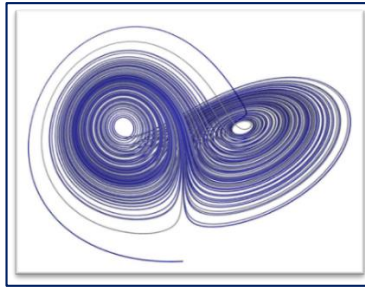


Fig.4 Atractor de Lorentz. [10]

Los atractores extraños suelen tener formas geométricas caprichosas y, en muchos casos, parecidos o similitudes a diferentes escalas. En este caso, estas formas que son iguales a sí mismas en diferentes escalas, se le ha dado en llamar fractales. [10]

## FRACTALES

---

Un fractal es un objeto semigeométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas. El término fue propuesto por el matemático Benoît Mandelbrot en 1975 y deriva del Latín fractus, que significa quebrado o fracturado. Muchas estructuras naturales son de tipo fractal. [73]

*A un objeto geométrico fractal se le atribuyen las siguientes características:*

- ❖ Es demasiado irregular para ser descrito en términos geométricos tradicionales.
- ❖ Posee detalle a cualquier escala de observación.
- ❖ Su dimensión de Hausdorff-Besicovitch es estrictamente mayor que su dimensión topológica.
- ❖ Se define mediante un simple algoritmo recursivo.
- ❖ Un fractal es un objeto matemático que conforma la teoría del caos.
- ❖ Cada porción del objeto posee las mismas características que el objeto completo, es decir, posee una autosimilitud.

No basta con una sola de estas características para definir un fractal. Por ejemplo, la recta real no se considera un fractal, a pesar de ser un objeto auto similar carece del resto de características exigidas. [73]

Un fractal natural es un elemento de la naturaleza que puede ser descrito mediante la geometría fractal. Las nubes, las montañas, el sistema circulatorio, las líneas





costeras o los copos de nieve son fractales naturales. Esta representación es aproximada, pues las propiedades atribuidas a los objetos fractales ideales, como el detalle infinito, tienen límites en el mundo natural. [61]

Un objeto fractal debería tener al menos una de las siguientes características:

- Existe similitud entre detalles a gran escala y a pequeña escala
- No se puede representar por medio de la geometría clásica
- Su dimensión es fraccionaria, es decir, no es entera
- Se puede definir recursivamente

Los fractales son figuras geométricas que no se pueden definir a través de la geometría clásica. Aunque el ser humano tiende a abstraer las figuras de los objetos a esferas, cuadrados, cubos, etcétera, la mayoría de las figuras que se encuentran en la naturaleza son de geometría fractal. [29]

La estructura fractal no es esencial de una área de conocimiento, está presente en casi todas las ciencias exactas, ciencias sociales, artísticas, tecnológicas, ciencias de la salud, entre otras cuya aplicación ha solucionado sistemas complejos que con las herramientas tradicionales no se han solucionado. Una de las características más significativa de los fractales es que surgen a partir de acciones muy básicas. [29]

Otra de las características de los fractales es la: Auto similitud, cuando al cambiar de escala en la representación de algún fractal la imagen que resulta es de gran similitud a la imagen origen. Concluyendo se puede decir que los fractales son autorecurrentes.

### **Tipos de fractales**

Los patrones matemáticos dirigen muchas formas en la naturaleza; hay numerosos ejemplos de sistemas en forma de fractales, sucesiones de Fibonacci, patrones que siguen el número áureo y que dan lugar a formas muy bellas:



A. Los **fractales lineales** son aquellos que se construyen con un cambio en la variación de sus escalas.



Fig. 5 Fractales Lineales. [41]

B. Los **fractales no lineales** se generan creando distorsiones no lineales o complejas.

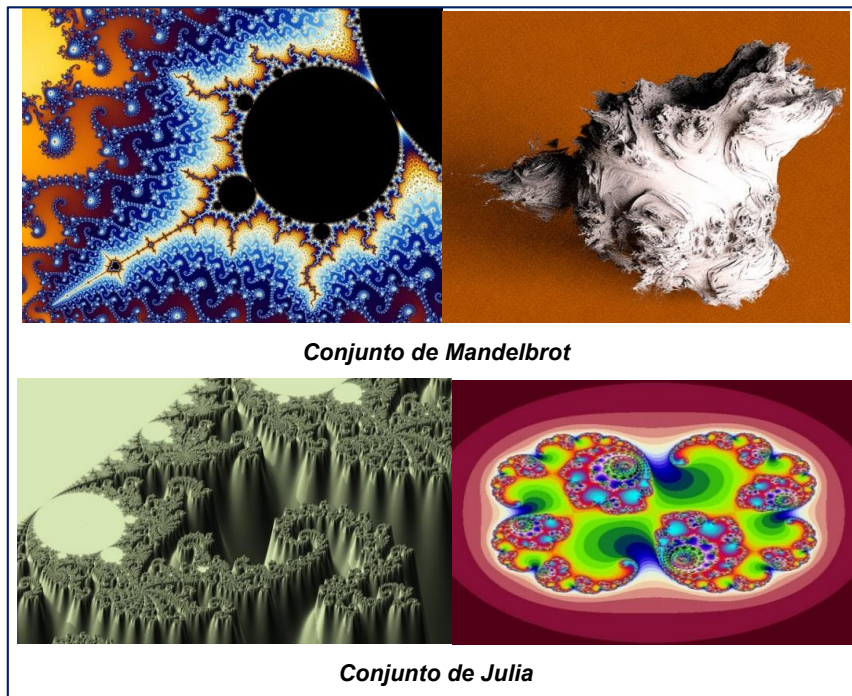


Fig. 6 Fractales No Lineales. [41]

Los fractales pueden generarse a partir de elementos de la matemática tradicional (fractales lineales) o a partir de números complejos. De hecho, el conjunto de Mandelbrot está generado a partir de la iteración de la siguiente expresión compleja:

$$Z^2 + W$$

Dónde Z y W son números complejos. [41]



Un fractal puede ser iterativo. Las iteraciones consisten en repetir y volver sobre sí mismo una cierta cantidad de veces. En el caso de los fractales iteramos fórmulas matemáticas. Esta iteración se realiza mediante el uso de algoritmos, lo que explica la reciente aparición del estudio de los fractales como campo de las matemáticas, puesto que la computación es también de nacimiento reciente, con la cual se lleva a cabo la resolución de algoritmos más rápidamente.<sup>[5]</sup>

Teniendo en cuenta que un fractal se obtendría iterando hasta el infinito, nos damos cuenta de que una iteración hasta el infinito es imposible de realizar en la práctica, así que el concepto de fractal perfecto lo veremos solo de modo teórico.

Todos los fractales no tienen por qué ser autosimilares. A estos fractales que no lo son los denominamos fractales plasmáticos. El siguiente es un ejemplo de un fractal plasmático.<sup>[41]</sup>

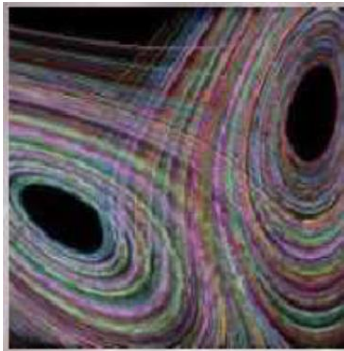


Fig. 7 Fractal Plasmático.<sup>[41]</sup>

Los fractales deben poseer una dimensión que debe ser no entera y cuya dimensión fractal debe superar a su dimensión topológica. Las dimensiones topológicas son las siguientes:

Dimensión -1 (conjunto vacío)

Dimensión 0 (un punto)

Dimensión 1 (una línea recta)

Dimensión 2 (un plano)

Dimensión 3 (el espacio)



Como los fractales están compuestos por elementos cada vez más pequeños de sí, el concepto de longitud pasa a ser algo complejo por lo que mediremos los fractales por su dimensión. El cálculo de la dimensión de un objeto nos permitirá conocer si ese objeto es o no un fractal. [56]

La expresión matemática para calcular la dimensión de un fractal es  $S = L^D$  de la cual  $S$  es la cantidad de segmentos o su longitud,  $L$  es la escala de dimensión y  $D$  es la dimensión, la cual debemos despejar. [56]

- Despejando obtenemos la siguiente expresión:

$$D = (\log S / \log L)$$

- A continuación vamos a comprobar si una línea recta es o no un fractal.

Tomamos por ejemplo un segmento de 1 metro de longitud, el cual mediremos con una regla que también mide 1 metro. Por lo tanto tenemos que  $S=1$  y  $L=1$ . Operamos pues, con la expresión anterior:

$$D = (\log S / \log L) = \log 1 / \log 1 = 1$$

Obtenemos por lo tanto que la dimensión de una línea recta vale 1.

- Por la definición de fractal, decíamos que un fractal debe poseer una dimensión fractal (la cual acabamos de calcular) superior a su dimensión topológica que en el caso de la recta vale 1. Por lo tanto deducimos que una recta no es un fractal. [56]
- Análogamente probamos que un cuadrado (de dimensión 2) y un cubo (de dimensión 3) tampoco son fractales porque sus dimensiones fractales no superan a sus dimensiones topológicas. [56]

## **DINÁMICA NO LINEAL**

---

El término “Dinámica” se puede englobar en todo aquello que cambia con el tiempo. Un sistema dinámico será, por tanto, aquel que evoluciona en el tiempo. Una de las características fundamentales de la Dinámica No Lineal es su carácter interdisciplinar y universal. Desde el punto de vista de la tradición de la Física, la Dinámica es, tal vez, la ciencia más antigua ya que uno de los primeros fenómenos



que subyugaron a los primeros “científicos” fue precisamente el estudio del movimiento de los astros y cuerpos celestes. Al comienzo de la época moderna la síntesis Newtoniana culminó un largo proceso de descubrimiento que se remontaba a la Antigüedad e intentó integrar todo ese conocimiento en lo que hoy denominamos la imagen mecanicista del mundo. La ciencia que conocemos como Mecánica Clásica engloba en nuestros días toda esta milenaria tradición. Pero los grandes éxitos de la Mecánica Clásica sólo fueron posibles tras una considerable limitación de las ambiciones iniciales de quienes participaron en su construcción.<sup>[66]</sup>

Todos los grandes científicos del siglo XIX eran más o menos conscientes de que una gran parte de los procesos de cambio que se observan en la Naturaleza quedaban fuera de la descripción de una disciplina que se había centrado únicamente en estudiar el movimiento de los cuerpos físicos, dejando sin resolver el problema más general del cambio y sus causas. Porque, realmente, existen muchos otros objetos que se “mueven”, si entendemos por movimiento la evolución en el tiempo de un sistema. Cuando se produce una reacción química, por ejemplo, la concentración de los reactivos varía y es por ello por lo que tal reacción es susceptible de ser modelada como un proceso dinámico.<sup>[56]</sup>

Por tanto, no solo en el campo de la Física, sino en multitud de problemas técnicos de la Ingeniería, en Biología o en Sociología aparecen problemas de esta naturaleza y todos ellos son susceptibles de ser formulados como correspondientes a la Teoría de Sistemas Dinámicos.<sup>[28]</sup>

Cuando se quiere comprender la naturaleza y la trascendencia de una disciplina es importante acudir a sus fuentes históricas, con el fin de tener una visión general de su origen, desarrollo y evolución en el tiempo, es por esto que en las últimas décadas ha habido una enorme explosión de actividad científica en lo que se ha venido a llamar Dinámica No Lineal. Ese proceso ha popularizado conceptos y términos tales como caos, fractales o atractores extraños, tanto en el dominio de la Física como en otras muchas ciencias.<sup>[28]</sup>

Desde el punto de vista de la tradición de la Física, deberíamos remontarnos a la época de Isaac Newton (1642-1727) y al nacimiento de la Mecánica Clásica. A través de la enseñanza de dicha disciplina se ha transmitido a generaciones de



físicos la noción de la teoría causal y determinista que asociamos al nombre del matemático francés Pierre Simón Laplace (1749-1827), según la cual, conocidas de forma exacta las condiciones iniciales de un sistema físico dado, es posible predecir con absoluta certeza el estado del sistema en cualquier otro instante de tiempo sin más que hacer uso de las ecuaciones de Newton.<sup>[7]</sup>

Newton descubrió las ecuaciones diferenciales, las leyes de movimiento y la gravitación general. Con estos elementos Newton resolvió problemas de dos cuerpos que interactúan por medio de la gravedad pero, lo que de verdad le llamaba la atención, era el movimiento de la Luna y su generalización conocida con el nombre de problema de los tres cuerpos. Las siguientes generaciones de matemáticos y físicos trataron problemas de tres cuerpos y notaron que resultaban mucho más difíciles que los problemas de dos cuerpos, hasta el punto de darlos como imposibles.<sup>[7]</sup>

Uno de los personajes clave en la historia de la Teoría del Caos es, sin duda, el matemático francés Henri Poincaré (1854-1912), quien a los 26 años escribió una memoria sobre el problema de los tres cuerpos que resultó ganadora de la competición internacional para conmemorar el 60 aniversario de Oscar II, rey de Suecia y Noruega. El problema de los tres cuerpos se puede enunciar de un modo muy sencillo: tres partículas de masas diferentes que se mueven en el espacio bajo la acción de la gravitación mutua; dadas unas condiciones iniciales, determinando el movimiento de cada una de las partículas. Obsérvese que el problema tiene un enunciado de gran simplicidad, su solución no es sencilla en absoluto: Poincaré demostró que no era posible encontrar una solución exacta tal y como la conocemos para el problema de los dos cuerpos.<sup>[7]</sup>

Sin embargo para Poincaré los sistemas venían determinados por un conjunto de condiciones iniciales, que nunca se podrían conocer con precisión absoluta y en consecuencia poco a poco se iría perdiendo el recuerdo de las mismas y los sistemas se harían impredecibles.<sup>[7]</sup>

Las ideas de Poincaré quedaron algo olvidadas, aunque el progreso de la física siguió con dos rupturas: La teoría de la relatividad y La mecánica cuántica:



1) **La teoría de la relatividad**, en la cual es espacio y el tiempo dejaban de ser absolutos y la masa de un móvil dependía de su velocidad.

2) **La mecánica cuántica**, en la que al binomio objeto medido - instrumento de medida se une a un tercero en discordia, el operador, y la precisión en la medida quedaba limitada intrínsecamente por el Principio de incertidumbre de Heisenberg.

[18]

### **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.

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. [54]

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). [37]

Un sistema dinámico se dice *discreto* si el tiempo se mide en pequeños lapsos; éstos son modelados como relaciones recursivas, tal como la ecuación logística:

$$x_{t+1} = ax_t(1 - x_t)$$



Donde  $t$  denota los pasos discretos del tiempo y  $x$  es la variable que cambia con éste.

Si el tiempo es medido en forma continua, el sistema dinámico *continuo* resultante es expresado como una ecuación diferencial ordinaria; por ejemplo:

$$\frac{dx}{dt} = ax(1 - x)$$

Donde  $x$  es la variable que cambia con el tiempo  $t$ . La variable cambiante  $x$  es normalmente un número real, aunque también puede ser un vector en  $\mathbf{R}^k$ . [37]

### **Sistemas Lineales y No Lineales**

Se distingue entre *sistemas dinámicos lineales* y *sistemas dinámicos no lineales*. En los sistemas lineales, el lado derecho de la ecuación es una expresión que depende en forma lineal de  $x$ , tal como:

$$x_{n+1} = 3x_n$$

Si se conocen dos soluciones para un sistema lineal, la suma de ellas es también una solución; esto se conoce como *Principio de superposición*. En general, las soluciones provenientes de un espacio vectorial permiten el uso del álgebra lineal y simplifican significativamente el análisis. Para sistemas lineales continuos, el método de la transformada de Laplace también puede ser usado para transformar la ecuación diferencial en una ecuación algebraica; así mismo que para los sistemas lineales discretos, el método de la transformada Z también puede ser usado para transformar la ecuación diferencial en una ecuación algebraica. [6]

Los sistemas no lineales son mucho más difíciles de analizar; ya que son sistemas complejos que exhiben un fenómeno conocido como caos, de comportamientos totalmente impredecibles. En particular, el comportamiento de sistemas no lineales no está sujeto al principio de superposición, como lo es un sistema lineal. [6]

Por otra parte, el sistema se dice no lineal cuando alguna de las funciones  $f_i$  es no lineal en las variables  $x_j$ , como en el sistema dinámico.

$$x'_1 = x_2$$





$$x'_2 = -\text{sen } x_1$$

En este caso, las ecuaciones anteriores suelen denotarse de una forma compacta mediante

$$X' = f(x)$$

Donde hemos utilizado los vectores

$$x' = (x'_1, x'_2) \text{ y } f(x) = (f_1, f_2).$$

Es obvio que un sistema lineal es un caso particular dentro del conjunto de los sistemas no lineales, mientras que lo contrario no se verifica. Por ello, cuando posteriormente se nombre un sistema dinámico, sin más aclaraciones, se esta refiriendo a un sistema dinámico general, esto es, no lineal.<sup>[6]</sup>

La linealidad de un sistema permite a los investigadores hacer ciertas suposiciones matemáticas y aproximaciones, permitiendo un cálculo más sencillo de los resultados. Ya que los sistemas no lineales no son iguales a la suma de sus partes, usualmente son difíciles (o imposibles) de modelar, y sus comportamientos con respecto a una variable dada (por ejemplo, el tiempo) es extremadamente difícil de predecir.<sup>[68]</sup>

Los sistemas no lineales no tienen soluciones exactas o integrables, tienen comportamiento altamente híbrido obteniendo un conducta caótica, por lo tanto no se pueden reducir a una forma simple, pero si pueden ser reconocidos a través de los parámetros cuantitativos que aporta la Teoría de Caos. [68]



## SERIES DE TIEMPO

---

Una serie de tiempo representa las variaciones o evolución de un fenómeno a través del tiempo. [24]

Hoy en día éstas son utilizadas en la vida diaria: en evolución de un determinado periodo de tiempo de la producción de satisfactores para la sociedad, por ejemplo: exportaciones, turismo, ecología, economía, la clásica curva de la fiebre y pulso de un paciente es una serie de tiempo. [24]

El análisis de series de tiempo es un método cuantitativo que se utiliza para determinar patrones de comportamiento en los datos obtenidos a través del tiempo. Se utilizan para detectar patrones de cambio o permanencia en la información estadística en intervalos o periodos regulares. Proyectando estos patrones para visualizar en un futuro el fenómeno de estudio. En consecuencia, el análisis de las series de tiempo permite manejar la incertidumbre asociada con los acontecimientos futuros. [54]

Matemáticamente, una serie de tiempo se define por los valores  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots$  de una variable  $Y$  (ventas mensuales, producción total, etc.) en tiempos  $t_1, t_2, t_3, \dots$ . Si se reemplaza a  $X$  por la variable tiempo, estas series se definen como distribuciones de pares ordenados  $(X, Y)$  en el plano cartesiano, siendo  $Y$  una función de  $X$ ; esto se denota por:

$$Y = f(t) \rightarrow Y = f(X)$$

El principal objetivo de las series de tiempo es hacer proyecciones o pronósticos sobre una actividad futura, suponiendo estables las condiciones y variaciones registradas hasta la fecha, lo cual permite planear y tomar decisiones a corto o largo plazo. Después, con base en esa situación ideal, que supone que los factores que influyeron en la serie en el pasado lo continuarán haciendo en el futuro, se analizan las tendencias pasadas y el comportamiento de las actividades bajo la influencia de ellas. [3]



## Representación

a) de forma numérica o tabular. La columna base es el tiempo.

b) de forma gráfica. La más usada es el diagrama lineal, la variante del polígono de frecuencias que no baja al eje de abscisas ya que no se abarca toda la distribución sino sólo una parte de la misma. Si abarca toda la distribución se usará el polígono de frecuencias. En el eje de abscisas se representa el tiempo y en el de ordenadas la frecuencia correspondiente. [3]

## PARÁMETROS DE LA DINÁMICA NO LINEAL

---

Como se había visto anteriormente los sistemas dinámicos son aquellos que cambian con el tiempo, los cuales pueden ser explicados por medio de ecuaciones dinámicas y estructuras matemáticas; o bien, pueden ser representados como trayectorias de espacios de fases caracterizados por su capacidad de percibir la evolución del sistema en el tiempo. La teoría del caos, forma parte del estudio general de los modelos dinámicos, interesada fundamentalmente en el comportamiento de sistemas no lineales, los cuales exhiben atractores, y sensibilidad a las condiciones iniciales. [21]

La no-linealidad es una característica de la evolución de los fenómenos naturales, como es la precipitación, donde largos periodos de estabilidad son intercalados con oscilaciones aparentemente aleatorias en épocas de inestabilidad. [21]

Una forma de estudiar los sistemas biológicos mediante los sistemas caóticos, dimensión fractal y atractores extraños, es calcular algunos parámetros indispensables para realizar el pronóstico en como son el exponente de Lyapunov, la dimensión de capacidad, el poder del espectro, distribución de probabilidad, exponente de Hurst, diagrama espacio fase y frecuencia dominante. [21]



## Probabilidad de Distribución

### *Distribución normal*

Es la herramienta práctica de la teoría de la probabilidad en la estadística. Gran parte de ésta se centra alrededor de la llamada distribución normal. La cual es una curva en forma de campana que moldea fielmente las proporciones de una población que tiene alguna característica particular.<sup>[28]</sup>

La forma de la campana de Gauss depende de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma^2$ . La media ( $\mu$ ) indica la posición media de la campana, de modo que para diferentes valores de  $\mu$  la gráfica se encuentra a lo largo del eje de la abscisa. Por otra parte, la varianza ( $\sigma^2$ ) determina el grado de dispersión de la curva con respecto a la media  $\mu$ . Cuanto mayor sea el valor de  $\sigma^2$  más se dispersarán los datos en torno a la media y la curva será más plana o achatada. Un valor pequeño de  $\sigma^2$  indica, por tanto, una gran probabilidad de obtener datos cercanos al valor medio de la distribución y el gráfico de la curva se concentrará más alrededor de la media ( $\mu$ ). Deduciendo que no existe una única distribución normal, sino una familia de distribuciones de forma común, diferenciadas por los valores de su media y su varianza.<sup>[50]</sup>

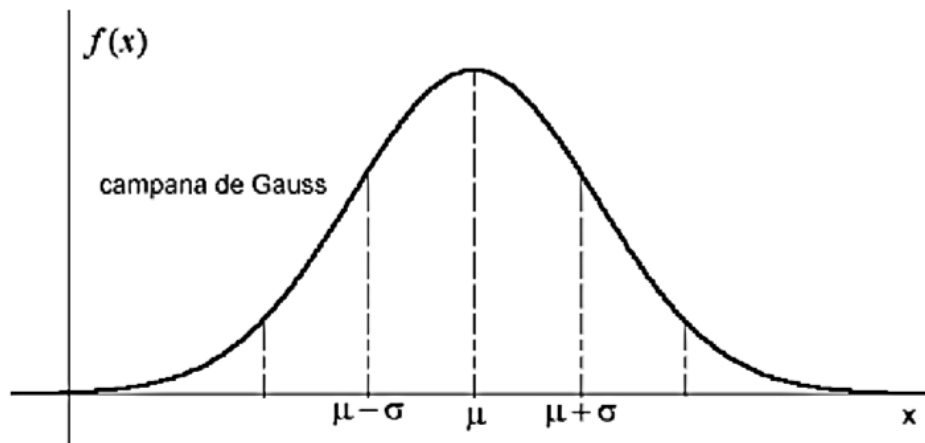


Fig.8 Campana de Gauss.<sup>[50]</sup>

Distribución normal o gaussiana está caracterizada por los parámetros: la media,  $\mu$  y la desviación típica,  $\sigma$ .



Su función de densidad es:

$$N(\mu, \sigma) = P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\sigma > 0)$$

### **Diagrama Espacio Fase**

Una manera de visualizar el movimiento caótico, o cualquier tipo de movimiento, es hacer un diagrama de fases del movimiento. En tal diagrama el tiempo está implícito y cada eje representa una dimensión del estado. Por ejemplo, un sistema en reposo será dibujado como un punto, y un sistema en movimiento periódico será dibujado como un círculo. [20]

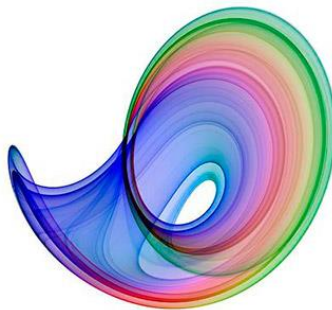


Fig. 9 Atractor Extraño. [20]

Algunas veces el movimiento representado con este tipo de diagrama no exhibe una trayectoria bien definida, sino que ésta es errabunda alrededor de algún movimiento bien definido. Cuando esto sucede se dice que el sistema es atraído hacia un tipo de movimiento, es decir, que hay un atractor. [77]

Los atractores extraños también son llamados sistemas caóticos, donde sus trayectorias nunca se repiten, su evolución es aperiódica pero completamente determinística, sus señales son irregulares y exhiben energía en todas las frecuencias dentro del espectro de banda ancha (Elsner y Tsonics, 1992). [77]

Una vez que el atractor extraño ha sido identificado, puede ser cuantificado al calcular varias medidas como la capacidad de dimensión, exponente de Lyapunov etc. [77]



## ***Exponente De Hurst (H)***

El coeficiente o exponente de Hurst es una medida de independencia de las series de tiempo que fue estudiada inicialmente por el científico británico Harold Edwin Hurst (1880-1978), como elemento para distinguir series fractales.<sup>[59]</sup>

Hurst descubrió que muchos fenómenos naturales exhiben un comportamiento que puede ser caracterizado por un proceso aleatorio sesgado, en el cual existe “memoria de largo plazo” entre las observaciones, es decir, que los eventos de un periodo influyen en todos los siguientes.<sup>[59]</sup>

Posteriormente, las ideas de Hurst fueron retomadas por Benoit B. Mandelbrot quien generalizó su trabajo y lo llamó análisis de rango reescalado (R/S), definido como un método estadístico utilizado para evaluar la ocurrencia de eventos poco comunes, dando origen a una herramienta ideal para procesos físicos y financieros, aunque no se limita solamente a este tipo de eventos, por lo que puede ser aplicado en cualquier serie de tiempo.<sup>[59]</sup>

El valor del exponente de Hurst se ha aplicado en áreas de las matemáticas aplicadas que van desde la biofísica a las redes computacionales, incluyendo en procesos de larga memoria, los fractales y la teoría del Caos.<sup>[59]</sup>

Un nuevo método que invento Hurst para el cálculo de H es el Rescale Range Analysis o análisis R/S (corresponde a una medida de varianza).<sup>[59]</sup>

Hurst investigo muchos fenómenos naturales y utilizo una relación adimensional R/S, donde R indica el rango y S la desviación típica de los valores observados de las descargas X.<sup>[60]</sup>

Quien observo que la relación R/S estaba bien descrita, para un número considerable de fenómenos, por una ecuación de la forma:<sup>[59]</sup>

$$R/S = (t/2)^H$$

Donde t es el periodo de tiempo, el exponente de Hurst está distribuido aproximadamente de forma simétrica alrededor de un valor medio 0.73, con una desviación estándar de 0.09.<sup>[59]</sup>



Sin embargo, haciendo una simulación, se aprueba que, asociando al modelo variables aleatorias independientes, el valor R/S está dada por:

$$R/S = (\pi t/2)^{1/2}$$

Esto conduce a deducir que las descargas sucesivas no son independientes, sin embargo la razón por lo que los fenómenos distintos fenómenos naturales satisfacen la relación encontrada por Hurst. [59]

Caracterización del comportamiento de las series de tiempo a través del exponente de Hurst:

- $H > 0.5$ : sistema persistente (correlación positiva) o Estocástica: Ejemplo: si  $H = 0.7$ , entonces existe una probabilidad de 70% de que el siguiente miembro de la serie exhiba la misma tendencia que la del miembro actual.
- $H = 0.5$ : sistema aleatorio (correlación nula o "ruido blanco")
- $H < 0.5$ : sistema antipersistente (correlación negativa).
- $0 > H < 0.5$ : sistema híbrido (comportamiento caótico)

### ***El Exponente de Hurst y la Dimensión Fractal***

El exponente de Hurst puede ser determinado a partir de la dimensión fractal o viceversa, utilizando la fórmula:

$$D = 2 - H$$

Dado lo anterior, si  $H = 0.5$ , entonces  $D = 1.5$ , lo que significa que los dos valores coinciden con un proceso aleatorio e independiente. Para valores que se encuentren entre  $0.5 > H > 1$ , es decir, series de tiempo persistentes, la dimensión fractal se acercará a una línea con un aspecto de suavidad y menos picos que un proceso aleatorio; para una serie que tome valores entre  $0 < H < 0.5$ , es decir, una serie antipersistente, la dimensión fractal arrojará un valor mayor que la anterior y tomará un aspecto más puntiagudo e irregular que un proceso aleatorio, con tendencia a acercarse cada vez más a una superficie. [42]



**Exponente de Lyapunov (L)**

Los valores exponentes de Lyapunov miden la tasa promedio de divergencia o convergencia exponencial de trayectorias cercanas en el espacio de fase. Dado que las condiciones iniciales cercanas corresponden a estados iniciales prácticamente idénticos, la divergencia exponencial de las orbitas implica la pérdida de la predictibilidad del sistema. Cualquier sistema que contenga al menos un exponente de Lyapunov positivo, se define como caótico, con la magnitud de la trayectoria del exponente refleja la escala temporal en la cual la dinámica se hace impredecible. Para tener una definición más formal se considera el sistema dinámico. [9]

$$\dot{x} = F(x) \dots \dots \dots (1)$$

donde  $\dot{x}$  representa la derivada temporal de  $x$  y cuya solución, asume, está dada por  $f(x)$ . Asimismo, se razonan dos condiciones iniciales cercanas en el espacio de fase  $x_0$  y  $x_0 + dx_0$ , donde  $x_0$  es una pequeña perturbación del punto  $x_0$ . Después de un tiempo ( $t$ ), la solución para estas condiciones particulares, estará dada por  $\mathcal{F}^t(x_0)$  y  $\mathcal{F}^t(x_0+dx_0)$ . Si se usa la órbita descrita por la solución de condición inicial  $x_0$  como referencia, la separación entre el par de trayectorias  $\Delta \mathcal{F}^t = \mathcal{F}^t(x_0+dx_0) - \mathcal{F}^t(x_0)$ , será una función del tiempo e indicara, si éstas divergen, en un sistema es inestable. Para el caso particular de una órbita caótica, la función  $\Delta \mathcal{F}^t$  variaría erráticamente con el tiempo, por lo que se hace necesario introducir la tasa media exponencial de divergencia del par de trayectorias, esto es

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{t} \right) \ln \left[ \frac{\Delta \mathcal{F}^t}{\delta x_0} \right] \dots \dots \dots (2)$$

donde  $\lambda$  se denomina exponente de Lyapunov y se asume  $dx_0 \rightarrow 0$ . Linealizando  $\mathcal{F}^t$ , se satisface

$$\Delta \mathcal{F}^t = \mathcal{F}^t(x_0+dx_0) - \mathcal{F}^t(x_0) = D_{x_0} \mathcal{F}^t(x_0) * dx_0 \dots \dots \dots (3)$$

luego, la expresión (2) se denota como:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{t} \right) \ln \left[ \frac{D_{x_0} \mathcal{F}^t(x_0) * dx_0}{\delta x_0} \right] \dots \dots \dots (4)$$





En general, un sistema dinámico en un espacio de fase  $n$ -dimensional posee un espectro con  $n$  exponentes de Lyapunov, uno por cada dirección del espacio de fase. Además, puede demostrarse que si  $\mathcal{F}(x)$  en (1) es suave, el límite (4) existe y es igual al máximo exponente de Lyapunov. Es importante notar que cualquier separación inicial  $\delta x_0$ , contiene, en general, algún componente en la dirección asociada con el máximo exponente de Lyapunov y debido al crecimiento exponencial de este último, el efecto de los otros exponentes se verá atenuado hasta desvanecerse con el tiempo.<sup>[9]</sup>

Identificación de la evolución de las series de tiempo por medio del exponente de Lyapunov:

- ❖  $L < 0$ : serie periódica
- ❖  $L > 0$ : serie caótica
- ❖  $L \rightarrow \infty$ : serie aleatoria

### ***Dimensión de Correlación***

Los sistemas disipativos con comportamiento caótico evolucionan temporalmente en atractores extraños, los cuales pueden ser caracterizados numéricamente como la dimensión fractal ( $D$ ), la cual es menor que el número de grados de libertad del sistema. Esta medida ha sido ampliamente usada para determinar qué tan “extraño” es un atractor (Grassberger y Procaccia 1983) (Eckmann y Ruelle 1985). Sin embargo el cálculo de esta medida ha resultado complejo de implementar, sobre todo cuando  $D > 2$  y cuando debe ser calculada a partir de una serie de tiempo finita, considerándose en algunos casos impráctica.<sup>[55]</sup>

La Dimensión de Correlación ( $D_{\text{corr}}$ ) se utiliza para calcular la dimensión fractal de una serie de tiempo. La serie de tiempo se incorpora en un espacio dimensional  $n$  que se realiza mediante la formación de vectores de longitud  $n$ , por lo que un conjunto de datos del atractor es la dimensión de su espacio de direcciones. En otras palabras, es el número de señales del conjunto de datos de un atractor y puede representar un objeto espacial que tiene una dimensión menor que el espacio en el que está incrustado. Por ejemplo, una línea tiene una dimensionalidad específica, sin importar si es en un espacio dimensional mayor. La dimensión



específica de un conjunto de datos del atractor es la dimensión del objeto espacial representada por el conjunto de datos del atractor, independientemente del espacio en el que está incrustado. [55]

Los objetos fractales obtenidos de los atractores de los mapas iterados cuadráticos se caracterizan típicamente por la dimensión fractal. Una serie de "dimensiones fractales" se define, mediante la dimensión fractal de correlación,  $D_{\text{Corr}}$  introducido por Grassberger y Procaccia, que para calcular una dimensión fractal la medición de un atractor se debe al conjunto dado de puntos distribuidos aleatoriamente según  $\mu$ , que representa una de las formas más populares para medir la dimensión del atractor. Es decir, la dimensión fractal de correlación, indica que dos puntos elegidos al azar será dentro de una cierta distancia el del uno otro. En donde la distribución de los puntos contenidos en el atractor caracteriza el espacio de fases propiedad del atractor. Los cambios en la dimensión fractal de correlación significan los cambios en la distribución de los puntos en el conjunto de datos del atractor. Aquí utilizamos  $D_{\text{Corr}}$  como la dimensión intrínseca de un conjunto de datos. [55]

$D_{\text{Corr}}$  puede ser calculado utilizando la función de correlación (también denominado como función integral de correlación o la suma de correlación), superponiendo un conjunto de líneas de un tamaño  $\varepsilon$ , posteriormente calcular la probabilidad  $p_i(\varepsilon)$  (Equivalente a la frecuencia grande relativa de un conjuntos de datos). La dimensión de correlación se define: [55]

$$D_{\text{Corr}} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_i \frac{\log(\sum_i p_i(\varepsilon)^2)}{\log(\varepsilon)}$$

$\sum_i p_i(\varepsilon)^2$  indica la cantidad de líneas de un tamaño dado.

Si un sistema de baja complejidad, exhibirá comportamientos bastante regulares, por lo cual los cambios en sus variables mostrarán si la correlación entre un dato con los anteriores o los siguientes son regulares. Por el contrario, en un sistema totalmente aleatorio un dato, no tiene ninguna correlación. En los sistemas dinámicos no lineales, también llamados sistemas complejos, la dimensión de correlación varía según su grado de complejidad. [31]



Se puede decir que la dimensión de correlación mide la complejidad global del sistema (Hoyer D. et al. 1997), y tiene la gran ventaja de permitir establecer el número de variables independientes que determinan el comportamiento del sistema. [31]

### ***Dimensión de Capacidad***

La dimensión de capacidad se calcula de la pendiente de la curva producida por procedimientos de conteo. La dimensión se dice que está bien definida si existe una región de saturación plana en la gráfica de la capacidad de dimensión contra el logaritmo de la dimensión lineal normalizada. [46]

Hay varias formas de definir la dimensión de un atractor, y la más simple es la "dimensión de capacidad", la cual describe la geometría de la dimensión del atractor, sin considerar que tan frecuente la trayectoria visita la región del atractor.

Por lo tanto la Dimensión de Capacidad se determina mediante la fórmula:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln M(\varepsilon)}{\ln \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \quad [34]$$

Sea M el número de segmentos de longitud, sea  $\varepsilon$  necesarios para cubrir un segmento de longitud  $l$ ; si  $\varepsilon$  es pequeño se tiene que  $M(\varepsilon) = l \times \varepsilon^{-1}$ . Tomemos ahora el cuadrado de lado  $l$  y sea  $M(\varepsilon)$  el número mínimos de pequeños cuadrados del lado  $\varepsilon$  necesarios para recubrirlos, entonces  $M(\varepsilon) = l^2 \times \varepsilon^{-2}$ . Así en ambos casos  $M(\varepsilon)$  se comporta como  $\varepsilon^{-D}$  cuando  $\varepsilon$  tiende a cero. Siendo D la dimensión de capacidad. [77]

### ***Espectro de Potencia***

El espectro de potencia es obtenido mediante la transformada de Fourier, es una transformación matemática empleada para convertir señales entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia, tiene muchas aplicaciones en la física y la ingeniería, por lo regular es usada para graficar el espectro sobre escalas lineales, escalas logarítmicas lineales o escalas logarítmicas-logarítmicas de los datos y despliega la potencia (amplitud media cuadrada) como una función de la frecuencia.

[57]



Cuando se obtiene una serie de tiempo complicada que mezcle ondas de diferentes frecuencias, es posible analizar la señal matemáticamente y obtener las componentes individuales mediante este procedimiento. Así mismo se puede encontrar la intensidad de cada componente, es decir, cuánto contribuye cada componente al total. [57]

El efecto de este análisis puede resumirse en un espectro de potencia, una gráfica que muestra la intensidad de cada componente de frecuencia. [48]

Por esta razón se puede decir que el espectro de potencia es algo así como las “huellas dactilares de la frecuencia” de una serie de tiempo, y puede ser utilizado para detectar la presencia de ciertos tipos de comportamiento. Si aparece gradualmente una banda ancha de frecuencias lo que se encuentra es que la serie de tiempo se hace caótica. [48]

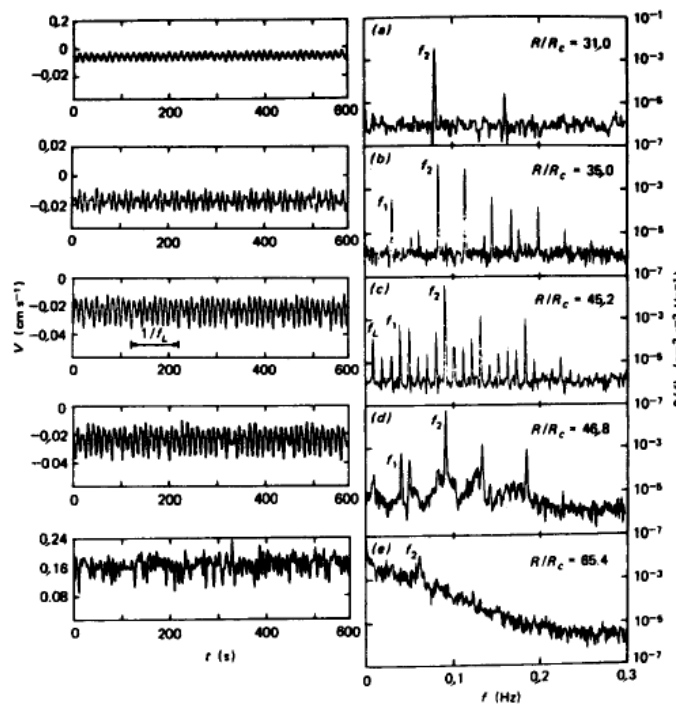


Fig. 10 Secuencia de los espectros de potencia, se muestran cómo cambia la intensidad de las componentes de frecuencia. Los picos indican frecuencias bien definidas movimiento periódico o cuasiperiódico; las bandas anchas indican la existencia del Caos. Una serie de tiempo cuasiperiódica tiene un espectro de potencia que consiste principalmente de picos agudos, como los tres dibujos superiores. Una serie de tiempo ruidosa, señal “aleatoria”, tiene un espectro de banda ancha, cuyas componentes de frecuencia están esparcidas, como en la figura inferior. Es posible también una mezcla de las dos, como en la cuarta figura. [48]



### Transformada Rápida de Fourier

En la actualidad esta es la medición más popular, principalmente porque la idea de descomposición de una serie de tiempo no-periódica en una serie de señales sinusoidales o armónicas es ampliamente conocida entre científicos e ingenieros. La presuposición hecha en este método es que la serie de tiempo periódica o no-periódica puede ser representada como una síntesis de señales de seno o coseno:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

donde  $e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$  [25]

Debido a que  $F(\omega)$  frecuentemente es compleja, el valor absoluto de  $|F(\omega)|$  es usado en despliegues gráficos. Cuando el movimiento es periódico o cuasiperiódico,  $|F(\omega)|$  muestra una serie de espigas delgadas o líneas indicando que la serie de tiempo puede ser representada por una serie discreta de funciones armónicas  $\{e^{\pm i\omega k t}\}$ , donde  $k = 1, 2, 3, \dots$  [25]

### Clasificación del Espectro de Potencia:

Los datos aleatorios y caóticos dan un incremento al ampliar el espectro. Los datos periódicos y cuasiperiódicos producirán algunos picos dominantes en el espectro. La potencia espectral que siempre sigue líneas sobre una escala logarítmica lineal están pensadas para ser buenos candidatos para el Caos, de este modo el ruido tiende a tener un espectro de potencia bajo. [20]

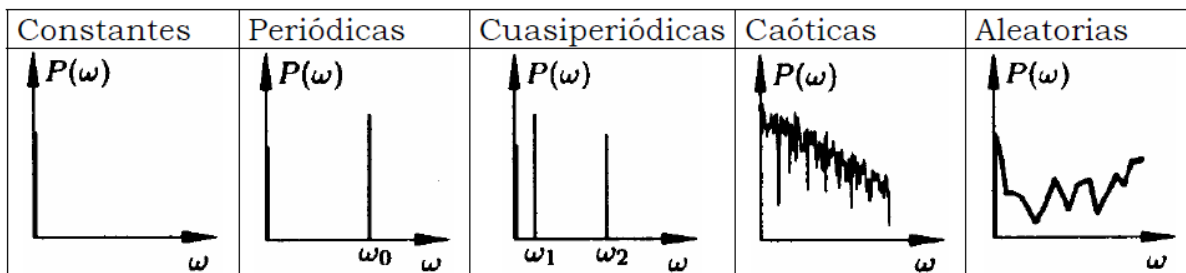


Fig.11 Clasificación del Espectro de Potencia. [20]



## ***Frecuencia Dominante***

Este método utiliza el método de máxima entropía (o todos los polos). El método de máxima entropía representa los datos en términos de un número finito ( $N$ ) de polos complejos de frecuencia discreta. [36]

La entropía métrica es una noción asociada a la evolución caótica de un sistema que proporciona una medida de su grado de desorden. En consecuencia, la “magnitud” del desorden no viene dada por la dimensión fractal, que puede ser pequeña, pese a estar ligada a una tasa elevada de desorden cuando el sistema es fuertemente disipativo. [2]

Por tanto un comportamiento periódico es un sistema predecible, es decir, si se calcula previamente un gran número de medidas, el valor hallado es el mismo aunque se realice otra nueva información proporcionada por la evolución del sistema (su entropía métrica es nula). Para un comportamiento caótico, el conocimiento de la evolución no permite llevar a cabo una predicción segura, sólo se puede estimar la probabilidad de encontrar tal o cual valor. Así pues, cada nueva medida aporta una información suplementaria. La entropía métrica proporciona entonces una medida de la cantidad de nuevas informaciones engendrada permanentemente por la evolución del sistema. [44]

Considerando la porción de una trayectoria del sistema entre los instantes  $t_0$  y  $t_1$  y determinando el número de otras porciones de trayectorias dentro del mismo intervalo de tiempo se mantienen a una distancia inferior a  $r$  de la primera. Cuando se aumenta la longitud de la porción de la trayectoria central, es decir el número de porciones vecinas, situadas a una distancia inferior a  $r$ , disminuye a causa de la divergencia de las trayectorias próximas. La tasa de salida de las trayectorias próximas fuera del rango (tubo) de radio  $r$ , promediada sobre el atractor, proporciona una cota inferior de la entropía métrica. Si la serie de tiempo es muy parecida a sí misma, la divergencia de las trayectorias será lenta, y la tasa de salida y la entropía serán pequeñas. [58]

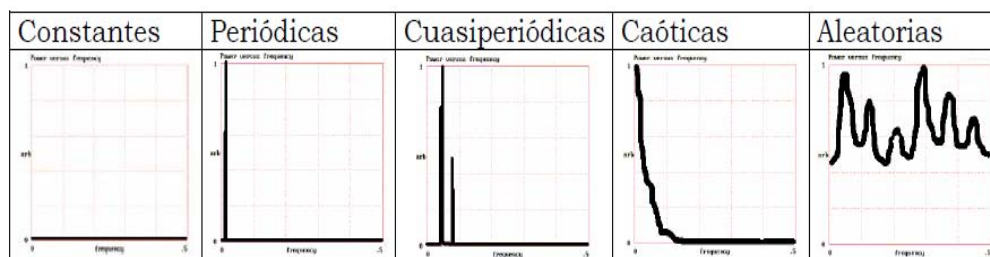


Fig. 12 Clasificación de Frecuencia Dominante de forma cualitativa, la cuantitativa adquiere un valor de cero en el estudio de la serie de tiempo de la patología Epilepsia. [20]

## ANÁLISIS DE RECURRENCIA VISUAL (VRA)

En las técnicas usadas para el análisis de series de tiempo, sus alcances y limitaciones que éstas tienen hasta el día de hoy, se introduce la metodología del Análisis de Recurrencia visual (VRA), la cual sobresale por su metodología de exploración, representa una técnica útil de comparación para detectar la no estacionariedad, y conductas caóticas en series de tiempo de diferentes fenómenos de estudio; Esta metodología a través de los Plots de Recurrencia visual (RP) y del Análisis de Cuantificación de Recurrencia (RQA) permiten revelar la correlación en los datos, imposibles de detectar en las series de tiempo originales; No requieren ningún supuesto en el aspecto estacionario, ni cualquier suposición con respecto a las ecuaciones subyacentes de movimientos de las series de tiempo; Esto es especialmente útil para los casos, en los cuales lo modesto de los datos, permite que se puedan hacer con ellos los análisis clásicos para detectar datos caóticos, pero especialmente tienen la capacidad para detectar la desviación dentro de la serie de datos. [21]

El análisis de recurrencia representa una metodología útil para detectar no estacionariedad, y conductas caóticas en series de tiempo, de los primeros usos en que se aplicó este análisis fueron para mostrar los patrones de recurrencia y no estacionariedad en series de tiempo. Pero también ya el análisis de recurrencia ha sido aplicado al estudio de sistemas caóticos porque los patrones que se repiten están entre las características más importantes de sistemas caóticos; Esta metodología a través de los plots de recurrencia, permite revelar la correlación en los datos que no son posibles detectar en las series de tiempo originales; No



requiere ningún supuesto en lo estacionario, ni cualquier suposición con respecto a las ecuaciones subyacentes de movimientos de las series de tiempo; Esto es especialmente útil para los casos en los cuales lo modesto de los datos, permite que se puedan hacer con ellos los análisis clásicos para detectar datos caóticos, pero especialmente tiene la capacidad para detectar la bifurcación de un sistema.<sup>[21]</sup>

Una ventaja importante de esta herramienta consiste en que es aplicable para todo tipo de series con la única condición de que los datos se encuentren igualmente espaciados. De esta forma, es posible analizar series de tiempos estacionarios y no estacionarios, lineales y no lineales. Desde una perspectiva teórica, la implicación de contrastar un comportamiento caótico en los sistemas biológicos radica en verificar si existe una deficiencia en su funcionamiento a nivel biofísico, indicando con ello la existencia de un mal funcionamiento a nivel celular que con lleve a una deficiencia en la salud reflejada que conlleva a un desequilibrio en la calidad de vida del individuo.<sup>[21]</sup>

Desde la perspectiva de los sistemas dinámicos no lineales, se propone que los seres vivos son sistemas abiertos y alejados del equilibrio, y que mantienen una perspectiva caótica que no permite una comprensión adecuada de los sistemas biológicos encontrados en el ser humano, debido a la combinación de sistemas caóticos, lineales y estocásticos, es decir tienen una autoorganización compleja.<sup>[21]</sup>

Otra característica de las conductas de los seres vivos es que son sistemas complejos que se definen por la interacción de múltiples variables.<sup>[21]</sup>

En pocas palabras puede decir que entre más compleja es la conducta, menos obvias son estas recurrencias, aunque es posible usar el análisis de recurrencia visual para detectar patrones ocultos, cambios estructurales en los datos y similitud en los propios patrones a través del tiempo, que exhiben la presencia de una alteración fisiológica.<sup>[21]</sup>

### ***Gráficos de recurrencia***

Al considerar una serie de tiempo unidimensional,  $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, X_n$ , generada de un sistema dinámico determinista de dimensión  $d$ , Mañé, (1981), Packard et al. (1980) y Takens (1981) demostraron que es posible, a partir de esta serie





correspondiente a una cualquiera de las variables del sistema, obtener información del sistema completo. Demostraron que se puede generar un espacio multidimensional denominado espacio de estados artificial, reconstruido o pseudoespacio de fases ("embeddingspace") de dimensión de  $\geq 2d + 1$ , de manera que las trayectorias en el espacio reconstruido tienen las mismas propiedades geométricas y dinámicas que las trayectorias en el espacio multidimensional del sistema dinámico completo.<sup>[45]</sup>

Para la construcción del espacio de estados artificial se parte de la serie temporal y se agrupan los valores de la misma formando "vectores" cuyas coordenadas son los valores de la serie y sus consiguientes retardos. El número de coordenadas es igual a la dimensión del espacio artificial ( $d_e$ ) y el número de vectores que se pueden construir es:

$$M = N - d_e \quad [39]$$

## SISTEMAS BIOLÓGICOS

---

**Un Sistema biológico**, es un sistema material complejo capaz de realizar por sí mismo mediante la unidad estructural y funcional que es la célula, el desempeño de tres funciones denominadas **funciones vitales**: nutrición, relación y reproducción.  
[27]

**La nutrición** comprende la incorporación de los alimentos al interior de la célula, la transformación de los mismos y la asimilación de las sustancias útiles para formar así la célula su propia materia.<sup>[27]</sup>

Según sea su nutrición, hay células autótrofas y células heterótrofas.

- Las células autótrofas fabrican su propia materia orgánica a partir de la materia inorgánica del medio físico que la rodea, utilizando para ello la energía química contenida en la materia inorgánica.
- Las células heterótrofas fabrican su propia materia orgánica a partir de la materia orgánica que contienen los alimentos que ingiere.<sup>[27]</sup>



**La relación** comprende la elaboración de las respuestas correspondientes a los estímulos captados. [27]

**La reproducción** es el proceso de formación de nuevas células, o células hijas, a partir de una célula inicial, o célula madre. [27]

Hay dos procesos de reproducción celular: mitosis y meiosis.

- Mediante la mitosis, a partir de una célula madre se originan dos células hijas con el mismo número de cromosomas y la misma información genética que la célula madre.
- Mediante la meiosis, a partir de una célula madre se forman cuatro células hijas, teniendo todas ellas la mitad del número de cromosomas que la célula madre.

### ***Componentes principales de un sistema biológico:***

**Bioelementos:** son los elementos químicos que en su mayoría se encuentran en los sistemas biológicos. Los bioelementos primarios constituyen el 95% de la materia viva y son C, H, O, N, P, S, [47] se asocian y dan lugar a las **BIOMOLÉCULAS** o **PRINCIPIOS INMEDIATOS** entre ellos:

- H<sub>2</sub>O: componente mayoritario e imprescindible de la materia viva.
- Sales minerales
- Hidratos de carbono: proporcionan energía inmediata
- Lípidos: proporcionan energía a largo plazo
- Proteínas: moléculas con información; responsables de los caracteres
- Ácidos nucleicos, ADN y ARN, portadores de la información genética. [47]

Los sistemas biológicos debido a su complejidad poseen una serie de atributos o características que los diferencian de cualquier sistema simple. Las propiedades de éstos son resultado de las conexiones de sus partes. Es por esto que un sistema biológico al ser aislado o seccionado de otro sistema biológico se destruye. Por tanto los sistemas biológicos complejos no son fragmentables; 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. [47]

Así, los sistemas biológicos vienen definidos por una serie de cualidades bien establecidas, su complejidad y organización a múltiples escalas y niveles de cada uno de ellos marcados por un conjunto de reglas propias que los hace diferentes. Los sistemas biológicos son capaces de adaptarse a las variaciones que puedan desplazarlos de su equilibrio y en un largo del tiempo evolucionan. [63]

Todo sistema biológico es además robusto por definición, quiere decir que son capaces de mantener su estado y función frente a perturbaciones tanto externas como internas, esto se desprende por el comportamiento caótico que se da de forma electrofisiológica dándole la condición de adaptabilidad. Cuanto más complejo es un organismo más fino es la regulación de sus procesos, y por consiguiente son más robustos y toleran mejor los cambios por ende el organismo se mantiene saludable. [63]

En biología se vienen utilizando ciencias exactas para predecir el comportamiento de sistemas biológicos y su evolución en el tiempo. Puesto que en biología la mayoría de los modelos deben contemplar grandes poblaciones celulares o similares; en diversas ocasiones se requiere la aplicación de la Mecánica Estadística con trabajos como la “Teoría de muchos cuerpos”, la cual se utiliza en casos de interacciones entre gran cantidad de entidades físicas contenidas en un espacio común. [63]

Los casos médicos y biológicos tienen un componente común procesos complejos y aleatorios. Existiendo una aplicación matemática adecuada de lo contrario no se puede saber su tendencia, tan sólo se podrá esperar a que aparezca el siguiente estado en la fracción de tiempo. En este punto surge la rama del Cálculo Diferencial y posteriormente la Teoría del Caos, aportando ambas un modelo matemático y filosófico que permite conocer el funcionamiento del sistema y también su evolución. Con estas nuevas herramientas se puede predecir la tendencia que rige al sistema



biológico mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales, que tienden a un punto o a otro en función del lugar en el que situé dicho inicio. [74]

En el área de la medicina se observan diversos comportamientos caóticos, el de mayor para el desarrollo de este trabajo es el sistema nervioso, si se creara un gráfico del movimiento que tiene el cerebro al pensar, se observará una figura muy desordenada, indicando que el cerebro está “sano”, en cambio sí se generara un gráfico armónico y ordenado es señal un cerebro enfermo. Esto implica, que un cerebro “sano” está preparado para responder a perturbaciones externas, mientras que el enfermo no podrá hacerlo. El cerebro humano por ello, es un sistema complejo con un alto grado de caoticidad. En él se procesa la información sensorial que controla y coordina el movimiento y el comportamiento, dando prioridad a las funciones corporales homeostáticas, como los latidos del corazón, la presión sanguínea, el balance de fluidos la temperatura corporal, responsabilidad de la cognición, las emociones, la memoria y el aprendizaje. [74]

## SISTEMA NERVIOSO

---

El sistema nervioso es el responsable de regular y de coordinar las relaciones del organismo con el medio externo. El sistema nervioso, a su vez está constituido por dos partes: **el sistema nervioso central (SNC) y el sistema nervioso periférico (SNP).** [64]

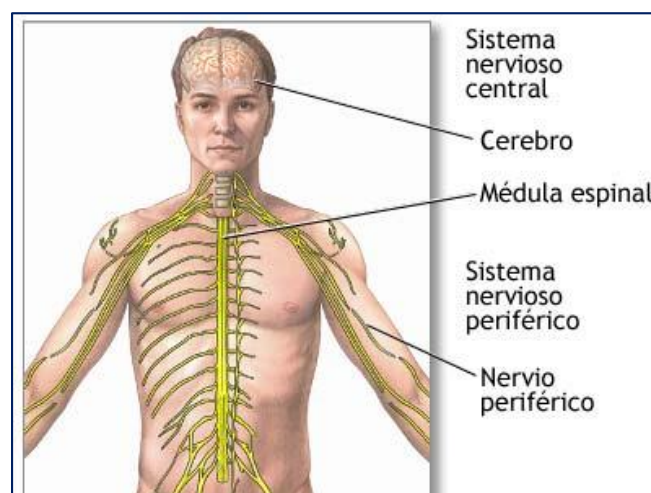


Fig. 13 Sistema Nervioso. [64]



## El Sistema Nervioso Periférico

Los centros nerviosos necesitan unas vías de comunicación con el resto del organismo, los cuales son los nervios, ellos conforman el sistema nervioso periférico. [64]

El sistema nervioso periférico humano está formado por los nervios craneales (que salen del encéfalo) y nervios raquídeos (que salen de la médula). Este sistema se divide en dos grandes partes, **el sistema nervioso somático y el sistema nervioso autónomo.** [64]

**Sistema somático:** está compuesto por fibras nerviosas periféricas que envían información sensorial al sistema nervioso central y fibras nerviosas motoras que se proyectan al músculo esquelético, además es responsable de la sensomotricidad ligada a la musculatura estriada que responsable del movimiento voluntario y la conciencia. [64]

**Sistema autónomo:** También llamado sistema nervioso visceral, se encarga del control de la función visceral (el músculo liso, cardíaco y glándulas).

Existen músculos en el cuerpo sobre los cuales normalmente no ejercemos ningún tipo de control voluntario. Ejemplo los músculos lisos, tales como los del intestino, los de otros órganos internos, algunas glándulas y el músculo cardíaco que forma el corazón. [64]

El sistema nervioso autónomo es el que regula el funcionamiento de nuestro corazón de forma automática. Es un sistema eminentemente automático; es decir, que el solo se encarga de hacer los ajustes necesarios para mantener la acción necesaria sobre el entorno, acorde a la situación que demanda el organismo, sin participación de la conciencia. [64]

El sistema nervioso autónomo se divide funcionalmente en:

-Sistema simpático: usa noradrenalina como neurotransmisor, y lo constituye una cadena de ganglios, está implicado en actividades que requieren gasto de energía, también es llamado sistema adrenérgico o noradrenérgico. [64]



-Sistema parasimpático: lo forman los ganglios aislados y usa la acetilcolina, está encargado de almacenar y conservar la energía, también llamado sistema colinérgico. [64]

### Sistema nervioso central

Está formado por médula espinal y el encéfalo (cerebro, cerebelo y bulbo raquídeo). Debido a su gran importancia y fragilidad el SNC está protegido frente a las lesiones externas con las siguientes estructuras:

- Cráneo y columna vertebral en cuyo interior se aloja.
- Tres membranas, denominadas meninges, situadas entre la protección ósea y los órganos nerviosos. De fuera hacia adentro son: duramadre, aracnoides y piamadre. Entre las meninges se encuentra el líquido cefalorraquídeo que se encarga de amortiguar los golpes sobre los centros nerviosos. [4]

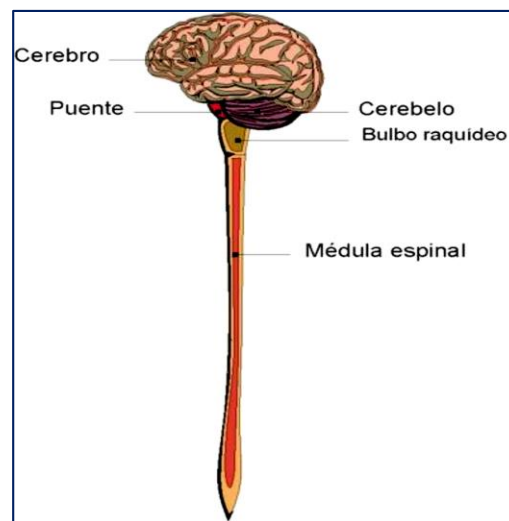


Fig.14 Sistema Nervioso Central. [4]

En el SNC se distinguen dos zonas de aspecto distinto la sustancia blanca formada por prolongaciones neuronales, generalmente axones cubiertos de mielina y la sustancia gris formada por los cuerpos neuronales.[4]



## **Médula Espinal**

Es un cordón nervioso que recorre el interior de la columna vertebral. La sustancia gris se localiza en el centro de la médula y presenta una forma característica de “alas de mariposa”. En el interior se localiza un pequeño canal llamado epéndimo en cuyo interior se encuentra líquido cefalorraquídeo. De la médula parten nervios hacia todas las partes del cuerpo excepto la médula. [4]

Las funciones de la médula espinal son:

- Se encarga de la elaboración de los actos reflejos (elaboración de una respuesta ante un estímulo sin que participe el cerebro).
- Transmite la información desde el exterior hasta el encéfalo y viceversa. [4]

## **Encéfalo**

El encéfalo está formado por el cerebro, el cerebelo, tronco cerebral y bulbo raquídeo y se encuentra alojado en el cráneo. En el cerebro y en el cerebelo se encuentra la sustancia blanca en el interior y la gris en el exterior, al contrario de lo que sucede en la médula, en cambio en el bulbo raquídeo la sustancia gris está en el interior al igual que en la médula. [4]

## **Bulbo raquídeo**

Es un ensanchamiento situado en la parte superior de la médula espinal. Las vías ascendentes procedentes de la médula y las descendentes que llegan del cerebro pasan por el bulbo, donde se entrecruzan, de esta manera la parte izquierda del cerebro controla la parte derecha del cuerpo y viceversa. [4]

La función del bulbo raquídeo consiste en el control de funciones básicas para la vida, como son la presión sanguínea, el latido del corazón, la digestión, el vómito, el ritmo respiratorio, la tos y el hipo. [4]

## **Cerebelo**

Es una estructura situada por debajo del cerebro, tiene un aspecto similar a éste, también está formado por dos lóbulos simétricos y presenta plegamientos en la superficie. La sustancia blanca se encuentra en el interior y tiene un aspecto arbolado. [4]



El cerebelo es el órgano encargado de recibir la información relativa al equilibrio que envía en oído, de esta forma regula la actividad de los músculos que participan en el mantenimiento de equilibrio. El alcohol altera su funcionamiento, tanto en el mantenimiento del equilibrio como en la coordinación de los movimientos. Además, coordina las órdenes motoras enviadas por el cerebro para que los movimientos resulten precisos, resulta fundamental para las actividades en las que participan varios músculos diferentes, como andar, montar en bicicleta o cualquier trabajo que requiera precisión. [4]

### **El tronco del encéfalo o tronco cerebral**

Es la estructura nerviosa que se encuentra en la fosa cerebral posterior. Es la mayor ruta de comunicación entre el cerebro anterior, la médula espinal y los nervios periféricos, también controla varias funciones incluyendo la respiración, regulación del ritmo cardíaco y aspectos primarios de la localización del sonido. [4]

El tronco encefálico se ocupa de todas las funciones necesarias para que el cuerpo esté vivo, como la respiración, la digestión de alimentos y la circulación sanguínea.

Parte de la función del tronco encefálico es controlar a los músculos involuntarios - los que funcionan automáticamente. Hay músculos involuntarios en el corazón, en el estómago y es el tronco encefálico quien se encarga de direccionar al corazón para que bombee más sangre cuando por ejemplo se digiere alimento. [4]

Además de estos centros vitales, el tallo cerebral contiene otros centros que controlan la tos, el estornudo, el hipo, el vómito, la succión y la deglución. [4]

La formación reticular ejerce dos efectos contrarios sobre la actividad motora; por un lado facilita o estimula tal actividad, y por el otro la deprime. Diversos estudios muestran que la formación reticular del tallo cerebral y estructuras adyacentes cerebrales (hipotálamo) son necesarias para el inicio y mantenimiento del estado de vigilia y conciencia. [4]





## Cerebro

Es la parte más importante; está formado por la sustancia gris (por fuera, formada por cuerpos neuronales y dendritas) y la sustancia blanca (por dentro, formada por axones y su mielina). [4]

Pesa aproximadamente 1200gr, dentro de sus principales funciones están las de controlar y regular el funcionamiento de los demás centros nerviosos, también en él se reciben las sensaciones y se elaboran las respuestas conscientes a dichas situaciones. Es el órgano de las facultades intelectuales: atención, memoria, inteligencia, etc. Constituye la adquisición evolutiva más importante del sistema nervioso de los animales, pues dirige la conducta aprendida. Además, sin la corteza cerebral no se puede aprender a efectuar movimientos musculares entre otros actos nerviosos. [4]

El cerebro es la parte más grande del encéfalo y el órgano nervioso más importante. En él se observan dos partes la corteza cerebral y el sistema límbico. [75]

1. La Corteza Cerebral: su superficie no es lisa, sino que tiene unas arrugas o pliegues llamadas circunvoluciones, las más superficiales son unos surcos denominados cisuras. De ellas, las más notables son llamadas las cisuras de Silvio (lateral), de Rolando (central) y la interhemisférica. Esta última divide la corteza incompletamente en dos partes llamados hemisferios cerebrales. En los hemisferios se distinguen zonas denominadas lóbulos, que llevan el nombre del hueso en que se encuentran en contacto (frontal, parietal, occipital y temporal). [4]

Los lóbulos subdividen el cerebro según su función:

Lóbulo frontal: situado en la parte anterior, por delante de la cisura de Rolando, esta da la capacidad de moverse (corteza motora), de razonar y resolución de problemas, parte del lenguaje y emociones. [4]

Lóbulo parietal: se halla por detrás de la cisura de Rolando y por encima de la de Silvio; por detrás limita con la imaginaria cisura perpendicular externa. Encargado de las percepciones sensoriales externas (manos, pies, etc.): sensibilidad, tacto, percepción, presión, temperatura y dolor. [4]



Lóbulo occipital: es el casquete posterior cerebral, que en muchos animales tiene límites bien definidos, pero que en el hombre ha perdido su identidad anatómica, encargado de la producción de imágenes.<sup>[4]</sup>

Lóbulo temporal: es una parte del cerebro localizado frente al lóbulo occipital, situado por debajo y detrás de la cisura de Silvio, aproximadamente detrás de cada cien. Desempeña un papel importante en tareas visuales complejas como el reconocimiento de caras, de la audición, equilibrio y coordinación. Es el «centro primario del olfato» del cerebro. También recibe y procesa información de los oídos contribuye al balance y el equilibrio, y regula emociones y motivaciones como la ansiedad, el placer y la ira.<sup>[4]</sup>

En la corteza cerebral se encuentran dos tipos de neuronas. Las neuronas de proyección, o principales son células que “proyectan” o envían información a neuronas localizadas en áreas lejanas al cerebro. Las interneuronas generalmente se consideran células de circuitos locales las cuales influyen en la actividad de neuronas cercanas.

La mayoría de las neuronas principales forman sinapsis excitatorias en neuronas post-sinápticas, mientras que la gran proporción de interneuronas forman sinapsis inhibitorias en las células principales o en otras neuronas inhibitorias.<sup>[12]</sup>

Las funciones de la corteza cerebral son:

- Recibir información de todos los órganos sensoriales, excepto del órgano del equilibrio, y produce las sensaciones correspondientes. Las vías nerviosas que transmiten estas informaciones terminan en zonas específicas de la corteza cerebral:
  
- Procesa la información recibida y elabora respuestas y las órdenes para los órganos efectores.
- Coordina y controla el funcionamiento de todos los órganos del sistema nervioso.
- Alberga las facultades intelectuales o funciones nerviosas superiores, como la memoria, el raciocinio, la inteligencia, la consciencia y la voluntad.



Los dos hemisferios no realizan las mismas funciones. El izquierdo es lógico y analítico, mientras que el derecho es intuitivo y creativo.<sup>[12]</sup>



Fig. 15 Funciones de la corteza Cerebral. <sup>[12]</sup>

### Sistema Límbico

El sistema límbico también llamado cerebro medio se sitúa debajo de la corteza cerebral. Está asociado a la capacidad de sentir y desear. Está constituido por seis estructuras: el tálamo (placer-dolor), la amígdala (nutrición, oralidad, protección, hostilidad), el hipotálamo (cuidado de los otros, características de los mamíferos), los bulbos olfatorios, la región septal (sexualidad) y el hipocampo (memoria de largo plazo). En estas zonas están las glándulas endocrinas más importantes para el ser humano: pineal y pituitaria. <sup>[12]</sup>

En éste reside la sede de todas las fuerzas emotivas que darán lugar a todos los deseos, sentimientos y es en él donde subyacen las inteligencias de capacidad de dejarnos afectar por algo o alguien. Proporciona el afecto que los mamíferos necesitan para sobrevivir, por tanto se introducen los sentimientos: dar o recibir afecto, recibir atención, consideración, escuchar, compasión, ternura y empatía. <sup>[12]</sup>

En este segundo cerebro existe la capacidad de sentir, pues de los tres es el que más se deja afectar por los demás y por el entorno, por ello quienes más tienen este segundo cerebro enfermo son todas aquellas personas incapaces de dejarse afectar por el entorno, así como también quienes se afectan demasiado. La realidad



que percibimos a través de la nariz, la boca y los genitales se relaciona estrechamente con este segundo cerebro. [12]

Su función principal es la de controlar la vida emotiva, lo cual incluye los sentimientos, la regulación endocrina, el dolor y el placer. Puede ser considerado como el cerebro afectivo, el que energiza la conducta para el logro de las metas - motivación. El desbalance de dicho sistema conduce a estados agresivos, depresiones severas y pérdida de la memoria, entre otras enfermedades. [12]

El sistema límbico está en constante interacción con la corteza cerebral; una transmisión de señales de alta velocidad permite que el sistema límbico y el neocórtex trabajen juntos, y esto es lo que explica que podamos tener control sobre nuestras emociones. [12]

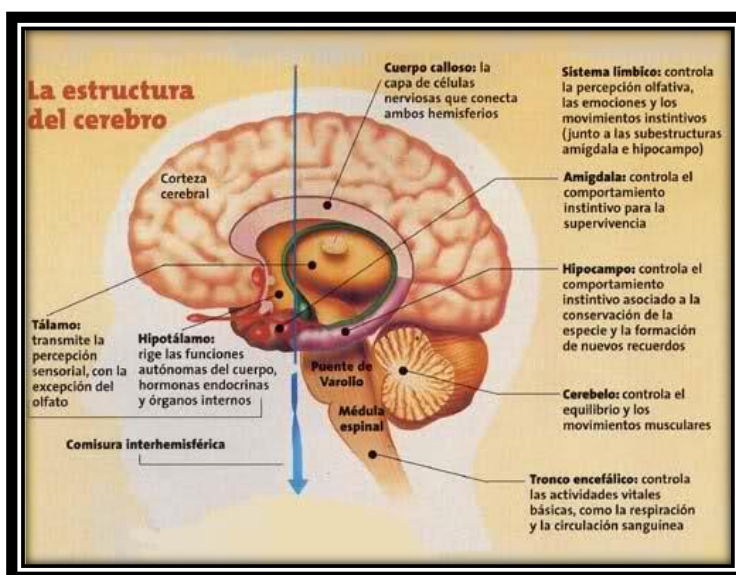


Fig. 16 Estructura del Cerebro. [12]

### ***Función de los hemisferios***

El cerebro está constituido por dos mitades, la mitad derecha llamada hemisferio derecho y la mitad izquierda llamada hemisferio izquierdo.

Ambos hemisferios están conectados entre si por una estructura denominada Cuerpo Caloso, formado por millones de fibras nerviosas que recorren todo el



cerebro. Gracias a estas fibras, los dos hemisferios están continuamente conectados.

Cada hemisferio está especializado en funciones diferentes, de ahí que uno de los aspectos fundamentales en la organización del cerebro lo constituyan las diferencias funcionales que existen entre los dos hemisferios, ya que se ha descubierto que cada uno de ellos está especializado en conductas distintas.

Conviene saber también, que existe una relación invertida entre los dos hemisferios y nuestro cuerpo. Por consiguiente, el hemisferio derecho se encarga de coordinar el movimiento de la parte izquierda de nuestro cuerpo, y el hemisferio izquierdo coordina la parte derecha.

### **Hemisferio izquierdo**

El hemisferio izquierdo es la parte motriz capaz de reconocer grupos de letras formando palabras, y grupos de palabras formando frases, tanto en lo que se refiere al habla, la escritura, la numeración, las matemáticas y la lógica, como a las facultades necesarias para transformar un conjunto de informaciones en palabras, gestos y pensamientos. John Hughlings Jackson neurólogo británico, ya en 1878 describió el hemisferio izquierdo como el centro de la facultad de expresión. Dependiendo de su severidad, una embolia que afecte a esta estructura puede producir pérdidas funcionales, pérdida funcional del habla y afectar destrezas motoras en el lado derecho del cuerpo. Se especializa en el lenguaje articulado, control motor del aparato fondo articulador, manejo de información lógica, pensamiento proporcional, procesamiento de información en series de uno en uno, manejo de información matemática, memoria verbal, aspectos lógicos gramaticales del lenguaje, organización de la sintaxis, discriminación fonética, atención focalizada, control del tiempo, planificación, ejecución y toma de decisiones y memoria a largo plazo. <sup>[30]</sup>



## Hemisferio derecho

El hemisferio derecho gobierna tantas funciones especializadas como el izquierdo. Su forma de elaborar y procesar la información es distinta del hemisferio izquierdo. No utiliza los mecanismos convencionales para el análisis de los pensamientos que utiliza el hemisferio izquierdo. Es un hemisferio integrador, centro de las facultades viso-espaciales no verbales, especializado en sensaciones, sentimientos, prosodia y habilidades especiales; como visuales y sonoras no del lenguaje como las artísticas y musicales. Concibe las situaciones y las estrategias del pensamiento de una forma total. Integra varios tipos de información (sonidos, imágenes, olores, sensaciones) y los transmite como un todo. El método de elaboración utilizado por el hemisferio derecho se ajusta al tipo de respuesta inmediata que se requiere en los procesos visuales y de orientación espacial. El hemisferio derecho está considerado de cualquier modo, como el receptor e identificador de la orientación espacial, el responsable de nuestra percepción del mundo en términos de color, forma y lugar. <sup>[12]</sup>

Controla, además, el lado izquierdo del cuerpo humano. En este caso, una embolia puede producir pérdida funcional o afectar las destrezas motoras del lado izquierdo del cuerpo. También puede causar alteración de la atención normal a la parte izquierda del cuerpo y sus alrededores aun con el otro. <sup>[12]</sup>

## NEURONAS

---

El cerebro humano no sólo es el instrumento más funcional y organizado que conocemos, sino que también es el más complejo. Está compuesto de un número de células nerviosas llamadas neuronas que, según cálculos recientes, puede alcanzar un total de unos cien mil millones. Las neuronas son células especializadas en la recepción y transmisión de información. Por lo general son sumamente pequeñas. Unas treinta mil de ellas caben en la cabeza de un alfiler. Cada una de estas neuronas está conectada a cientos o incluso miles de otras neuronas, formando redes extremadamente complejas. De estas conexiones llamadas sinapsis depende nuestra memoria, el habla, el aprendizaje de nuevas habilidades, el pensamiento, los movimientos conscientes y en fin, todo el funcionamiento de nuestra mente. <sup>[75]</sup>



Estas sinapsis, se desarrollan y modifican a lo largo de la vida de acuerdo al aprendizaje y a las experiencias de la persona. Las neuronas, además de conectarse entre sí también establecen conexiones con músculos y glándulas. [75]

Las neuronas se componen de tres partes. En primer lugar está el cuerpo celular. Éste, al igual que en otras células de nuestro cuerpo, posee una membrana, llamada membrana celular, que sirve para separar la célula de su medioambiente y regular las sustancias que entran y salen de la misma. En el interior de la célula encontramos el citoplasma, un medio líquido en el que flotan diminutas estructuras llamadas organelos que llevan a cabo diversas funciones. También encontramos a las mitocondrias, que se encargan de producir la energía necesaria para que la célula pueda subsistir y funcionar. En el centro de la célula o cerca de éste encontramos el núcleo en el cual hallamos el material genético que controla el trabajo llevado a cabo por la célula. [75]

En segundo lugar está el axón es otra de las partes de la neurona. Esta es una prolongación de la cual cada neurona sólo posee una. El axón se encarga de enviar información, en forma de impulsos electroquímicos, a otras neuronas. La extensión de estas prolongaciones varía tremendamente. En algunas neuronas el axón tiene mucho menos de un milímetro de largo mientras que en otras, como sucede por ejemplo, en las neuronas que conectan el cerebro con los músculos de la mano puede tener una extensión de más de un metro. En cuanto a su grosor, es mucho menor que el de un cabello humano. [75]

En tercer lugar tenemos las dendritas. Estas también son prolongaciones de la neurona. Sin embargo, contrario al axón, del cual cada célula nerviosa sólo cuenta con uno, la cantidad de éstas varía. Las dendritas reciben la información proveniente de los axones de otras células. La información normalmente viaja en forma de impulsos eléctricos a través del axón de una neurona. Cuando el impulso llega al final del axón éste libera una sustancia conocida como neurotransmisor que cruza el pequeñísimo espacio entre una y otra neurona. Finalmente hace contacto con unos receptores especializados localizados en las dendritas de la otra célula. Este impulso eléctrico tiene efectos sobre la actividad de la célula receptora. En algunos



casos la estimula a activarse y disparar un nuevo impulso mientras que en otros casos tiene el efecto contrario, evitar que dispare. [75]

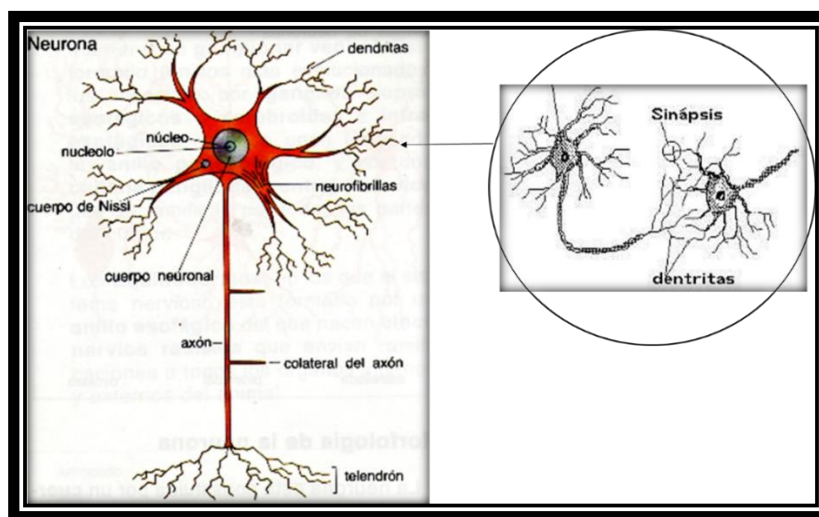


Fig. 17 Partes de la neurona y sinapsis. [75]

### Composición de la neurona

Las neuronas están rodeadas por células gliales que les sirven de apoyo y protección además de proveerles nutrientes. Se estima que en el cerebro humano hay entre 10 y 50 veces más células gliales que neuronas. Existen varios tipos de células gliales. Algunas transportan nutrientes hacia las neuronas; otras sirven de apoyo y para mantener en su lugar a las neuronas; otras se encargan de limpiar digerir las neuronas que mueren y otras de proveer una capa aislante blanca conocida como mielina a algunas neuronas. En las células que tienen esta capa los mensajes viajan a una rapidez mayor. La capa de mielina se encuentra en neuronas localizadas bajo la corteza cerebral y en el cordón espinal componiendo lo que se conoce como la materia blanca. Las neuronas que no contienen la capa de mielina se encuentran principalmente en la corteza cerebral y son de un color grisáceo formando lo que se conoce como la materia gris de cerebro. La capa de mielina, además de acelerar el flujo de información, ayuda en el proceso de reparar o regenerar neuronas que han sufrido daños. Cuando la mielina se deteriora o se daña se interrumpe el flujo de información a través de las neuronas y se producen diversas enfermedades. [75]





## EPILEPSIA

---

El concepto de epilepsia como tal, surgió en el año 1973 con la OMS. Define epilepsia como una afectación crónica de etiología diversa, caracterizada por crisis ya sea motora, sensitiva, autonómica o psíquica secundaria a una despolarización (desde el punto de vista físico y químico y fisicoquímico) excesiva de una población de neuronas en el cerebro para generar convulsiones recurrentes, que suelen dejar consecuencias neurobiológicas, cognitivas, psicológicas y sociales.<sup>[15]</sup>

Por tanto la epilepsia se debe a una despolarización excesiva (facilitación) de la membrana de las neuronas, que origina por un lado, una descarga neuronal unitaria de alta frecuencia y, por otro lado, cambios hiperpolarizantes compensatorios (inhibición) que tratan de regular esta descarga. <sup>[13]</sup>

Es entonces donde los potenciales de acción ocurren como consecuencia de la despolarización de la membrana neuronal, con una propagación de la despolarización membranal hacia el axón que induce la liberación de neurotransmisores (son sustancias que se liberan de la terminal nerviosa presináptica a la sinapsis y posteriormente se unen a receptores postsinápticos específicos para dicho sustancia o ligando. La unión de los ligandos produce la activación de canales y el paso de iones adentro o afuera de las células. Los neurotransmisores más importantes en el cerebro son el glutamato, el ácido gamma-amino-butírico (GABA), la acetilcolina (ACh), la norepinefrina, la dopamina, la serotonina y la histamina) en su parte terminal. El potencial de acción es un fenómeno que ocurre por los cambios locales en el potencial de membrana como consecuencia de un flujo neto de iones positivos hacia el interior de la misma. De esta manera, el potencial de membrana varía con la activación de canales cuya conductancia se afecta por la unión de neurotransmisores; o con la activación de canales dependientes de voltaje, cuya conductancia es modificada por cambios en el potencial transmembrana o con cambios en el compartimento intracelular iónico. Así la despolarización-hiperpolarización y descargas neuronales excesivas son la causa de la actividad convulsiva. <sup>[13]</sup>



Las crisis se pueden presentar por varios factores:

- 1.- Fallo en la permeabilidad de la membrana, que puede incluir un fallo en el paso de la ATPasa-Na/K, por lo tanto una disminución de los iones K, o un aumento de los iones Ca<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> a través de los canales iónicos.
- 2.- Una reducción en los canales inhibitorios (neurotransmisores).
- 3.- Acoplamiento sináptico excitador entre neuronas de la región epileptogena. Es el acoplamiento en donde se va a producir la sincronización no fisiológica de las neuronas y puede llegar a propagarse en alguna zona o en ocasiones en toda la corteza cerebral, lo que explica el tipo de crisis convulsiva que se puede llegar a dar. [33]

Una convulsión o crisis epiléptica o comicial es un evento súbito y de corta duración, caracterizado por una anormal y excesiva o bien sincrónica actividad neuronal en el cerebro, con o sin disminución en el nivel de consciencia o movimientos convulsivos y otras manifestaciones clínicas. [76]

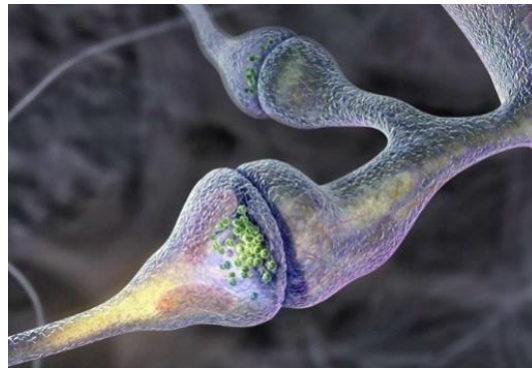


Fig. 18 Sinapsis Neuronal. [76]

### ***Clasificación internacional de las crisis epilépticas.***

Está basada en la semiología clínica de las crisis. La gran división es entre **generalizadas y parciales**. [15]

#### **Crisis generalizadas**

Las **generalizadas**, que son las más frecuentes, pueden ser:

1. Convulsivas: Míoclonicas, atónicas, tónicas clónicas y tónico-clónicas.
2. No convulsivas: Ausencias. [15]



## Descripción clínica de las crisis convulsivas generalizadas

Esta forma es la más frecuente y se la conoce y denomina habitualmente como “Crisis del gran mal”, básicamente se trata de movimientos tónico-clónicos generalizados, de presentación abrupta, con alteración aguda de la conciencia, que duran pocos minutos y que generalmente cursan con tres fases definidas

- ❖ Fase tónica: Pérdida de conocimiento brusca con caídas e hipertonía muscular generalizada
- ❖ Fase clónica: Movimientos alternativos de flexo-extensión, con sacudidas rítmicas a nivel cefálico y los cuatros miembros simultáneamente Es habitual que se acompañe de mordedura de lengua y labios e incontinencia urinaria
- ❖ Fase poscrítica: Recuperación paulatina de la conciencia, con amnesia de lo ocurrido, cefalea, dolores musculares difusos; al cabo de una hora el paciente se halla habitualmente recuperado. [15]

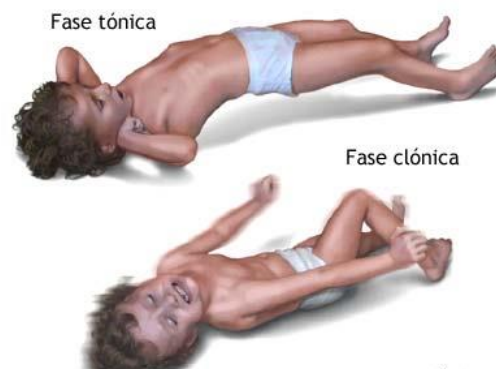


Fig. 19 Crisis generalizada (ataque epiléptico tónico – clónico).

Estas crisis registran factores facilitadores como:

- ❖ La ingesta de alcohol
- ❖ Deprivación de sueño
- ❖ Ingestión de estimulantes (café, analépticos, etc.)
- ❖ Periodo menstrual. [15]

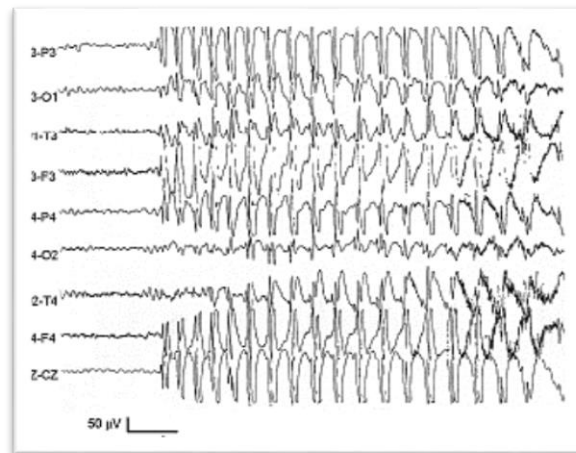


Fig.20 Crisis generalizadas obsérvese el predominio de la amplitud en las derivaciones: F3-P3: frontoparietal izquierda; P3-O1: parietooccipital izquierda; O1-T3: occipitotemporal izquierda; T3-F3: temporofrontal izquierda; F4-P4: frontoparietal derecha; P4-O4: parietooccipital derecha; O2-T4: occipitotemporal derecha; T4-F4: temporofrontal derecha; FZ-CZ: vértex anterior-vértex medio. [15]

### **Descripción clínica de las crisis generalizadas no convulsivas.**

Dentro de este grupo las más frecuentes son las llamadas ausencias porque el cuadro clínico remeda esta situación y la población la denomina “como que se va” “como una ida” “como que se desconecta” y cuando no como “ausencia”. [76]

Se presentan en la edad escolar y se caracterizan por múltiples crisis durante el día que básicamente se caracterizan por una alteración breve de conciencia, sin caída al suelo, pérdida de contacto con el ambiente que lo rodea a veces con un parpadeo rítmico muy evocador. [22]

Se caracterizan por ser fácilmente provocadas por la hiperventilación.

Su pronóstico es favorable, aunque algunas veces puede cursar con trastorno de aprendizaje.

### ***Crisis Parciales***

Las **crisis parciales** pueden ser:

1. *Simples*: Sin pérdida de conciencia

- Con signos motores
- Con signos sensitivos



- Con síntomas psíquicos
- Con signos autonómicos

## 2. Complejas: Con alteración de conciencia

- Parciales simples que evolucionan a generalizadas
- Parciales complejas que evolucionan a generalizadas
- Parciales simples que evolucionan a parciales complejas y posteriormente a generalizadas. [76]

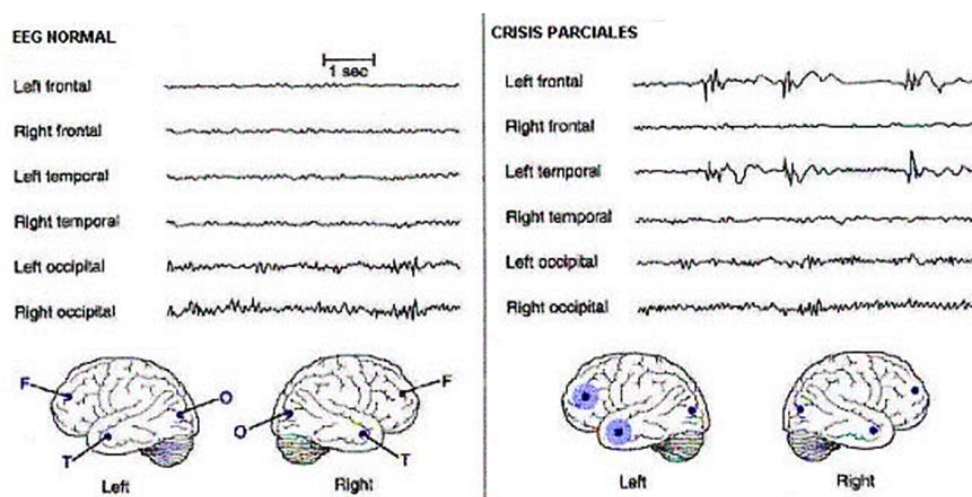


Fig.21 EEG normal vs. Crisis parciales. [76]

### Descripción clínica de las crisis parciales simples.

Generalmente son la expresión clínica de una lesión cerebral focal y por lo tanto la localización determinara la expresión clínica.

Este foco epileptogeno constituido, inestabiliza eléctricamente la zona afectada pero no difunde de allí que una característica básica sea que no exista compromiso de la conciencia. [76]

### Las manifestaciones clínicas de las crisis parciales simples pueden ser:

- a) Motoras: Aquí el foco se halla en la corteza frontal prerrolándica, la expresión clínica está dada por contracciones musculares, en forma de crisis, involuntarias, localizadas en territorio del hemicuerpo contralateral (cara y/o brazo y/o miembro inferior) que provocan desplazamiento de los segmentos afectados.
- b) Sensitivas: El foco se localiza en áreas parietales y occipitales



La expresión clínica se caracteriza por compromiso de uno o más de los cinco sentidos, además de vértigos y alucinaciones.

c) Autonómicas: El foco se localiza en áreas temporales. Las manifestaciones clínicas están constituidas por crisis de sudoración, sensaciones epigástricas, midriasis, fenómenos vasomotores, etc.

d) Fenómenos psíquicos: El foco se localiza en áreas temporales y secundariamente en áreas frontales anteriores

Su expresión clínica se caracteriza por fenómenos psíquicos dado por experiencias que afectan la memoria (ya visto. nunca visto), compromiso afectivo (miedo o placer); ilusiones y alucinaciones. [76]

### **Descripción de las crisis parciales complejas.**

Las crisis parciales complejas, presentan una sintomatología compleja más un compromiso de la conciencia.

Se expresan con automatismos que consisten en movimientos involuntarios con una actividad motora coordinada, repetitiva y que no tiene sentido. Los automatismos más comunes son:

- Movimientos de masticación
- Movimientos orales de chupeteo
- Caminar
- Automatismos gestuales

El foco epileptogénico se localiza habitualmente en zonas temporo-frontales.

Pero su localización puede ser diversa.

Las crisis parciales complejas pueden iniciarse como crisis parciales simples y luego progresar a generalizada. [76]

## **ANTIEPILEPTICOS**

---

La persona que padece epilepsia recibe tratamiento de manera continuada durante largos períodos de tiempo (2-4 años o prácticamente el resto de su vida). Por ello, el tratamiento debe interferir lo menos posible en su vida diaria a fin que mantenga un manejo eficaz del régimen terapéutico, lo cual facilita el control de la enfermedad.

[49]



El objetivo de la farmacoterapia antiepiléptica y anticonvulsiva es suprimir la actividad neuronal lo suficiente como para prevenir la hiperactividad. Estas sustancias no modifican el curso de la enfermedad (no la curan ni la detienen), sino que tratan los síntomas (disminuyen o inhiben las crisis) para mejorar la calidad de vida del paciente y disminuir las posibilidades de que aparezca daño cerebral secundario a las crisis. [76]

Al mismo tiempo, se trata de conseguir que el tratamiento provoque efectos secundarios, que interfiera con la vida habitual del paciente en la medida de lo posible. En este sentido, además, la presencia de efectos secundarios es uno de los factores de riesgo para que se produzca un manejo ineficaz del régimen terapéutico y, por tanto, la recurrencia de las crisis convulsivas (comiciales) que, de seguir el régimen, estarían controladas. [76]

Cuando se selecciona un antiepiléptico debe ajustarse a las características de la persona: es decir, lo ideal es buscar el antiepiléptico que a dosis baja interrumpa la aparición de crisis y se adapte a las necesidades individuales de cada paciente. [76]

Puede ocurrir que un antiepiléptico sea adecuado para el tipo de epilepsia, pero ocasione efectos secundarios graves o difícilmente tolerables a lo largo del tiempo, por ejemplo que causase una sedación excesiva o incapacidad para concentrarse. Esto podría interferir con la actividad laboral, actividad social, disminuir la autoestima, etc. [76]

En el inicio de la terapia con antiepilépticos suele requerir de un período de tiempo hasta que la medicación queda ajustada a las características de la persona. [76]

Parece que uno de los indicadores de que existe un menor riesgo de recurrencia de crisis epilépticas, en personas que toman tratamiento de forma crónica, es que hayan pasado entre 2 y 4 años sin crisis. A mayor tiempo sin crisis, menor riesgo de que se repitan a la retirada de la medicación. Por tanto, parece prioritario conseguir un manejo eficaz del régimen terapéutico en esos 2 años. Transcurrido ese tiempo, sino se han producido crisis, es posible que el neurólogo se plantee la posibilidad de retirar el fármaco de manera paulatina. [76]



Respecto a la retirada de la medicación antiepiléptica, existe consenso en cuanto a que no es adecuado mantener el tratamiento de manera indefinida en pacientes que no presentan crisis en un largo período de tiempo (2-4 años). No existe consenso respecto a la duración de la retirada paulatina (6 semanas, 6 meses, no se recomiendan tiempos superiores a 6 meses). [15]

En este período de retirada, la persona puede presentar un diagnóstico de ansiedad, relacionado con miedo a presentar recurrencias. La retirada de la medicación debe consensuarse siempre con el paciente y está muy relacionada con los riesgos que el paciente está dispuesto a asumir. [15]

1ª generación	2ª generación	3ª generación
Etosuximida	Ácido valproico	Gabapentina.
Fenitoína	Carbamacepina	Lamotrigina
Fenobarbital	Clonacepam	Vigabatrina

Tabla. 1 Fármacos Antiepilépticos Fármacos antiepilépticos. [76]

### Mecanismos de acción

Los mecanismos precisos y exactos de acción de estos fármacos no se conocen en su totalidad. Se conocen dos grandes mecanismos<sup>1</sup>, a través de los cuáles estos medicamentos suprimen el exceso de actividad eléctrica neuronal. Es decir, estos mecanismos de acción estabilizan la membrana neuronal e impiden su excitación. [53]

a.- Acción sobre los neurotransmisores:

- Potenciación de la acción del GABA: el GABA es un neurotransmisor cerebral que inhibe la acción neuronal. Está relacionado con la entrada de iones de cloro en la neurona, que impiden que ésta pueda ser estimulada. Algunos ejemplos son las benzodiacepinas, los barbitúricos o la vigabatrina.
- Bloqueo de receptores de aminoácidos excitantes: por ejemplo la lamotrigina.





b. Acción sobre canales iónicos: inhibición de los canales iónicos que intervienen en la excitabilidad neuronal: la inactivación o la modulación de estos canales provoca la supresión o la disminución de la actividad neuronal.

- Bloqueo canales del Na<sup>+</sup>: carbamacepina, valproato.
- Bloqueo canales del Ca<sup>+</sup>: etosuximida.
- Modulación canales del K<sup>+</sup>: mecanismo de reciente descubrimiento.<sup>[53]</sup>

### **Efectos secundarios**

Los efectos secundarios rara vez constituyen una amenaza vital para una persona, pero reducen de forma significativa su calidad de vida y son un factor de riesgo para un manejo ineficaz del régimen terapéutico.<sup>[62]</sup>

La neurotoxicidad (somnolencia, dificultad para concentrarse, dificultad para la coordinación de movimientos, alteraciones cognitivas y conductuales, etc.) es el efecto secundario por excelencia de estos fármacos. Aparece con más frecuencia e intensidad en los de 1ª generación y en algunos de la 2ª. En menor medida en los de la 3ª. Esta es la gran ventaja de estos fármacos sobre los fármacos antiepilépticos clásicos.<sup>[62]</sup>

Hay factores que dependen de la persona que implican mayor riesgo de desarrollar efectos secundarios.

- Edad: neonatos, lactantes y niños. Ancianos
- Sexo: mujeres. Las niñas en tratamiento con topiramato abandonan más frecuentemente el tratamiento por efectos secundarios que los niños. Además, los fármacos antiepilépticos pueden interactuar con los anticonceptivos orales (disminuyen su eficacia) y son teratógenos, por lo que la terapia se debe ajustar en mujeres en edad fértil.
- Presencia de patología asociada: insuficiencia renal y hepática. En estos casos la dosis debe ajustarse. El enfermero debe estar atento a la aparición de efectos secundarios aún a dosis inferiores a las habituales.<sup>[62]</sup>



## 1. Efectos secundarios en los fármacos de 1ª generación

Son los más graves y los mejor conocidos.

- Somnolencia (efecto neurotóxico): todos, en especial el fenobarbital.
- Náuseas, vómitos, dolor epigástrico, anorexia: fenitoína y etosuximida.
- Hiperplasia gingival: fenitoína en el 20% de los pacientes.
- Nistagmo, ataxia, confusión, alucinaciones: intoxicación por fenitoína.
- Lupus eritematoso sistémico: fenitoína y etosuximida.
- Hepatotoxicidad: fenitoína.
- Alteraciones hemáticas: aplasia medular (etosuximida), anemia (fenobarbital y fenitoína). [62]

## 2. Efectos secundarios en los fármacos de 2ª generación

Menor nivel de toxicidad.

- Somnolencia, sedación, ataxia, dificultad para la coordinación de movimientos, náuseas, vómitos, anorexia: sobre todo con ácido valproico, carbamacepina y clonacempam. Son efectos que tienden a atenuarse con el tiempo porque son fármacos que provocan tolerancia.
- Diplopia, vértigo incoordinación, SIADH, hiponatremia: en intoxicación por carbamacepina.
- Reacciones cutáneas: todos
- Hepatotoxicidad: mucho más leve que la provocada por fenitoína. La excepción en este grupo es la hepatotoxicidad grave que puede provocar el ácido valproico.
- Alteraciones hemáticas: aplasia medular con la carbamacepina. [62]

## 3. Efectos secundarios en los fármacos de 3ª generación

Se conocen menos, debido a que son de nueva aparición.

- Náuseas, vómitos, mareos, visión borrosa, diplopia: más frecuente con lamotrigina.
- Somnolencia y sedación: gabapentina y vigabatrina.



- Confusión: vigabatrina (puede precipitar brotes psicóticos, se desaconseja su uso en personas con antecedentes de psicosis)
- Reacciones cutáneas graves: lamotrigina

En todos los fármacos antiepilépticos hay riesgo de falta de vitamina K y de ácido fólico, por lo que puede haber riesgo de hemorragias (generalmente poco importantes) y de malformaciones fetales a nivel del tubo neural. [62]

## ELECTROENCEFALOGRAMA (EEG)

El electroencefalograma consiste en registrar los potenciales bioeléctricos generados por la actividad neuronal del cerebro, esta amplitud es baja, por el orden de los 150 UV para un adulto normal en vigilia. [52]

El EEG se usa para diagnosticar enfermedades cerebrales tales como epilepsia, Alzheimer, tumores, trastornos de sueño, etc. [52]

También se emplea para determinar las reacciones que ocurren en el cerebro ante distintos estímulos. [52]

La recolección de señales las realizan transductores que captan y amplifican las señales bioeléctricas, estos transductores son similares a los usados para ECG, la disposición de los electrodos de los transductores varía dependiendo de qué señal se pretende captar. [52]

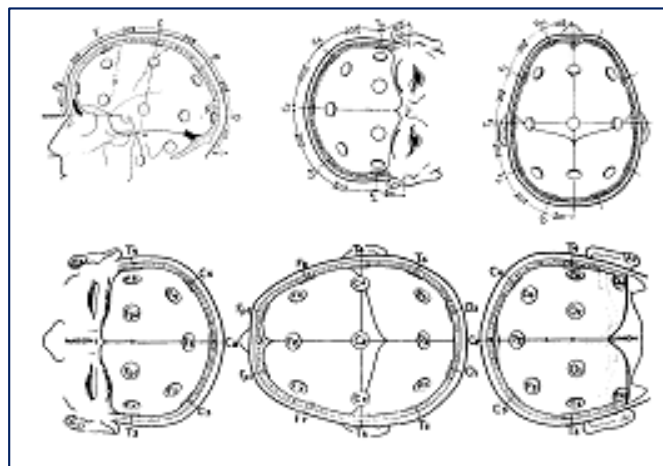


Fig. 22 Electrodos dispuestos a nivel de la piel. [52]



Las mediciones a nivel del cerebro arrojan como resultado 4 tipos de ondas cerebrales relacionadas con el estado de vigilia de una persona. [52]

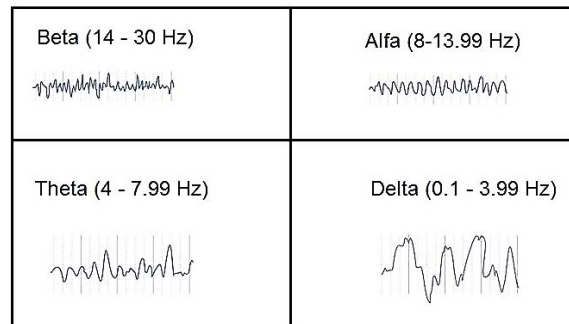


Fig. 23 Tipos de Ondas Cerebrales. [79]

### Descripción detallada

Ondas Alfa (7,5 a 13 Hz): Tienen una frecuencia de 8–12 Hz y están asociadas con estados de relajación. Se registran especialmente momentos antes de dormirse. Sus efectos característicos son: relajación agradable, pensamientos tranquilos y despreocupados, optimismo y un sentimiento de integración de cuerpo y mente. Se registran en sujetos normales despiertos, sin ninguna actividad y con los ojos cerrados, localizándose sobre todo en la zona occipital; su amplitud está comprendida entre 20 y 200 mV. [79]

Ondas Beta (13 a 28 Hz): Originan un campo electromagnético con una frecuencia comprendida entre 13 y 30 Hz (vibraciones por segundo). Se registran cuando la persona se encuentra despierta y en plena actividad mental. Los sentidos se hallan volcados hacia el exterior, de manera que la irritación, inquietud y temores repentinos pueden acompañar este estado. Se dividen en dos tipos fundamentales, de comportamiento muy distinto, b1 y b2. Las ondas b1, tienen una frecuencia doble a las ondas b2 y se comportan de forma parecida a ellas. Las ondas b2, aparecen cuando se activa intensamente el SNC o cuando el sujeto está bajo tensión. [79]

Ondas Theta (3,5 a 7,5 Hz): Con una frecuencia de 4-7 hz., se producen durante el sueño (o en meditación profunda, entrenamiento autógeno, yoga...), mientras



actúan las formaciones del subconsciente. Pueden presentarlas los adultos en períodos de stress emocional y frustración. Se localizan en las zonas parietal y temporal. [79]

Ondas Delta (0,2 a 3,5 Hz): Con una frecuencia de 1-3 Hz, surgen principalmente en el sueño profundo y muy raras veces se pueden experimentar estando despierto. Sus estados psíquicos correspondientes son el dormir sin sueños, el trance, la hipnosis profunda y en enfermedades orgánicas cerebrales graves. [79]

### Cómo leer el Electroencefalograma

Cuando se interpreta el EEG se ven varias líneas de actividad eléctrica cerebral. A la izquierda de cada línea aparecen unas letras y unos números, que nos dicen cuál es la localización cerebral de cada línea. [26]

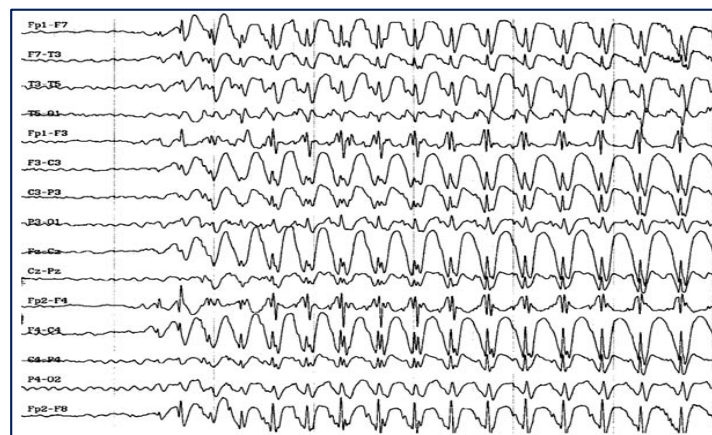


Fig.24 Electroencefalograma. [26]

Lo que registra el EEG es la corriente eléctrica de las neuronas y circuitos neuronales que hay en el cerebro, y que la corriente eléctrica se mide siempre entre dos puntos (diferencia de potencial), en este caso entre dos electrodos, que están situados en la cabeza en dos lugares diferentes. [26]

La localización de cada electrodo se define por una letra y un número. La letra corresponde al área cerebral (PG: ocular, FP: frontopolar, F: frontal, P: parietal, C: central, T: temporal, A: auricular y O: occipital). El número sigue dos reglas, primera los impares corresponden al hemisferio izquierdo y los pares al hemisferio derecho; y segunda, se numeran las áreas cerebrales de acuerdo a la siguiente imagen:

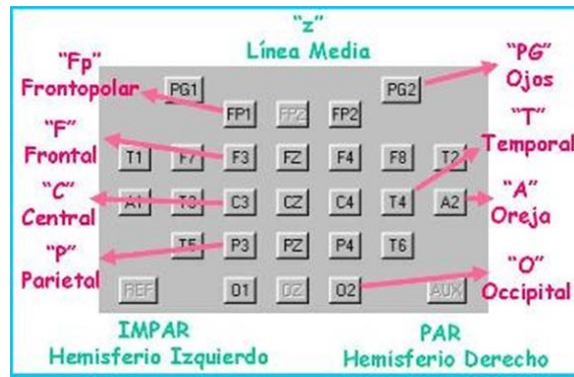


Fig. 25 Localización cerebral, si observa la línea F4-C4 se dice que recoge la actividad eléctrica entre el electrodo F4 (frontal derecho) y el electrodo C4 (central derecho). [26]

De acuerdo con estas reglas, que son estandarizadas por los organismos internacionales (American Electroencephalographic Society), se realizan diferentes montajes EEG, que son las combinaciones entre los electrodos que utiliza el neurofisiólogo para "leer" la actividad cerebral, y saber a qué zona pertenece cada línea del electroencefalograma. [26]

### Tipos de Montajes

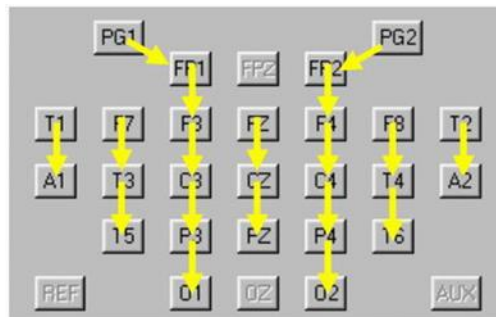


Fig. 26 Montaje Transversal. [26]

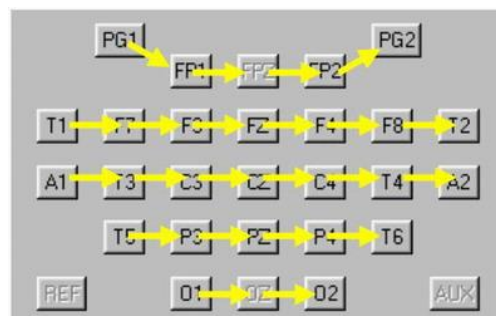


Fig. 27 Montaje Longitudinal. [26]

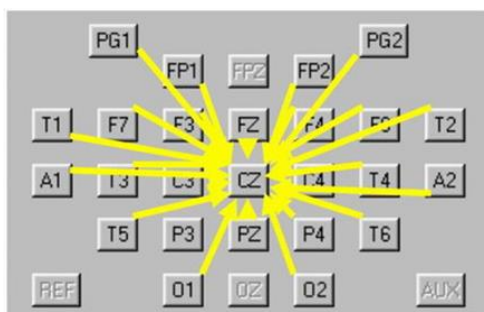


Fig. 28 Montaje Referencial. [26]

Se dispone de estándares para la realización del EEG (American Electroencephalographic Society, minimum technical requirements for performing clinical electroencephalography, minimum technical standards for pediatric EEG, standards of practice in clinical EEG, a proposal for standard montages to be used in clinical EEG, Guidelines for standard electrode position nomenclature, Guidelines for writing EEG reports).

## CAMPO MAGNETICO

La ciencia del magnetismo nació de la observación de que cierta "piedra", como la magnetita o "piedra imán" ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) atraían pedazos de hierro, este fenómeno se conoce desde la antigüedad como magnetismo que viene de la región de Magnesia en el Asia Menor, uno de los lugares en donde se encontraban este tipo de piedras. [43]

En la antigua China se conocían las propiedades de las agujas imantadas, que suspendidas de un hilo, señalaban al norte, fenómeno que es base de la brújula, ocurriendo en Occidente en el siglo XIII. [43]

Paracelso, en el siglo XVI, utilizaba en sus tratamientos barras imantadas, distinguiendo los distintos efectos terapéuticos del polo norte y del polo sur. En el año 1600, el médico inglés William Gilbert, en su obra De Magnete, considera la tierra como un enorme imán, lo que explicaba la orientación de la aguja magnética en el sentido de los meridianos utilizando estos conocimientos se crea la



imanoterapia descubierta por Mesmer en el siglo XVII, la cual fundamenta y aplica con gran éxito, estableciendo la teoría de "magnetismo animal". [43]

En el siglo XIX, el estudio de las corrientes alternas conduce al descubrimiento de la producción, a partir de esta la teoría del campo electromagnético. Los trabajos de Faraday, Maxwell y Gauss establecen las bases teóricas de sus aplicaciones prácticas, industriales y médicas. [43]

A principios del presente siglo, destaca el interés por el efecto de los campos magnéticos sobre el organismo humano. M.F. Barnothy, en Estados Unidos, inicia una serie de recopilaciones de trabajos sobre el efecto biológico de los campos magnéticos utilizados en la NASA, por lo que propicia numerosas investigaciones en distintos países, en especial en Alemania e Italia, que destaca el interés por la aplicación terapéutica de la magnetoterapia, sin embargo, se debe recordar que el descubrimiento del campo magnético fue en China y por lo tanto los pioneros en la aplicación de la magnetoterapia. [43]

### **El Campo Magnético Terrestre**

Todos los seres vivos se encuentran bajo el influjo del campo magnético terrestre. Este campo, a lo largo de la historia geológica de la tierra, ha sufrido notables modificaciones, tanto en dirección como en intensidad, causado por la utilización y aplicación mal canalizada de la ciencia, tecnología y uso excesivo de los productos naturales por el hombre. En la actualidad, y aunque su intensidad varía según diversos factores, en especial la latitud, se considera que su intensidad promedio es de 0.4-0.5 gauss. [43]

La mayoría de los seres vivos presentan sensibilidad al campo magnético terrestre (ciertas bacterias, palomas mensajeras, delfines, etc.), los seres humanos tienen también una sensibilidad especial en este sentido. [43]





## ***Biofísica del Campo Magnético***

El campo magnético se establece entre un polo norte y un polo sur; la intensidad del campo magnético (H) se mide en gauss. [14]

El campo magnético no afecta por igual las diferentes sustancias, por ello se denomina inducción magnética (B). [14]

La relación entre ambas magnitudes es:  $B = \mu H$ , en donde  $\mu$  es una constante denominada permeabilidad magnética, que depende de las características del medio. [14]

En relación a la inducción magnética, se distinguen tres tipos de sustancias:

- Diamagnéticas: que son repelidas por los campos magnéticos (tienen permeabilidad magnética negativa), como el bismuto, el cobre, el antimonio.
- Paramagnéticas: que son atraídas por los campos magnéticos con una intensidad de magnitud semejante a la intensidad de dicho campo (permeabilidad magnética igual a 1)
- Ferromagnéticas: que son atraídas con gran intensidad por los campos magnéticos. La más importante es el hierro y, en menor proporción, el níquel y el cobalto. [14]

La unidad de inducción magnética, hasta la adopción del Sistema Internacional de Unidades (SI) en 1975, era el gauss. Desde la adopción del SI es el tesla, que equivale a 10.000 gauss. Esta disparidad de magnitud hace que, en medidas de pequeña intensidad, siga utilizándose habitualmente el gauss (equivalente a 10<sup>-4</sup> teslas) y que para medir efectos de campos magnéticos de muy pequeña intensidad, como los producidos por las redes de conducción eléctrica, se emplee indistintamente el microtesla (en Europa) o el miligauss (en Estados Unidos). La equivalencia es:  $1 \mu T = 10 \text{ mG}$ . [14]

Es importante saber que el organismo humano, en su conjunto, se comporta ante los campos magnéticos como paramagnético, es decir, que su inducción magnética es prácticamente igual, numéricamente, a la intensidad del campo magnético. Por ello, en aplicaciones médicas, se emplea el gauss, para indicar la intensidad de



campo magnético. No obstante, en el organismo humano hay ciertas localizaciones de comportamiento diamagnético (membranas celulares), y otras de comportamiento ferromagnético (hierro contenido en la hemoglobina y en ciertas enzimas y pigmentos). [14]

### ***Efectos Biológicos***

La eficacia del efecto terapéutico de los campos magnéticos, plantea la posibilidad de utilizar estos en bajas frecuencias, ya que al contrario de la alta frecuencia, el campo magnético es mucho más intenso que el eléctrico que causa efectos adversos. En la actualidad, la frecuencia empleada en la producción de campos magnéticos terapéuticos es de 1 a 100 Hz. [78]

Los campos magnéticos producen efectos bioquímicos, celulares, tisulares y sistémicos. [78]

En el ámbito bioquímico, encontramos los siguientes efectos fundamentales:

- a) Desviación de las partículas con carga eléctrica en movimiento.
- b) Producción de corrientes inducidas, intra y extra-celulares.
- c) Efecto piezoeléctrico sobre hueso y colágeno.
- d) Aumento de la solubilidad de distintas sustancias en agua.

A nivel celular, los efectos indicados en el ámbito bioquímico determinan lo siguiente:

- a) Estímulo general del metabolismo celular.
- b) Normalización del potencial de membrana alterado.

Por una parte, las corrientes inducidas producidas por el campo magnético producen un estímulo directo del trofismo celular, que se manifiesta por el estímulo en la síntesis del ATP, del AMPc y del ADN, favoreciendo la multiplicación celular, y en la síntesis proteica y de la producción de prostaglandinas (efecto antiinflamatorio). [78]



La bomba sodio potasio ATPasa es un complejo enzimático ubicado en la membrana celular, el cual convierte la energía química del ATP para ayudar al traslado de los iones a través de un gradiente electroquímico. Además, su rol fundamental es mantener altas concentraciones de potasio intracelular y bajas de sodio. Esta bomba mantiene el gradiente de sodio entre los compartimientos extra e intracelulares en varios tejidos influyendo en el volumen celular. [32]

Por otra parte, hay un estímulo del flujo iónico a través de la membrana celular, en especial de los iones  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . Esta acción tiene gran importancia, cuando el potencial de membrana está alterado. Las cifras normales del potencial de membrana se sitúan entre -60 y -90 mV. Este potencial se mantiene mediante un mecanismo activo, en el que es fundamental la expulsión al exterior de la célula del ion  $\text{Na}^+$ , que penetra en ella espontáneamente (bomba de sodio). [78]

El proceso de mantenimiento de las concentraciones de iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  ha sido denominado como un "ciclo fútil" que consiste en el transporte cíclico de iones sodios donde la energía residual (liberada en forma de calor) ocurre en todas las células del organismo jugando un rol significativo en la termogénesis y la regulación del balance energético. [32]

En circunstancias patológicas, la bomba de sodio no actúa y el ion sodio queda intracelular, con retención de agua (edema celular). En esta situación, los campos magnéticos pueden normalizar el potencial de membrana alterado. Tanto por el efecto de las corrientes inducidas intracelularmente, como por el efecto directo de los campos magnéticos sobre los iones sodio, éstos se movilizan hacia el exterior y restablecen la normalidad del potencial de membrana, por lo que reducen el edema celular, que es uno de los primeros estadios de la inflamación a escala celular, tisular y de órganos. [78]



## Aplicación del campo magnético en la Medicina

Los seres vivos están compuestos por elementos o partículas que integran un conjunto, dichos elementos tienen la misma frecuencia vibratoria o desarrollan un sistema de adaptación. Si este proceso de adaptación fallara se producirían lesiones en los tejidos biológicos. La salud de todos los seres vivos depende de la neutralización armónica y el equilibrio de todos los elementos vibratorios.

El cuerpo humano está integrado por millones de células que funcionan entre otras razones por tener polos positivos y negativos formando un campo electromagnético. Las vibraciones de sus tejidos le dan una identidad individual. La suma de las vibraciones de los tejidos biológicos se transmite por medio de la piel constituyendo una red o malla. Esta red energética que circunda el cuerpo físico ha recibido diferentes nombres, para nosotros es Campo Magnético, para otros es Qichi, plasma biológico o aura. Se plantea que en caso de producirse una descompensación en este equilibrio vibratorio la persona podría estar en riesgo de perder su estado de salud.<sup>[11]</sup>

La influencia del Campo Magnético sobre los organismos vivos ha despertado nuevas expectativas sobre el papel que el electromagnetismo puede jugar en la medicina, se demostró que las ondas cerebrales se encuentran asociadas a un Campo Magnético muy débil específicamente las ondas Alfa y Delta y ondas similares se encuentran igualmente asociadas al corazón humano.<sup>[11]</sup>

Cuando a través de un conductor circula una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético se induce a través del mismo la denominada fuerza electromotriz. El conductor puede ser una célula, un gen o una proteína, se produce una pequeña deformación mecánica que provoca la reorientación de las moléculas y átomos de la estructura en cuestión y por ello cambia su posición espacial.<sup>[11]</sup>

Ha sido demostrado por varios investigadores que existen tejidos en humanos que poseen tales propiedades piezoeléctricas. Estas estructuras pueden ser genes, componentes citoplasmáticos, colágenas o células óseas y los efectos comentados se refieren a la conversión de las oscilaciones magnéticas a vibraciones mecánicas y viceversa. De este modo la estructura de los genes, factores de crecimientos,



proteínas, hormona y ARN entre otras formaciones son controladas por este mecanismo junto a otros más generales como las acciones bioquímicas. [11]

Los efectos biológicos se pueden clasificar básicamente en tres grupos:

1. Efecto de magnetización: Es el efecto primario responsable de la orientación de moléculas y de átomos dipolares
2. Efecto piezoeléctrico: Es el efecto secundario responsable de otras acciones
3. Efecto metabólico: Responsable de los efectos de trofismo y reparación tisular

1. **El efecto de magnetización**, comprende las siguientes acciones:

a.- En la modificación de la permeabilidad de la membrana celular se ha comprobado que los CM son capaces de modificar la distribución de los iones a ambos lados de la misma. [16]

b.- Estabilización de la bomba Na – K.

La función de la bomba sodio potasio es impedir el edema intracelular, el cual aparecería en el caso de que no existiera el suficiente aporte energético para su mantenimiento. Los CMs apoyan la acción de la ATPasa y de la de Na – K. oxidasa, consiguiendo así un mejor funcionamiento y estabilización de la bomba. [16]

c.- *Estimulación de la reproducción celular.*

Los genes controlan la función de las células y su reproducción. El gen que es ácido nucleico denominado DNA, controla la formación de diferentes proteínas. Para la síntesis tiene importancia tres tipos de RNA: RNA mensajero, RNA de transferencia y el RNA ribosómico. La mayoría de los trabajos revisados hablan a favor de un incremento de la síntesis del DNA, ATP y del AMPc, favoreciendo de esta manera la reproducción o multiplicación celular, la síntesis proteica y la modulación de prostanglandina (efecto antiinflamatorio). [16]

2. **Efecto piezoeléctrico** es por definición, la propiedad de ciertos cuerpos de sufrir algunas deformaciones mecánicas por:



- Efecto directo (polarización eléctrica de la masa de un cuerpo o creación de cargas eléctricas en su superficie cuando se le somete a fuerzas mecánicas).
- Efecto inverso (deformación de un cuerpo cuando se le somete a un campo eléctrico).

El efecto piezoeléctrico es propio de las estructuras como el colágeno, sobre todo a nivel óseo, y es debido a la relación directa entre vibraciones y oscilaciones eléctricas y elásticas. [23]

Investigaciones señalan que el Campo Magnético facilitaría la orientación arquitectónica de las trabéculas óseas en zonas dañadas, ello se traduce en la formación de callo óseo mejor organizado y de mejor calidad. Otras de las estructuras con carácter piezoeléctrico es la fibrina; se ha comprobado que cuando la fibrina polimeriza en un Campo Magnético intenso se observa un gel altamente orientado. Sin embargo el fibrinógeno en solución se orienta débilmente en un Campo Magnético intenso. Igualmente debido a las propiedades anisotrópicas de las células en hoz, se ha observado su orientación en Campo Magnéticos homogéneos. [23]

### 3. *Efecto metabólico*

Es el responsable de todos los procesos tróficos, estimulantes y de reparación tisular. El efecto trófico de los Campos Magnéticos ha sido estudiado sobre todo a raíz de su aplicación en fracturas óseas y pseudoartrosis. El hueso se compone de una matriz orgánica resistente, reforzada por depósitos de sales de calcio. La matriz orgánica del hueso se compone aproximadamente de un 95% de fibras colágenas y un 5% de sustancia fundamental formada por líquido extracelular, sulfato de condroitina y ácido hialurónico. El sistema circulatorio provisto de un sistema complejo para controlar el riego sanguíneo de diversas partes del cuerpo, en general estos controles es de tres tipos: [8]

- Control local del riego sanguíneo de cada tejido.
- Control nervioso del riego sanguíneo.



•Control humoral por el cual diversas sustancias hormonales por vía hemática producen un aumento o una disminución local del riego sanguíneo o cambios generalizados del mismo.

El CM por acción refleja directa sobre el sistema nervioso central, regulan funciones endocrinas, activan el sistema inmunitario y normalizan el sueño. Estudios experimentales han demostrado que con frecuencias bajas se produce relajación y condolencia con disminución de la movilidad mientras que con frecuencias muy elevadas producen intranquilidad y agitación. [8]

Resumen de la acción del campo magnético:

A escala celular:

- Activa la repolarización y la permeabilidad.
- Mayor rapidez de la mitosis.
- Aumenta el DNA.
- Activación del metabolismo de los iones y de la oxigenación.
- escala tisular:
  - Desarrollo de la circulación colateral.
  - Reabsorción de edemas.
  - Aumento de la actividad fagocitaria de los leucocitos.
  - Favorece la formación de estructuras conectivas fibrosas.
  - Aumenta la actividad osteoblástica, sobre el metabolismo del calcio en los huesos y sobre el colágeno.
  - Aumento de la presión parcial de oxígeno en los tejidos.
  - Efecto sobre la actividad muscular.
- Consecuencias clínicas:
  - Efecto analgésico.
  - Efecto antiinflamatorio.
  - Efecto antiedematoso.
  - Efecto bioestimulador.



## OBJETIVOS

---

### ***Objetivo general***

Disminuir y/o evitar la evolución de la epilepsia, mediante la aplicación de terapia de campo magnético de baja frecuencia (CMBF) caracterizando el comportamiento de las series de tiempo a través de la dinámica no lineal, optimizando la calidad de vida del paciente.

### ***Objetivos Particulares***

- ❖ Evaluar la evolución de la terapia de CMBF mediante el comportamiento de datos obtenidos mediante equipo de electroencefalografía.
- ❖ Caracterizar el efecto terapéutico del CMBF mediante los parámetros cualitativos y cuantitativos de la dinámica no lineal en pacientes con epilepsia.
- ❖ Demostrar que la terapia de CMBF es eficaz en el tratamiento de pacientes con enfermedades neurodegenerativas.
- ❖ Proponer la eficacia al sector salud de la terapia de CMBF en pacientes con epilepsia mediante el diagrama espacio fase (atractor) característico antes y después de la terapia y exhortar la terapia como alternativa complementaria en el tratamiento de dicha enfermedad.





## METODOLOGIA

---

El siguiente estudio se realizó la comparación 6 Pacientes con problemas neurodegenerativos (epilepsia), los cuales 3 de ellos presentaban crisis de parciales y los 3 restantes crisis generalizadas, de acuerdo al diagnóstico médico; Así mismo se tomó un individuo que se utilizó como Blanco, para determinar el efecto del Campo Magnético de Baja Frecuencia.

A los pacientes se les realizó un historial clínico con la finalidad de evaluar su estado actual para determinar el tiempo y las sesiones que se debe de aplicar la terapia de CMBF.

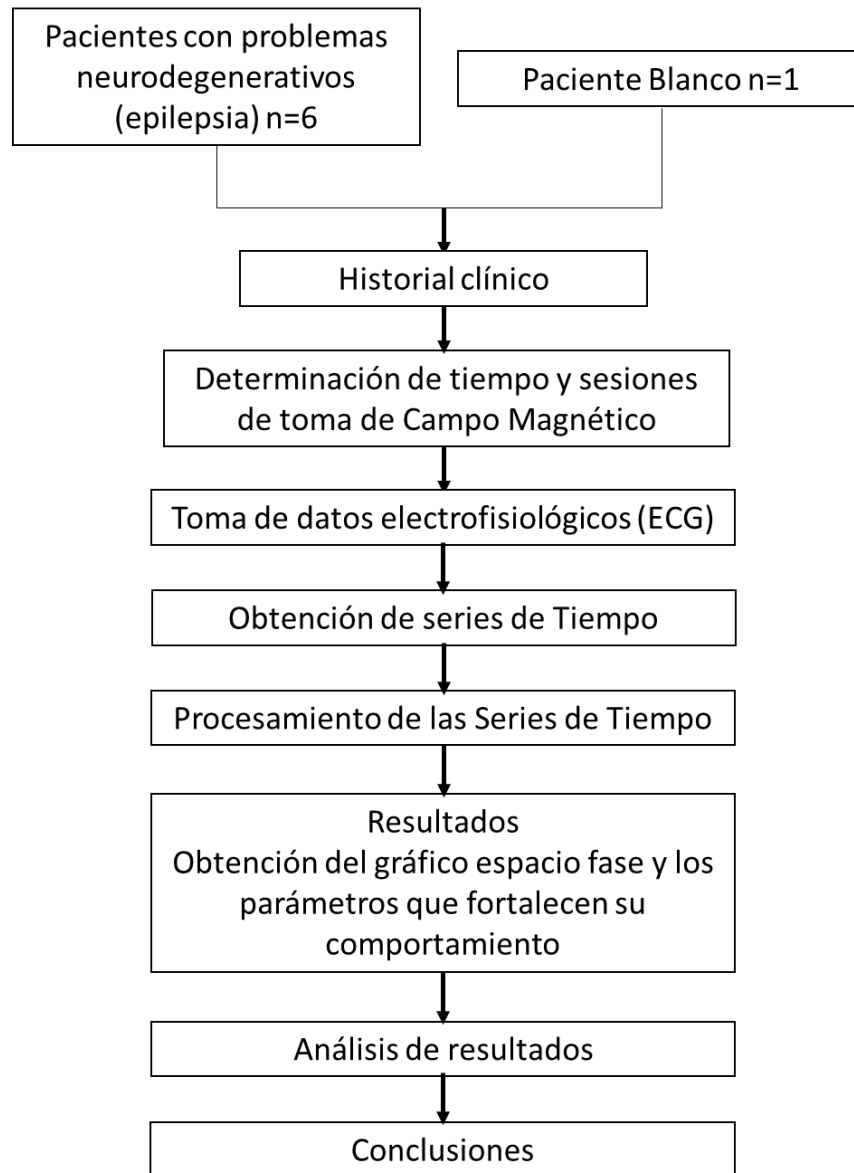
Se toma un EEG para la obtención de datos experimentales antes de la aplicación de la terapia de campo magnético, con el fin de monitorizar el avance de la enfermedad.

Se realiza el tratamiento de datos experimentales (series de tiempo) obtenidos del EEG, aplicando las técnicas de la Dinámica No lineal, como son exponente de Lyapunov, Exponente de Hurst, Diagrama Espacio Fase y Probabilidad de distribución que fortalecen el comportamiento del atractor obtenido.

Después de 3 meses de administrar las sesiones y el tiempo de CMBF, al paciente, se le realiza nuevamente un EEG para la obtención de una nueva serie de datos experimentales (series de tiempo) con el fin de verificar la disminución de la patología en el paciente, mediante las técnicas de la Dinámica No lineal.



## DIAGRAMA DE FLUJO





## RESULTADOS

### RESULTADOS DE ELECTROENCEFALOGRAMA

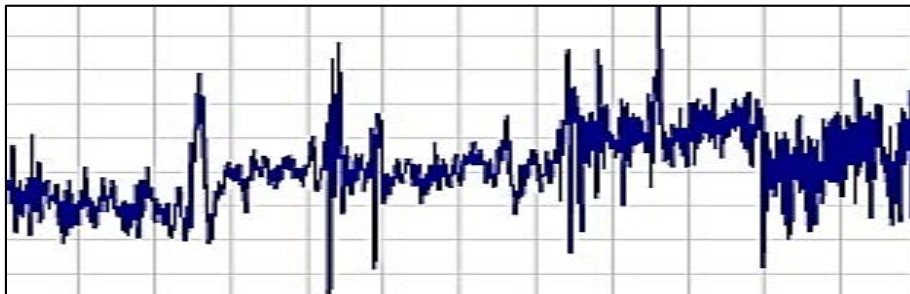


Fig. 29 EEG obtenido de paciente sin daño aparente.

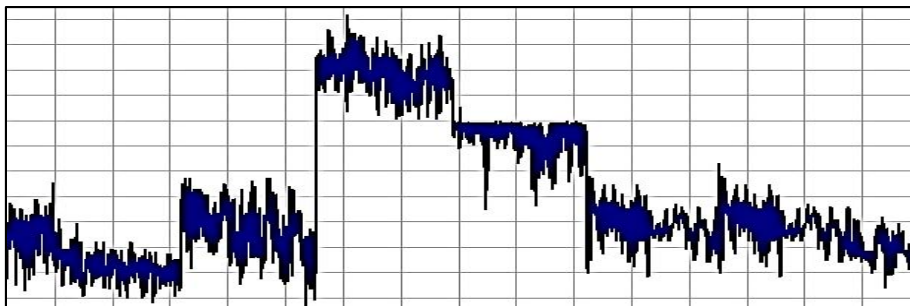


Fig. 30 EEG obtenido de paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.

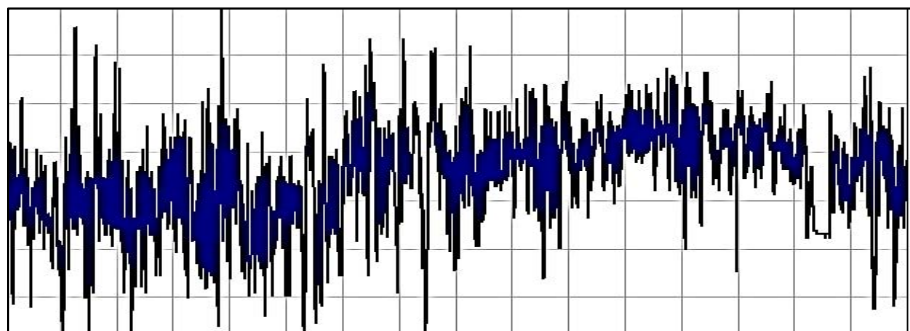


Fig. 31 EEG obtenido de paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF



## **RESULTADOS DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.**

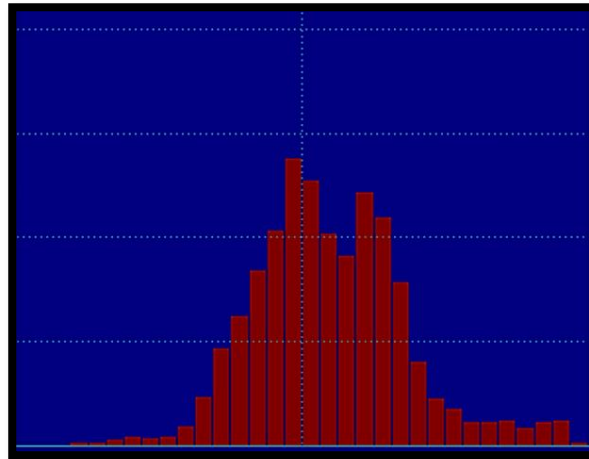


Fig. 32 Grafica de probabilidad de distribución, Campana de forma Leptocúrtica en Paciente Blanco

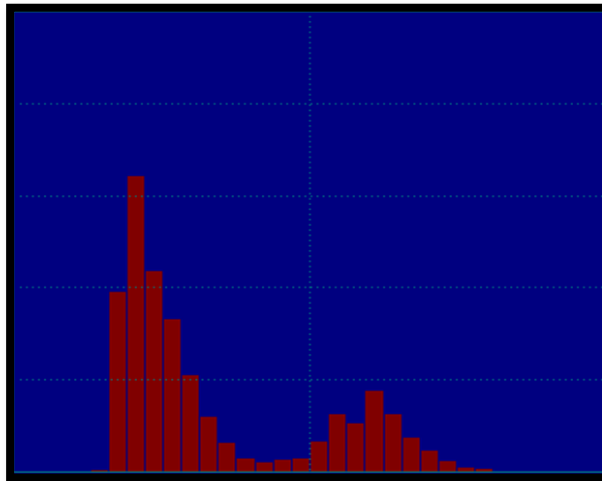


Fig. 33 Grafica de probabilidad de distribución, de forma Platicúrtica de Paciente con Daño epiléptico antes de la terapia de CMBF

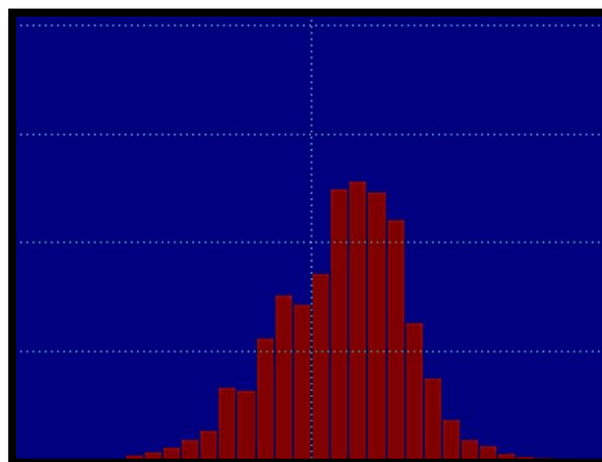


Fig.34 Grafica de probabilidad de distribución de forma Leptocúrtica en Paciente con Daño epiléptico después de la terapia de CMBF



**RESULTADOS CUANTITATIVOS DE LOS PARÁMETROS DEL ANÁLISIS**  
**VISUAL DE RECURRENCIA (VRA)**

<b>KURTOSIS</b>		
<b>0.7172</b>	<b>-0.5127</b>	<b>0.456</b>
Paciente Blanco	<i>Paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF</i>	<i>Paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF</i>

Tabla. 2 Comparación de valores experimentales de Curtosis en paciente sin daño epiléptico vs paciente con daño epiléptico antes y después de la terapia CMBF.

<b>ASIMETRIA</b>		
<b>0.487</b>	<b>-1.0172</b>	<b>-0.3568</b>
Paciente Blanco	<i>Paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF</i>	<i>Paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF</i>

Tabla. 3 Comparación de valores experimentales de Asimetría en paciente sin daño epiléptico vs paciente con daño epiléptico antes y después de la terapia CMBF.



## **RESULTADOS DE ATRACTORES EXTRAÑOS**

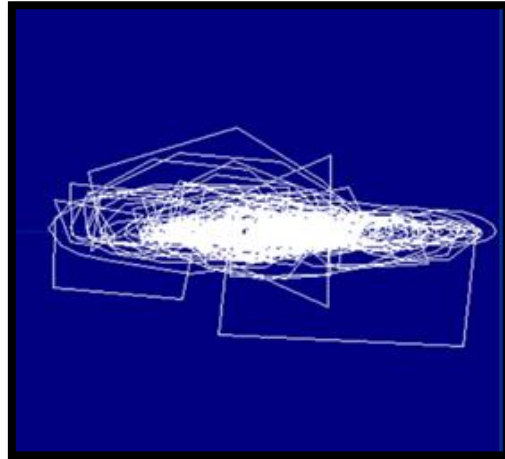


Fig. 35 Atractor extraño característico de personas blanco sin epilepsia o blanco; Obsérvese que existe un porcentaje pequeño en su linealidad y un alto porcentaje en su caoticidad.

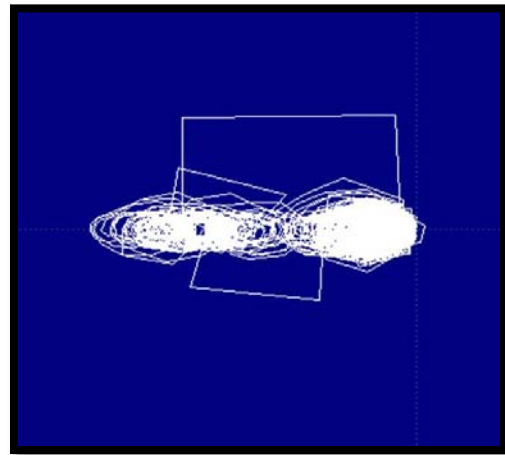


Fig. 36 Gráfica de atractor extraño de paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF. Se visualiza un alto porcentaje de linealidad, ya que existe una formación excesiva de líneas que forman figuras geométricas

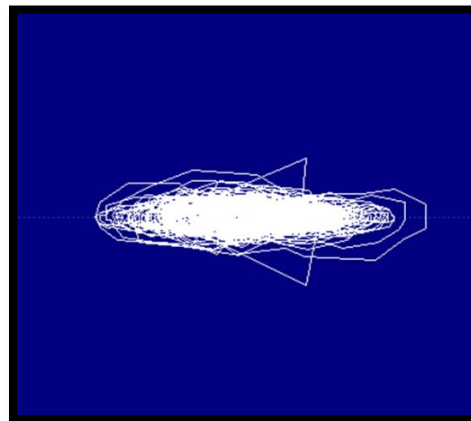


Fig. 37 Atractor extraño de paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF. Exhibe mayor comportamiento caótico; reflejando una mejoría en el tipo de convulsión y menos frecuente.



## RESULTADOS CUANTITATIVOS OBTENIDOS DE LOS PARÁMETROS DE LA DINÁMICA NO LINEAL

<b>EXPONENTE DE HURST</b>		
<b>0.4444192</b>	<b>0.3299677</b>	<b>0.4072916</b>
Paciente sin daño aparente	<i>Paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.</i>	Paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF

Tabla. 4 Comparación de valores del Exponente de Hurts en paciente sin daño epiléptico vs paciente con daño epiléptico antes y después de la terapia CMBF. Se observa que los datos que se aproximan a 0.5 tienden a ser más caóticos a diferencia de aquellos que se aproximan a cero son más lineales.

<b>EXPONENTE DE LYAPUNOV</b>		
<b>0.350 +-0.023</b>	<b>0.501+-0.021</b>	<b>0.495 +- 0.019</b>
Paciente blanco	<i>Paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.</i>	Paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF

Tabla. 5 Comparación de valores experimentales de Exponente Lyapunov en paciente blanco epiléptico vs paciente con daño epiléptico antes y después de la terapia CMLF. Los valores que tienden a ser menores que 0.5 tienden a ser más caóticos.

<b>DIMENSIÓN DE CORRELACIÓN</b>		
<b>2.775 +- 0.335</b>	<b>3.525 +- 0.320</b>	<b>3.019 +- 0.199</b>
Paciente blanco	<i>Paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF.</i>	Paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF

Tabla. 6 Comparación de valores obtenidos de Dimensión Correlación en paciente blanco vs paciente con daño epiléptico ante y después de la terapia de CMLF. Obsérvese que los valores que tienden a dos determinan una mayor caoticidad.

<b>DIMENSIÓN DE CAPACIDAD</b>		
<b>1.489+- 0.125</b>	<b>1.792 +- 0.140</b>	<b>1.595 +- 0.117</b>
Paciente blanco	<i>Paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF</i>	<i>Paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF</i>

Tabla 7 Comparación de valores de Dimensión de Capacidad de Paciente Blanco vs Paciente con daño epiléptico. Se percibe que los valores cercanos a la unidad indican una tendencia caótica.



**RESULTADOS FALSOS VECINOS CERCANOS**

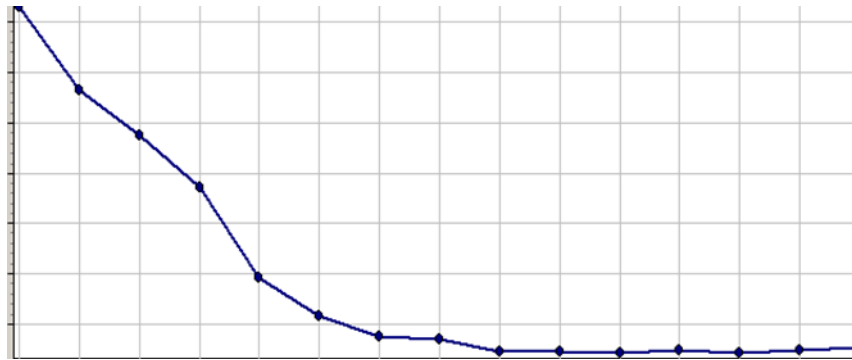


Fig. 38 Falsos Vecinos Cercanos individuo blanco, obsérvese que no existe una uniformidad entre datos, existiendo una alta caoticidad y una menor linealidad.



Fig. 39 Falsos Vecinos Cercanos paciente con epilepsia, se observa que hay una linealidad entre datos, existiendo una caoticidad baja con alta linealidad.

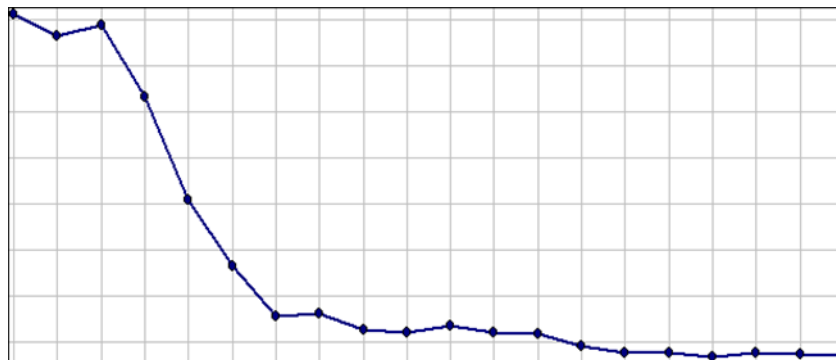


Fig. 40 Falsos Vecinos Cercanos paciente con epilepsia después de tomar la terapia de CMBF, la curva tiende a comportarse de forma lineal y caótica, indicando mejoría en el paciente.





**RESULTADO CUALITATIVOS DE LOS PARAMETROS DE ANALISIS**  
**VISUALDE RECURRENCIA (VRA)**

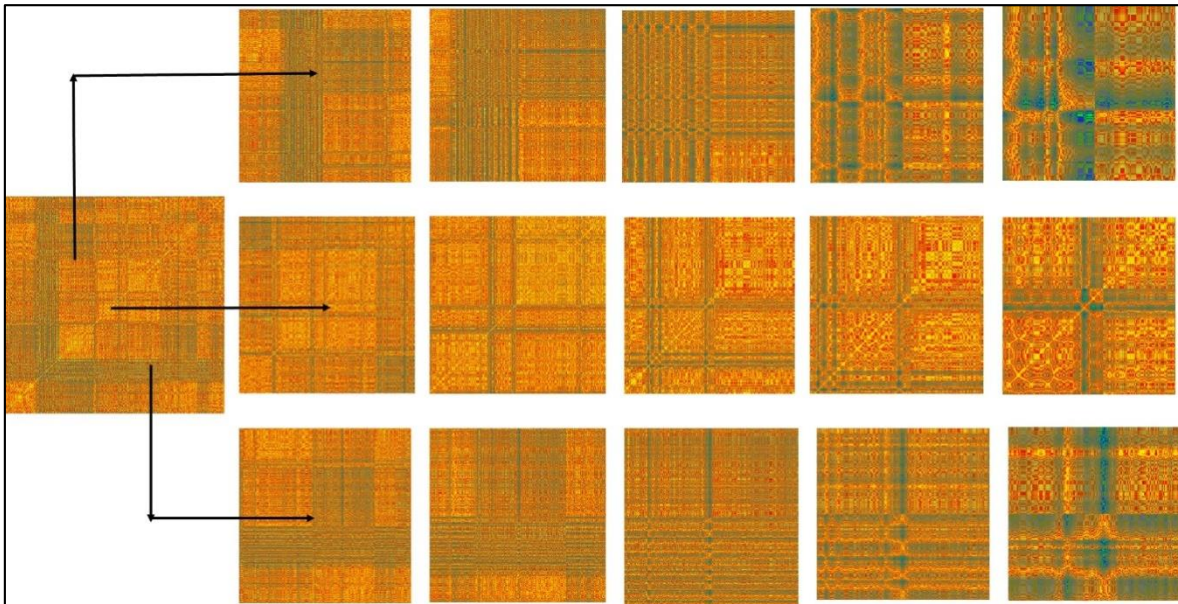


Fig.41 Trama de recurrencia visual inicial del Individuo blanco se percibe diversas formas y colores indicando con ello la presencia de un alto grado de caoticidad. Al realizar el acercamiento en tres diversos puntos se reafirma lo antes mencionado.

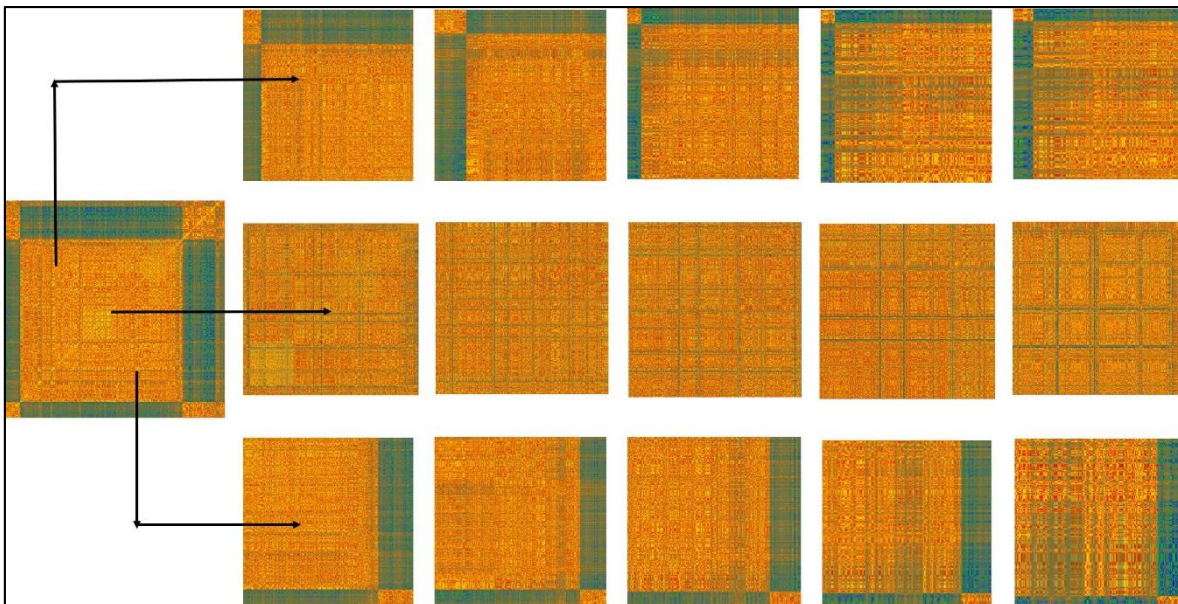


Fig.42 Trama inicial del Paciente con epilepsia muestra una uniformidad, al realizar diversos acercamientos en diversos puntos del trama de recurrencia, se observa que la uniformidad no cambia tanto en las formas como en los colores, existiendo una alta linealidad.

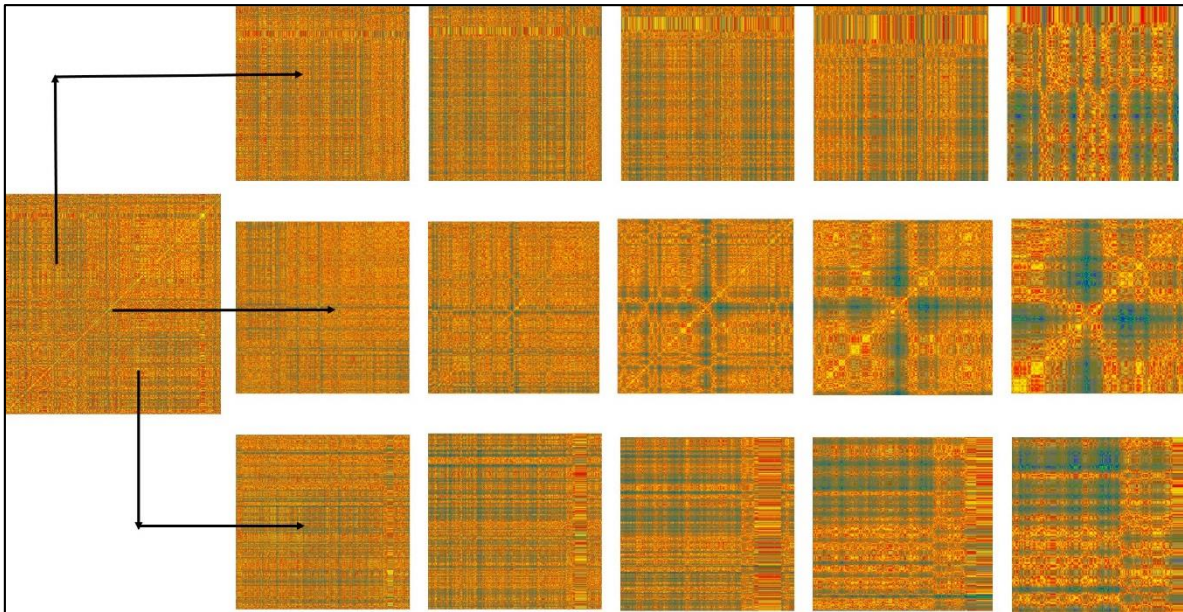


Fig.43 Trama de recurrencia visual del Paciente después de recibir la terapia de CMBF se distingue claramente diversas formas y colores que determinan la presencia de una baja linealidad y aumentando su caoticidad revelando con ello una mejora en el paciente.



**RESULTADOS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-FASE (ATRACTOREXTRAÑO)**

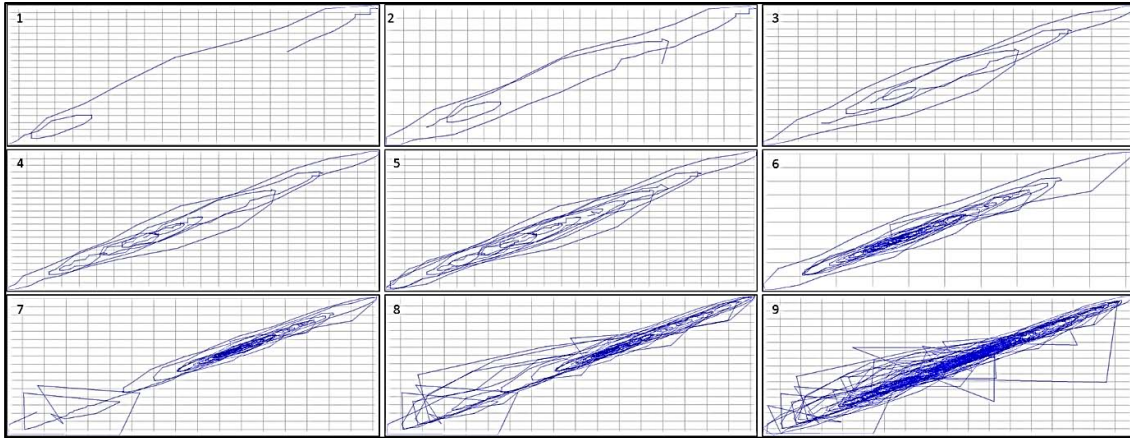


Fig. 44 Evolución de atractor extraño de paciente blanco, inicialmente la trayectoria no es lineal, conforme sigue la progresión se percibe finalmente una evolución de tipo caótica

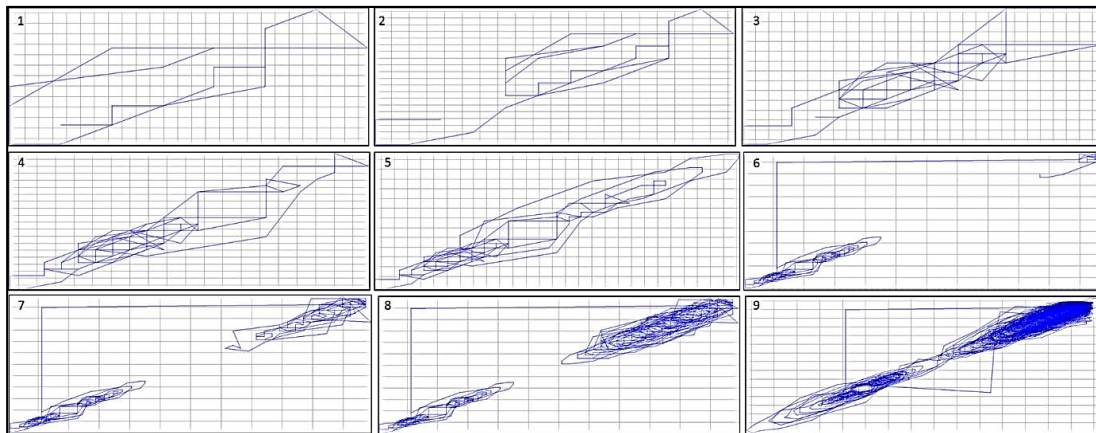


Fig. 45 Evolución de atractor extraño de paciente con daño epiléptico antes de la terapia de CMBF. Se percibe en un principio hasta el final, la trayectoria forma figuras geométricas que indican un alto porcentaje de linealidad

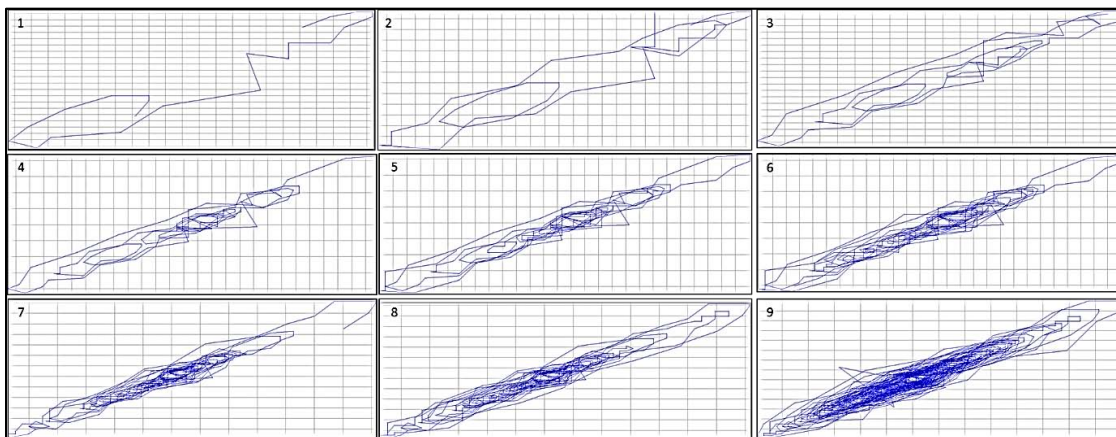


Fig. 46 Evolución de atractor extraño de paciente con daño epiléptico después de la terapia de CMBF. Se observa al inicio de la evolución una trayectoria de tipo caótica y lineal. Al final de la evolución sigue esta tendencia revelando un alto porcentaje de caoticidad y un bajo porcentaje de linealidad.



## RESULTADOS DE FRECUENCIA DOMINANTE

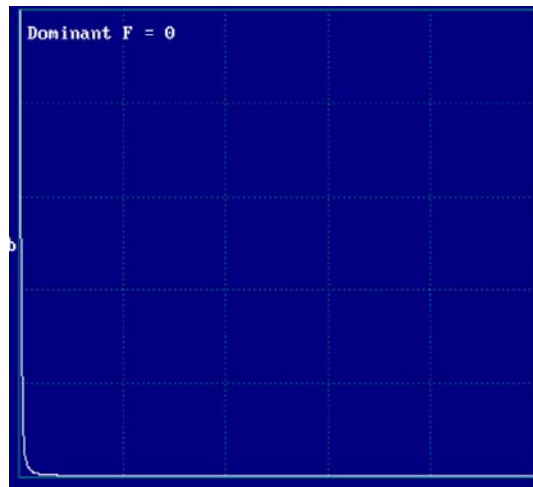


Fig. 47 Paciente con epilepsia se observa una curva ligeramente pronunciada indicando una alta linealidad y baja caoticidad

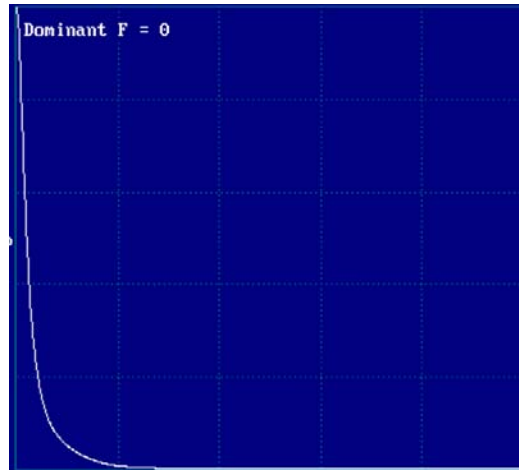


Fig. 48 Paciente después de tomar CMBF, la curva obtenida presenta una cuasiperiodicidad y aleatoriedad media

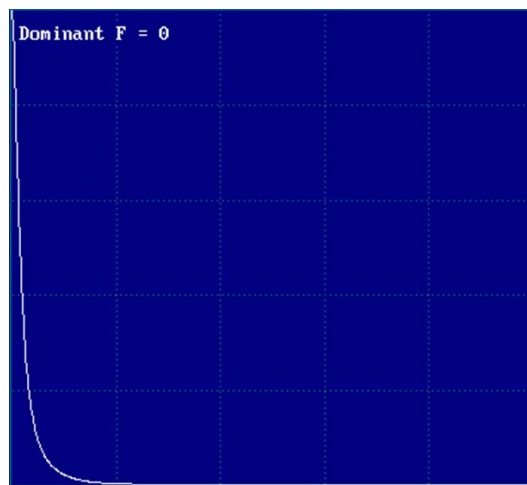


Fig. 49 La curva presenta alta periodicidad y baja linealidad presente en individuos blanco.



## **RESULTADOS DE ESPECTRO DE POTENCIA**

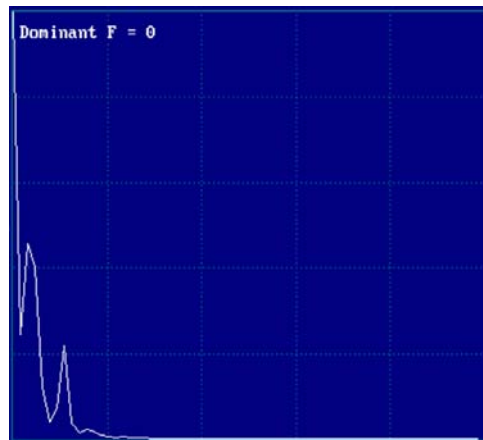


Fig. 50 Individuo Blanco presenta una señal con picos de banda ancha característicos de una alta caoticidad y baja linealidad.

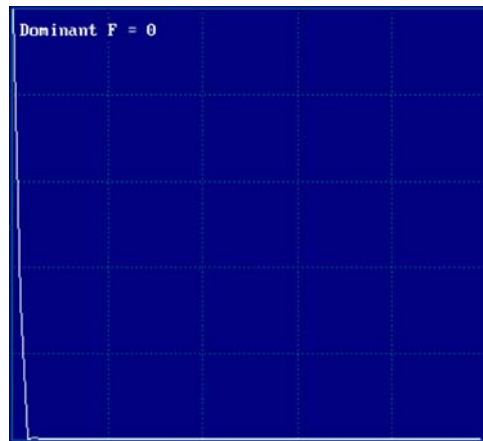


Fig. 51 Paciente con epilepsia se visualiza una señal lineal que indica una linealidad.

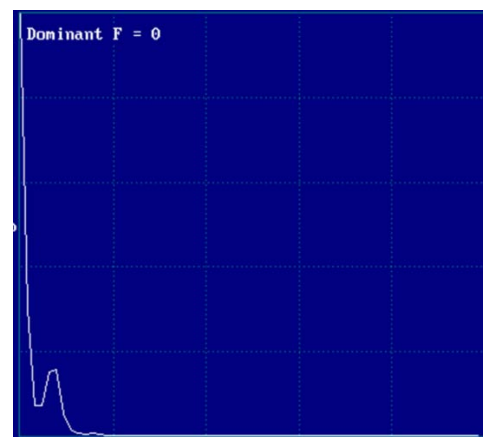


Fig. 52 Paciente después de tomar terapia de campo magnético, se observa una señal con pico y de banda ancha indicando que existe una respuesta de tipo caótica, aunque sigue existiendo un alto porcentaje de linealidad.



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

*El análisis se efectuó mediante la comparación del paciente blanco con el paciente enfermo más representativo, debido a que los valores que se obtuvieron de los 6 pacientes de estudio enfermos restantes que se trataron son similares al ya mencionado, es por ello, que se agregara en un anexo al final de este trabajo las comparaciones restantes con el blanco.*

Como se había ya mencionado la epilepsia es una de las enfermedades neurológicas más comunes a nivel mundial, siendo esta mayor en países en desarrollo como lo es nuestro país, debido al poco acceso a centros de salud, enfermedades infecciosas, problemas sociales y a la poca accesibilidad a fármacos antiepilépticos.

Es por esto que al ser una enfermedad con prevalencia en nuestro país de entre 10 a 20 millones de personas, se debe recurrir a otros medios para curar o disminuir las crisis epilépticas, por ende en el área de investigación del Laboratorio de Dinámica No Lineal, presenta una alternativa mediante la terapia de Campo Magnético de Baja Frecuencia que ayuda al paciente a evitar un progreso de la enfermedad o/a disminuirlas crisis en un alto porcentaje, mejorando con esto la calidad de vida del paciente, esto se determina mediante la información que generan las pruebas cualitativas y cuantitativas de la dinámica no lineal que se encuentra dentro de la ciencia llamada teoría del caos, así mismo observando la evolución física en la salud del paciente.

En las gráficas obtenidas de los estudios de electroencefalogramas aplicados del paciente sano y al paciente enfermo antes y después de la terapia de campo magnético de baja frecuencia, se visualiza una la evolución del paciente ante esta patología. Debido a que al observar los electroencefalograma del paciente sin daño aparente muestra ondas de tipo  $\alpha$  que se encuentran entre los 8 y 13 Hz. Sin ninguna actividad y con los ojos cerrados, con respecto al paciente con epilepsia y convulsiones de 30 veces al día de 3 a 4 min y sin la administración de terapia de campo magnético de baja frecuencia, el estudio con los mismos parámetros proporciona ondas de tipo  $\delta$  que poseen frecuencias inferiores a 3,5 Hz, estas solo se presentan en enfermedades orgánicas cerebrales graves. Después de



administrar la terapia de campo magnético de baja frecuencia 3 veces a la semana con una duración de 45 min por sesión durante un periodo de 3 meses al mismo sujeto se puede observar un cambio en las ondas del electroencefalograma pasando de ondas  $\delta$  a ondas  $\beta$  que poseen frecuencias entre 14 y 30 Hz, aunque pueden llegar hasta los 50 Hz que aparecen cuando se activa intensamente el SNC indicando una respuesta favorable en la salud del paciente pasando de 30 convulsiones al día a solamente 9 convulsiones con frecuencia de solamente 30 segundos. Esto debido a que la terapia de campo magnético nos lleva a dar series de tiempo que determinan el comportamiento caótico o lineal en las ondas que registra el EEG.

Otra de las técnicas de comparación que nos indican un avance de esta enfermedad, es la distribución de probabilidad que es una de las pruebas cualitativa, que mediante su forma (campana de Gauss), indican el progreso en la convalecencia de la patología estudiada. Cuando se quiere realizar la comparación entre distribuciones en sus medidas de posición y dispersión, no tenemos datos analíticos para ver si son distintas. Una forma de compararlas es mediante su forma y aun así no bastará con esto, es por ello, que una tarea fundamental en muchos análisis estadísticos es caracterizar la ubicación y la variabilidad de un conjunto de datos. Esto se determina mediante la caracterización adicional de asimetría y la curtosis que son pruebas cuantitativas que nos ayudan a determinar el tipo de campana que se observa.

El análisis de la distribución de probabilidad se puede indicar que en los sistemas biológicos no existe una distribución normal debido a que ningún individuo es 100% sano, es por ello en que en este tipo de sistemas aparentemente sanos existe una linealidad en un bajo porcentaje y una caoticidad en un alto porcentaje. Aclarado este punto se observa en la gráfica de probabilidad de distribución del paciente sin daño aparente, un valor de curtosis = 0.7172 y un valor de asimetría = 0.487 revelando que los datos en la campana de Gauss es de forma Leptocúrtica es decir tiene un pico más alto de la distribución normal y tiene colas más ligeras.

Al comparar el gráfico de probabilidad de distribución del paciente con epilepsia antes y después de tomar la terapia de campo magnético de baja frecuencia se



observa que antes de tomar la terapia el paciente arroja los siguientes resultados una curtosis=  $-0.5127$  y una asimetría=  $-0.0172$  que exhibe una campana de Gauss es Platicúrtica es decir tiene un pico más bajo que una distribución normal y colas más pesadas. Al recibir la terapia de campo magnético el paciente obtiene campana de Gauss con asimetría =  $-0.3568$  y una curtosis =  $0.456$  mostrando una campana de Gauss Platicúrtica manifestando, indicando que los valores se reúnen en la parte derecha de la media.

Como se puede observar el paciente con daño epiléptico muestra una mejora al tomar la terapia de campo pasando a tener una Curtosis =  $-0.5127$  Platicúrtica, a una Curtosis =  $0.456$  Leptocúrtica, parecida al paciente blanco que tiene un valor de Curtosis=  $0.7172$  y de Curtosis Leptocúrtica registrando una diferencia de Curtosis de  $0.2612$ . Al realizar la comparación de los valores de asimetría, el paciente antes de tomar la terapia de campo magnético tiene una asimetría negativa=  $-1.0172$ , al tomar la terapia de campo magnético la asimetría tiende a incrementar su valor registrando una asimetría de  $-0.3568$ , percibiéndose una considerable diferencia y en comparación con el paciente blanco indica una mejoría; que se manifiesta en el comportamiento físico.

En un sistema dinámico, los sistemas presentan dependencia sensible con respecto a las condiciones iniciales observándose a través del diagrama espacio fase o atractor extraño que exhiben el comportamiento de los sistemas dinámicos biológicos complejos de aquí su importancia de observar su evolución a través del tiempo y es por ello que uno de los parámetros cualitativos importantes.

Una manera de predecir si un sistema biológico es sano es visualizar el movimiento caótico, mediante un diagrama de fases del movimiento. Cuando un sistema biológico se encuentra dañado, en la forma del atractor se visualiza un comportamiento lineal (cuadros, triángulos y líneas rectas), al contrario cuando un sistema biológico se encuentra sin aparente daño se observa un atractor extraño de comportamiento híbrido (figura aparentemente sin forma).

Al realizar la comparación del gráfico del atractor extraño antes y después de recibir la terapia de campo magnético en el paciente, se observa que antes de recibir la terapia el atractor tiene una evolución periódica con líneas rectas formando figuras





geométricas como lo muestra en el cuadro 1, posteriormente sigue un mismo comportamiento hasta el cuadro 5, al seguir la evolución en el cuadro 6 se observa la formación de una extensión parecida al atractor inicial formando al igual figuras geométricas, en el cuadro 7 y 8, el atractor extraño adquiere una forma lineal en un porcentaje mayor pero si bien se observa un menor porcentaje caoticidad, en el cuadro final se observa la unión del atractor y una alta linealidad demostrando que hay daño en el sistema biológico del paciente. Al realizar la comparación con la gráfica del paciente después de tomar la terapia de campo magnético se manifiesta que en el cuadro 1 la evolución del atractor extraño en la línea que da forma a este no forma figuras geométricas, al ir evolucionando y siguiendo la secuencia como se muestra en las gráficas 2,3,4,5,6,7,8, la formación de figuras geométricas es escasa indicando una menor linealidad y un mayor comportamiento caótico, en cuadro 9 que es el final de la evolución del atractor extraño, su estructura indica una mejoría del paciente. Esto se visualiza observando y comparando los resultados de la evolución con los resultados del sujeto blanco (sin daño epiléptico) que muestra una similitud en su evolución, como se puede observar en el atractor extraño, no se visualizan formas geométricas, sino hasta la gráfica 7 que hay formación de estas. Indicando la baja linealidad y la alta caoticidad presente en la evolución, debido a que no hay sistemas biológicos completamente caóticos e individuos aparentemente sanos.

Una de las técnicas que permiten analizar el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo y verificar que tanta auto correlación existe entre las series de tiempo es el parámetro cuantitativo exponente de Hurst cuyo valor está directamente relacionado con la "dimensión fractal", que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico de un objeto natural, lo que da una medida de la rugosidad de una superficie.

En los parámetros del exponente de Hurst obtenidos, se observa que el paciente blanco al arrojar un valor de  $H= 0.4444192$  nos permite observar que existe una auto correlación que se caracteriza por tener una alta caoticidad debido a que al estar más pegado a 0.5 nos indica que tiene una señal más irregular. En comparación con el paciente con epilepsia que al arrojar un valor de  $H= 0.3299677$  indicando que la señal es regular o constante debido a que el valor obtenido tiende



más a acercarse a cero, esto muestra un comportamiento lineal; después de tomar la terapia de CMLF en paciente aumenta considerablemente el exponente obteniendo un valor de  $H= 0.4072916$  indicando una mejora en su conexión neuronal reflejándose no solamente en el EEG de la fig. 31 que indica una alta anti persistencia sino también en la disminución del número de convulsiones.

Como se había observado en la tabla de los valores del exponente de Hurst obtenidos indican que existe un proceso anti persistente o caótico en el paciente sin daño, al utilizar la fórmula para determinar la dimensión fractal se obtiene un valor de  $D=1.5555808$  indicando que las series de tiempo obtenidas son anti persistentes y por lo tanto una dimensión fractal de forma rugosa tomando un aspecto puntiagudo, irregular y caótico. Al realizar la comparación con el paciente con daño epiléptico la dimensión fractal obtenida  $D=1.67700333$  indicando un proceso persistente o lineal con series de tiempo persistente, y dimensión fractal con aspecto de suavidad y menos picos presentado así una superficie menos rugosa. Al tomar la terapia de campo magnético el paciente presenta una  $D= 1.5927$  indicando un aspecto más rugoso y más anti persistente en las series de tiempo obtenidos de su EEG por lo tanto una recuperación a nivel de neurotransmisores y a nivel neuronal, mostrando un proceso que pasa de una linealidad a una caoticidad, además de observar una mejora en el comportamiento fisiológico en el paciente disminuyendo el número de convulsiones y el tiempo de estas.

El parámetro cuantitativo exponente de Lyapunov que caracteriza a un sistema dinámico por medio de una tasa de separación de trayectorias infinitesimalmente cercanas. Esta separación puede ser diferente en las orientaciones del vector de separación inicial. Por lo tanto, existe un espectro del exponente de Lyapunov iguales en número a la dimensionalidad del espacio de fases exhibiendo un valor final pequeño y positivo.

El exponente de Lyapunov indica que los valores mayores a 0.5 tienden a ser más lineales y menos caóticos en los sistemas biológicos en presencia de una patología. Al realizar la comparación de los valores en los sistemas biológico aparentemente sanos, estos arrojan valores positivos menores a 0.5 indicando una mayor caoticidad



y menor linealidad, por ende el sistema biológico en estudio tiende a tener una mejor respuesta fisiológica cuando recibe la terapia de campo magnético.

Al realizar el análisis de los sistemas biológicos de estudio que se obtuvieron en las pruebas del exponente de Lyapunov en paciente antes y después de la terapia de campo magnético vs paciente blanco se observa que hubo una mejoría, en el paciente enfermo después de recibir la terapia de campo magnético presentando un nuevo valor de  $L=0.495$  observándose un cambio de estructura en el diagrama espacio fases atractor extraño con mayor comportamiento caótico semejante al paciente blanco. Debido a que en sistemas caóticos el valor de Lyapunov tiende a la unidad se comporta a la linealidad indicando una alteración en el organismo de estudio o sea un sistemas sin repuesta de comportamiento periódico, lo contrario de los sistemas caóticos que son los que se acercan a cero y tienden a tener una mejor respuesta en el entorno que rodea al paciente.

Los sistemas de comportamiento caótico evolucionan en atractores extraños, los cuales pueden ser caracterizados mediante parámetros que determinan que tan extraño puede ser su comportamiento. Uno de estos parámetros utilizado en la teoría del caos es la dimensión correlación que está estrechamente ligado al parámetro de falsos vecinos cercanos, incluso en algunos casos puede ser de mayor relevancia, ya que hace énfasis en las regiones del diagrama espacio fase más visitadas por las trayectorias, debido a que en un sistema de baja complejidad, exhibe una conducta regular o periódica, cuyo comportamiento de sus variables muestran una gran correlación entre un dato con los anteriores o los siguientes. Por el contrario, en un sistema totalmente aleatorio un dato, no tiene ninguna correlación con sus vecinos. Y en los sistemas dinámicos no lineales, también llamados sistemas complejos, la dimensión de correlación varía según su grado de complejidad.

Como ya se había mencionado los falsos vecinos cercanos se encuentran ligados a la dimensión correlación debido a que presentan una dimensionalidad en el espacio ocupado en la región del atractor extraño y la dimensión de este. Es por ello que si el valor de la dimensión correlación se encuentra cercanos a  $D_c=3$  indica una mayor caoticidad y por lo tanto los datos de falsos vecinos cercanos no deben



tener una uniformidad entre estos; por el contrario si la dimensión de correlación se encuentra por encima de  $D_c=3$  los falsos vecinos cercanos tienen una uniformidad entre sus valores entonces se visualiza una linealidad en el atractor extraño.

Por lo que al analizar los datos obtenidos de los objetos de estudio se puede observar que el individuo blanco arroja una dimensión de correlación  $D_c= 2.775$  y los valores de falsos vecinos cercanos totalmente aleatorios entre cada dato no existiendo una correlación entre estos que indica un atractor caótico con baja linealidad en comparación con el paciente con daño epiléptico que arroja  $D_c=3.525$  y datos de falsos vecinos cercanos uniformemente repartidos entre cada uno de los datos indicando con ello que existe una alta linealidad y muy baja caoticidad en el atractor obtenido, al recibir la terapia de campo magnético durante 3 meses con una frecuencia de 3 sesiones por semana con duración de 45 min c/una, se observa una disminución en el valor del paciente obteniendo  $D_c= 3.019$  y los valores de los datos de falsos vecinos cercanos se muestran más uniformes entre cada uno de ellos obteniendo un atractor con un porcentaje mayor de caoticidad y una disminución en su linealidad, indicando con ello una mejoría en su patología.

Otro de los parámetros que nos permite diferenciar si un sistema biológico es caótico o lineal, es la dimensión de capacidad que permite determinar si existe una saturación en la región del espacio fase (atractor), así como la geometría de la dimensión de este, y el tipo de oscilaciones que presentan como las periódicas, cuasiperiódicas o caóticas. A grandes rasgos la capacidad de dimensión es medir la ocupación del espacio (cuanto lo rellena) en donde se sitúa el atractor extraño; con esto a su vez se verifica que autosemejanza tiene este atractor, conocido como fractalidad.

Al analizar los valores que se obtuvieron de la dimensión de capacidad de cada uno de los sujetos de estudio se puede percibir que el individuo sano presenta una  $Dim= 1.489$  indicando una saturación en el diagrama de espacio fase con orbitas de tipo aleatorio y con ello oscilaciones de tipo caótico, al realizar la comparación con el paciente enfermo este arroja un valor de  $Dim= 1.792$  en donde su atractor presenta un comportamiento lineal, orbitas de tipo periódicas y una baja saturación en el diagrama espacio fase, después de aplicar la terapia de campo magnético, el



paciente muestra una mejora en el valor obtenido de  $Dim = 1.595$  indicando que sus oscilaciones del atractor cambian a ser de tipo cuasiperiódicas y con una menor saturación en el diagrama espacio fase.

El Método de Frecuencias Dominantes o Entropía Máxima, es una rutina similar a la potencia espectral, sin embargo en lugar de utilizar el método de la transformada rápida de Fourier, se utiliza el método de la Entropía Máxima.

El método de la entropía máxima, muestra una alta eficiencia en localizar la periodicidad en las frecuencias de la información que de otra manera pasarían simplemente como ruido en la información.

En este método de análisis solo se realiza la comparación de los modelos de la curvas obtenidos de los sujetos de estudio contra un modelo patrón obtenido en sujetos sanos de estudio debido a que esta es una técnica cualitativa y por lo tanto se hace referencia si existe una linealidad o caoticidad en la forma en que se define la curva; al comparar el aspecto de la curva obtenida en los sujetos de estudio, se determina que el sujeto blanco presenta una curva más pronunciada en la frecuencia dominante obtenida indicando con esto una caoticidad, por lo contrario en el paciente con epilepsia se muestra una curva con un bajo porcentaje de caoticidad y alto de linealidad, después de recibir la terapia de campo magnético la curva que se obtiene tiende a una mayor caoticidad y baja linealidad, indicando que existe una mejora en nuestro sistema biológico de estudio.

El espectro de potencia manifiesta la frecuencia de una serie de tiempo por lo que en este estudio se realiza mediante una comparación de las señales obtenidas de los individuos de estudio vs un individuo blanco, ya que este parámetro es de tipo cualitativo. Por lo tanto al observar las señales obtenidas de nuestro individuo blanco arroja una señal gradualmente con picos de banda ancha indicando un comportamiento periódico y con baja linealidad en comparación con el paciente con epilepsia que emite una señal totalmente lineal debido a que solo se visualiza una sola banda ancha en la escala, esto se debe a que el sistema biológico en una crisis convulsiva sufre una desconexión neuronal y por ende no emite señal alguna al recibir la terapia de campo magnético el paciente sufre una desconexión encontrándose más consciente, esto se observa debido a la forma de la señal que



arroja indicando que existe una señal cuasi periódica de comportamiento de baja linealidad, comprobando esto no solo estadístico sino en el comportamiento físico del paciente.

El gráfico de recurrencia es adecuado para todo tipo de series de tiempo, la única condición es que los datos estén igualmente espaciados. Se pueden trabajar series de tiempo estacionarias y no estacionarias, lineales y no lineales estas pueden ser analizadas con el gráfico de recurrencia.

Las características básicas del gráfico de recurrencia es que permiten distinguir entre variabilidad aleatoria y caótica, así como también para construir gráficos de recurrencia y cuantificar sus parámetros más relevantes.

En este análisis el aspecto del trama de recurrencia visual es importante, ya que indica visualmente el comportamiento del sistema (serie de datos), esto lo hace a través de las distancia entre puntos o, a través de líneas largas o cortas, que se pueden apreciar visualmente; Los sistemas caóticos, se crean cambios en la distribución de los puntos en el trama de recurrencia, lo cual se refleja a través de las áreas que se observan más claras dentro del trama de recurrencia

Al realizar el análisis de los sujetos de estudio se observa que el individuo blanco muestra en el trama de recurrencia líneas verticales y horizontales cortas, así como puntos de color oscuro en algunas zonas del trama que se aprecian como líneas largas de mayor longitud y de diversos grosores, se pueden perciben también zonas de color clara que indica distancias cortas en diversos porcentajes demostrando que existe una mayor caoticidad y una baja proporción de linealidad existiendo en el trama de recurrencia con un baja proporción de fractalidad, esto se observa en el zoom realizado en tres diversos puntos del trama inicial, al realizar la comparación con el trama de recurrencia del paciente con epilepsia, se observa un trama inicial, con líneas verticales y horizontales más largas, así como un mayor porcentaje de zonas más oscuras que simulas líneas más gruesas e idénticas, al realizarle un zoom en tres diversos puntos al trama de recurrencia inicial en el cual se observa que al final de cada evolución se sigue manteniendo una fractalidad debido a que se siguen observando líneas largas paralelas que indican zonas más oscuras y claras revelando una homogeneidad y por ende una mayor linealidad con baja



caoticidad, al recibir la terapia de campo magnético el paciente muestra un cambio en su trama de recurrencia visual observándose la existencia de líneas horizontales y verticales cortas y largas, al igual que zonas de bajo porcentaje oscuras y en mayor porcentaje claras, al realizar el zoom al trama inicial en tres zonas se observan zonas oscura que simulan líneas horizontales y verticales paralelas cortas de diversos grosores, así como zonas claras en un menor porcentaje indicando una disminución en su fractalidad y que conlleva a un mayor porcentaje de caoticidad y baja linealidad.



## CONCLUSIONES

---

La aplicación de la terapia con campo magnético de baja frecuencia (CMBF), es una alternativa terapéutica que genera estímulos en la membrana celular ayudando a recuperar los mecanismos iónicos, regenerando el funcionamiento a nivel neuronal, evitando el progreso de crisis epilépticas mejorando con ello la calidad de vida del individuo.

La obtención de las series de tiempo procesadas, permite evaluar la evolución neuronal del paciente con problemas neurodegenerativos.

La caracterización de la epilepsia mediante el diagrama espacio fase y los parámetros de la Dinámica No Lineal es una alternativa eficaz que determina el grado de daño que existe en el paciente antes y después de tomar la terapia de CMLF.

La rapidez en la recuperación del paciente depende del daño que presente y la periodicidad en la acuda a las sesiones de terapia CMLF

La utilización de los campos magnéticos permite una doble visión, primero; como herramienta auxiliar de las técnicas terapéuticas convencionales, es sorprendente que en nuestro país sea tan poco habitual el tratamiento con campo magnético de baja frecuencia en muchas de las instituciones asistenciales, siendo que este tipo de terapias están documentadas en la literatura clínica. Debe quedar claro que los tratamientos con campos magnéticos de baja frecuencia no excluyen la utilización de farmacoterapia o de técnicas convencionales de electroterapia o terapia física; por el contrario, las pueden mejorar y complementar. Segundo como una posibilidad para comprender el conocimiento de las funciones biológicas, proponiendo una alternativa en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas, resultando con esto un vector en el avance de importantes y actuales investigaciones.





## PROYECCIONES

---

La aplicación de la terapia de CMLF no solo se puede realizar en pacientes con problemas neurodegenerativos, sino también se han realizado estudios en pacientes con diversas patologías como pie diabético, migraña, artritis reumatoide, diabetes, estrés, tendinitis de Quervain, inflamación muscular, fatiga, osteoporosis; por lo que al tener resultados positivos se ha sugerido al sector salud la utilización del equipo como terapia alternativa que ayude a una recuperación más pronta del paciente; recomendando un vínculo directo con la medicina alelopática, fisioterapia y medicina alternativa.

Tomando en cuenta que ser humano está constituido por cargas a nivel celular que al sufrir un desequilibrio en su potencial celular disminuye su campo magnético natural biológico, lo que induce el desarrollo de una patología que debe ser atendida por seguridad social representando un alto costo para el país es por ello que la terapia es eficaz en regular el desequilibrio de cargas evitando y previniendo la evolución de la patología a un bajo costo.

## PERSPECTIVAS

---

Dar a conocer los beneficios de campo magnético de baja frecuencia, en el sector salud, debido a que la terapia tiene una extensa aplicación en diversas enfermedades, ya que no interfiere con la medicina alopática.

Que el médico lo recete como complemento para una rápida recuperación en enfermedades difíciles de tratar.

Que la población tenga fácil acceso a este tipo de terapias, debido a que sus altos costos no permiten que gente de bajos recursos la pueda adquirir. Por lo que si el gobierno invirtiera en este tipo de terapias su costo sería mucho más bajo.

Informar a la población de las ventajas y desventajas que tiene la medicina alternativa,



## **VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA MAGNETOTERAPIA**

---

### **Ventajas**

La ventaja principal de la aplicación del CMBF, es tener un predominio especialmente fisiológico que estimula al organismo en el sentido de su propia curación.

No tiene prácticamente contraindicaciones.

No sustituye de ningún método terapéutico convencional, sino que por el contrario complementar muy bien con la mayoría de ellos.

Resulta una terapia indolora.

Se realiza de una manera sencilla y rápida para el paciente y el terapeuta.

No es necesario estar contacto directo con el cuerpo del paciente para ejercer su efecto terapéutico.

Tiene un elevado poder de penetración.

El efecto terapéutico no solo es al momento dura después de recibir la terapia.

En caso de inmovilización puede penetrar yeso u otros elementos que no sean hechos de hierro.

### **Desventajas**

Que durante la terapia puede inducir sueño por lo tanto se recomienda venir el paciente acompañado.

La presencia de implantes metálicos debido a que se pueden calentar e interferir en la penetración del Campo Magnético,.

No se debe de dar terapia a las mujeres embarazadas.

No aplicar apacientes con enfermedades virales agudas.

A personas con hemorragias agudas no se le debe aplicar.



## **COSTOS.**

---

Es importante mencionar la diferencia de costos de la terapia en las instituciones privadas su valor oscilan de \$1200 a \$2000 por sesión y en la pública (Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán C.1, UNAM), el valor es gratuito el cual podría extenderse a instituciones públicas (ISSSTE, IMSS, Institutos de Rehabilitación), que apoyarían a mejorar la calidad de vida de personas de bajo nivel socioeconómico; el cual representa el mayor sector productivo de la sociedad.

## **COMPARACION CON OTROS METODOS TRADICIONALES.**

---

En esta investigación la terapia con campo magnético no se comparó con ningún otro tratamiento tradicional de diagnóstico, por lo que no se sabe con certeza si otros tratamientos son eficaces para tratamiento de la epilepsia.

En este trabajo solo se enfatiza la importancia del tratamiento del campo magnético para la disminución en el número de convulsiones en la epilepsia, sin interferir en el tratamiento de la medicina alopática.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

1. Almarza, F. 1999. "Del Mito como anti-caos al Mito como caos mismo". Revista Escritos en Arte, Estética y Cultura. Número 11-12, pp. 11-28. Escuela de Artes UCV. Caracas
2. Ando, B. (2000). Stochastic Resonance, theory and applications. KluwerAcademic Publisher.
3. Arellano, M. (2001). "Introducción al Análisis Clásico de series de Tiempo" (En línea) 5 campus. com, estadística.
4. Barone, L. (2012). Anatomía y Fisiología del Cuerpo Humano. Ed. Cultural Librería Americana S.A. Primera Edición.
5. Barral J. Geometría fractal: algorítmica y representación, Anaya Multimedia, 1993.
6. Berenguer, A. Andrés, A. 2000. Una Introducción a la Dinámica No Lineal. Enseñanzas de las ciencias. Vol.18 (1)
7. Beristain, F. 2005. "Comportamiento Dinámico del ozono mediante el análisis no lineal de sistemas dinámicos" UNAM, Facultad de Ciencias. Maestro en Ingeniería (eléctrico). México.
8. Bogoluibov. (1983). Técnicas y metodología de los tratamientos fisioterapéuticos. bogoluibov, Moscú.
9. Carbonell, F. (2006). Cálculo numérico de exponentes de Lyapunov en ecuaciones diferenciales. Instituto de Cibernética, Matemática y Física. Editorial Universitaria. Habana, Cuba.
10. Castillo A. 2009, Teoría del caos, modelo aplicado al clima, Universidad Nacional Autónoma de Honduras
11. Cohen, D. (1968) Magneto Encephalography, evidence of magnetic fields produce by alpha-rhythm current. Rev. Science.



12. College, P. (2011). Fisiología Humana. 12ª Ed. Editorial Mac Graw Hill. México D.F.
13. Crossman, A. Neary, D. (2007). Neuroanatomía 3ª Ed. Editorial ELSEVIER MASON. España.
14. Del moral, A. and Azanza, M. (1992). Model for de effect of stactic magnetic field isolated neurons J Magnetism and Magnetic Materials vol 114.
15. Diaz, J. (2002). Epilepsia. Guías Clínicas en Atención Primaria
16. Diaz, R. Fernandez, J. (2003). Biological effects of the electromagnetic fields on the bone tissue, ELSEVIER. Vol. 37. Núm. 05.
17. Doménech JM. Métodos Estadísticos en Ciencias de la Salud. Barcelona: Signo; 1997.
18. Douady, A. Hubbard, J. 1984 etude “Dynamique des polynomes complexes”, Prepublications mathematiques d’ Orsay France.
19. Edward, Ott. Chaos in Dynamical System. 1993. Second Edition University Press, Cambrige.
20. Espinosa, A. (2004). “El caos y la caracterización de series de tiempo a través de técnicas de la dinámica no-lineal”. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
21. Espinosa, C. (2008). Comportamiento caótico en los mercados bursátiles latinoamericanos utilizando Visual RecurrenceAnalysis. Revista Análisis Económico. Vol. 23. Núm. 52,
22. Feria, A. Martínez, D. (1986). Epilepsia un enfoque multidisciplinario. 1º Edición, Ed. Trillas. México.
23. Fustel, A. García, R. (2011). Campos electromagnéticos y efectos en salud. Subdirección de Salud Pública de Bizkaia



24. Gallego, J. (2010). Aplicación de la teoría de caos para el análisis y pronóstico de series de tiempo financieras en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
25. Garcia, O. (2006). On the Use of Fourier analysis, Singular Spectral Analysis and Artificial Neural Networks in Stratigraphy. Revista Geología Colombiana No.31.
26. González B. (2011). Transducción y procesos de señales en el electroencefalograma. Universidad iberoamericana de Ciencias y Tecnología. Universidad de Alcalá Departamento De Electrónica.
27. Goñi, J. García, J. (2006). Dinámica de Sistemas Biológicos: modelando complejidad. Universidad Politécnica de Cataluña. Laboratorio de Neuroinmunología.
28. Gutiérrez, J. (2007). “Sistemas no lineales, conceptos Algoritmos y Aplicaciones” Depto. de matemáticas Aplicadas y Ciencias de la Computación. Universidad de Cantabria (España).
29. Gutiérrez, J. “Sistemas no lineales, conceptos Algoritmos y Aplicaciones” Depto. de matemáticas Aplicadas y Ciencias de la Computación. Universidad de Cantabria (España).
30. Gutiérrez, P. Hott E. 2004. Introducción al Mundo Fractal. Medio Matemático.
31. Hall, J. (2011). Tratado de Fisiología Médica 12<sup>a</sup> Ed. Editorial ELSEVIER MASON.
32. Hassan, W. (2012). Correlation Dimension of an Attractor Generated by an Orbit of General Two-Dimensional Iterated Quadratic Map. Int. J. Contemp. Math. Sciences Vol. 7, no. 9,
33. Hernan, L. (2007). Sodio y Potasio, en busca del equilibrio. Ed. Salvat impresores. Chile.



34. Hernández, J. Varela, J. (2010). Hallazgos electroencefalográficos en epilepsia resistente en el Centro Médico Nacional 20 de Noviembre. Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas. Vol 15. No 1
35. Holger, K. and Schreiber, T. [2006]. Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge University Press,
36. Howden, A. (1986). Chaos, Princeton University, EUA.
37. Kikuchi, R. Tsutsumi, A. (1996). "Fractal Aspect of Hydrodynamics in a Three-Phase Fluidized Bed". Chem. Eng. Sci., No. 51, Vol.11.
38. Lacomba E. 2000. Los Sistemas Dinámicos, ¿Que son y para qué sirven? Miscelánea Matemática. México.
39. Levy D. (1994). Chaos Theory and Strategy: Theory, applications and Managerial Implications Strategic Management Journal, 15, 176
40. López, A. Camacho C. (2000). El grafico de Recurrencia en el análisis de series temporales: el programa VRA (visual recurrenceanalysis). Revista Electrónica de Metodología Aplicada. Vol. 6 nº 1.
41. Lorenz, E. Páez De La Cadena F. (1995). La Esencia del Caos. Editorial Debate. España.
42. Mandelbrot, B. (1982). The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman and Co., New York.
43. Mandelbrot, B. (2004). El comportamiento de mercados, una opinión de Fractal del riesgo, ruina y recompensa.
44. Martínez G. (2003). Biomagnética: Campos magnéticos, fuente de la vida. Editorial KIER. Argentina.
45. Martínez, J. Mandiola, J. (1994). Introducción del análisis de Fourier como herramienta en el estudio del compartimiento de lechos fluidizados gas sólido. Departamento de Química Analítica e Ingeniería Química. Madrid, España.



46. Mateos, E. Domínguez B. (2011). Análisis de recurrencia visual de temperatura periférica en la evaluación de un tratamiento psicológico del dolor basado en un diseño N = 11. *Psicología y Salud*, Vol. 21, Núm. 1
47. Matilla, M. (2000). Determinismo, linealidad y caos. *Rev. De metodología de Ciencias Sociales*. No.3.
48. Maturana, H. Varela, F. (1995). *Máquinas y Seres Vivos, Autopoiesis: La organización de lo vivo*. Editorial Universitaria
49. Medio, A. (1992). "Chaotic Dynamics: Theory and Applications to Economics". Cambridge University Press. Great Britain, Cambridge.
50. Meilán, M. (2005). *Anestesia Para la Cirugía de la Epilepsia: tratamiento de la epilepsia*. Libro electrónico de anestesiología reanimación y tratamiento para el dolor. Hospital de la Princesa. Madrid. España.
51. Meyer P. (1986). *Probabilidad y Aplicaciones Estadísticas* Edit. Addison-Wesley Iberoamericana; México.
52. Miguel, A. Sanjuán, F. (2003). "Conceptos Universales en Física No Lineal: Caos y Fractales. JapanPrize 2003", *Rev. Esp. Fis.* 17, 5
53. Niedermeyer E. (1993). *Electroencephalography, basic principles, clinical applicatio and related fields*. 3rd ed. Williams &Wilkins
54. Noya, M. Vadillo, F. (1993). *Epilepsia: Principios básicos de diagnóstico y tratamiento*. Sanofi Winthrop S.A. Barcelona.
55. Ott, Edward, Tim Sauer, and James A. Yorke. (1994). *Coping with chaos: analysis of chaotic data and the exploitation of chaotic systems*. John Wiley and Sons,.
56. Pereira D. (2000). *Evaluation of Malignancy in Tumors of the Central Nervous System Using Fractal*. Engineering in Medicine and Biology Society Dimension Vol.10. No.1109, Caracas Venezuela.





57. Pérez, J. (1997). Codificación: Fractal de Imágenes californiana U.S.A.
58. Press, W. and Flannery, B. (2005). Numerical Recipes Vetterling, Cambridge University Press, Second Edition USA:
59. Proakis, J. (1998). Tratamiento Digital de Señales. 3° edición. Ed. Prentice Hall. México.
60. Quezada, A. (2006). Fractales y opinión pública: una aplicación del exponente de Hurst al estudio de la dinámica de la identificación ideológica. Universidad de Barcelona; facultad de psicología
61. Quintero, O. (2011). Hurst exponent and fractal dimension estimation of a topographic surface through a profiles extraction. Rev. Universidad Distrital "Francisco José de Caldas. Rev. Geomatica UG.GEO. Vol. 5, No.5
62. Reyes, M. (1999). Una introducción a la Geometría Fractal y su Aplicación a la Compresión De Imágenes, Boletín de la Sociedad Puig Adam de Profesores de Matemáticas 52, 32-55.
63. Rogawski M. Porter, R. (1990). Antiepileptic drugs: pharmacological mechanism and clinical efficacy whit consideration of promising developmental stage compounts. FarmacologicalReview. No. 42.
64. Romanelli R. (2006). Teoría del caos en los sistemas biológicos. Revista Argentina de Cardiología Vol. 74. No. 6.
65. Saladin, K. (2013). Anatomía Fisiológica: Unidad entre forma y función. Ed. Mc Graw Hill. Sexta edición.
66. Sánchez, M. (1996). "El idioma de un nuevo paradigma financiero". Revista "Bolsa de Madrid" núm. 42
67. Sanjuán, M. Casado, J. Dinámica No Lineal: Orígenes y Futuro. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.
68. Schifter, I. La ciencia del caos. 1° Edición. Editorial Fondo de Cultura Económica. México D.F.

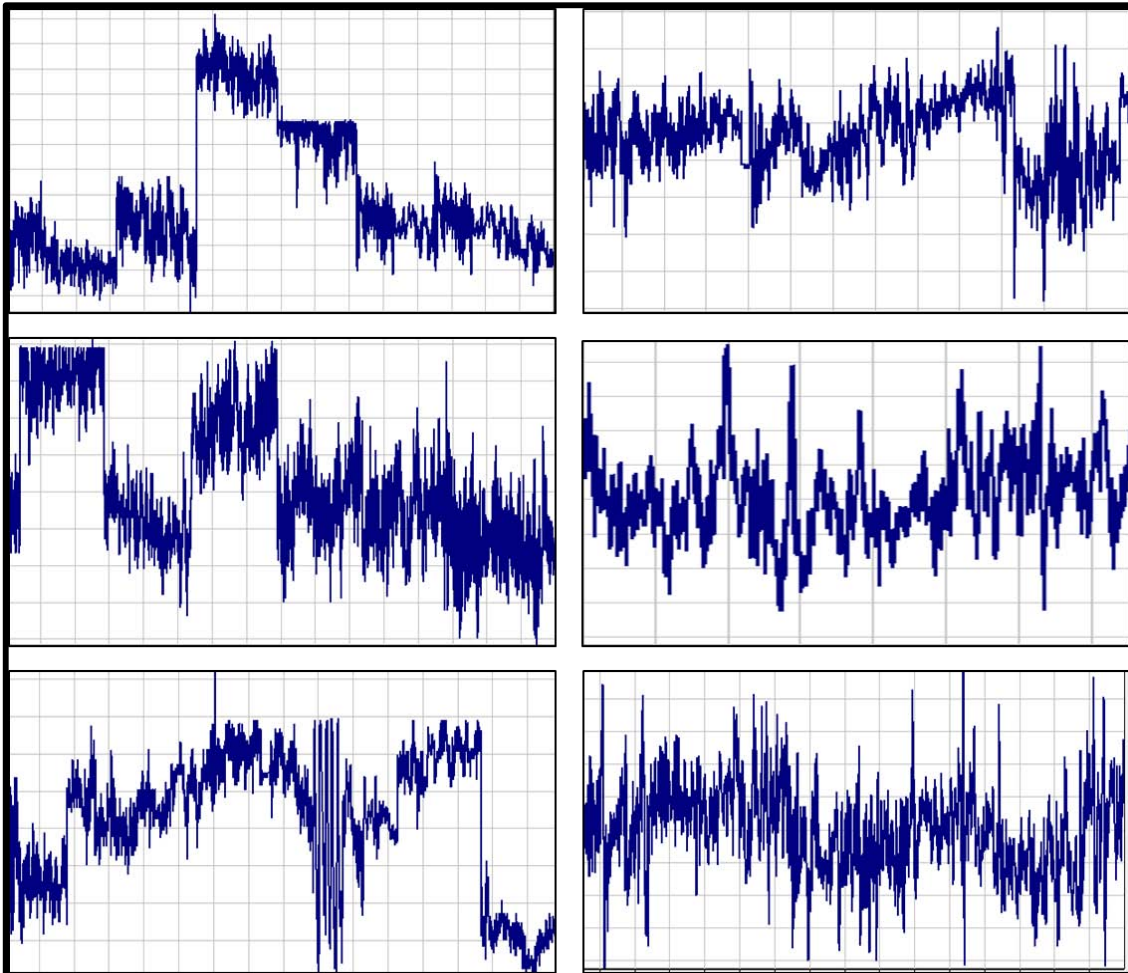


69. Serón, M. (2000). *Sistemas No Lineales. Laboratorio de Sistemas No Dinámicos y Procedimiento de Señales*. Ed. Prentice Hill. 2º Edición.
70. Smith, P. (2007). *El caos, una explicación a la teoría*. 7º Edición. Ediciones Akal S.A. Madrid España.
71. Sobrino, P. Gutiérrez C. (2003). *Teoría del Caos: Efecto Mariposa*. Universidad Ada A. Byron. Perú
72. Solano M. *Efecto Biológico del Campo Magnético*.
73. Sole, R. Manrubia S. (1993). *Orden y Caos en Sistemas Complejos*. Ediciones UPC. España.
74. Sorando J., 2012. *Fractales. Geometría del caos*. Departamento de Matemáticas del IES Elaios de Zaragoza. España.
75. Torres, N. 2007. *Caos en Sistemas Biológicos*. Facultad de Biología Universidad de La Laguna. Tenerife, España.
76. Tortora, G. (2009). *Anatomía y Fisiología Humana*. 11ª Ed. Editorial Panamericana.
77. Trejo, F. (2005). *Anatomía de la epilepsia y fármacos utilizados en su tratamiento*. Archivos de Medicina. Vol.1 No. 002
78. Urban. N. "Aplicación de la dinámica no Lineal para caracterizar la función de la presión arterial y presión ventricular en rata Wistar". Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.
79. Zaragoza, R. (1999). *Magnetoterapia*. Medicina Física. España.
80. <http://neurofisiologiagranada.com/eeg/eeg-actividadcerebral.htm>

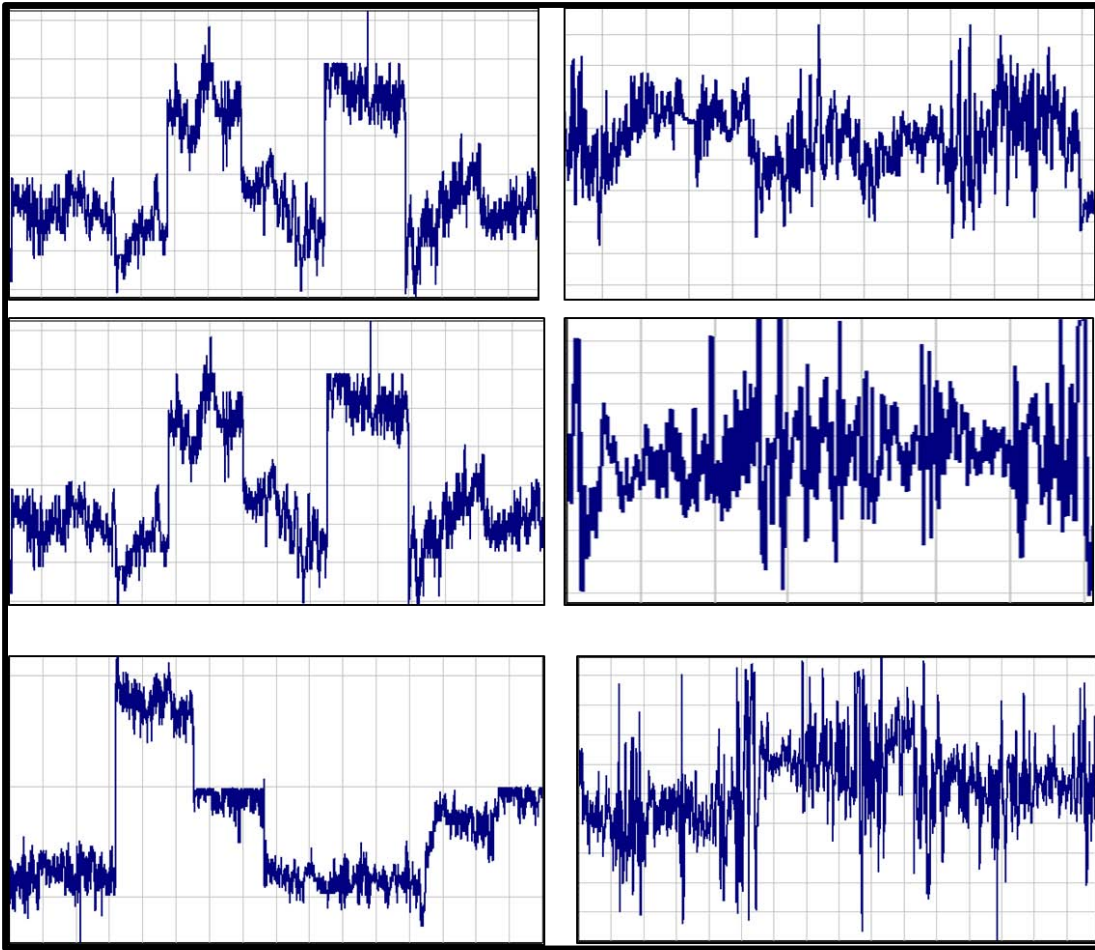


## ANEXO

### RESULTADOS DE ELECTROENCEFALOGRAMAS



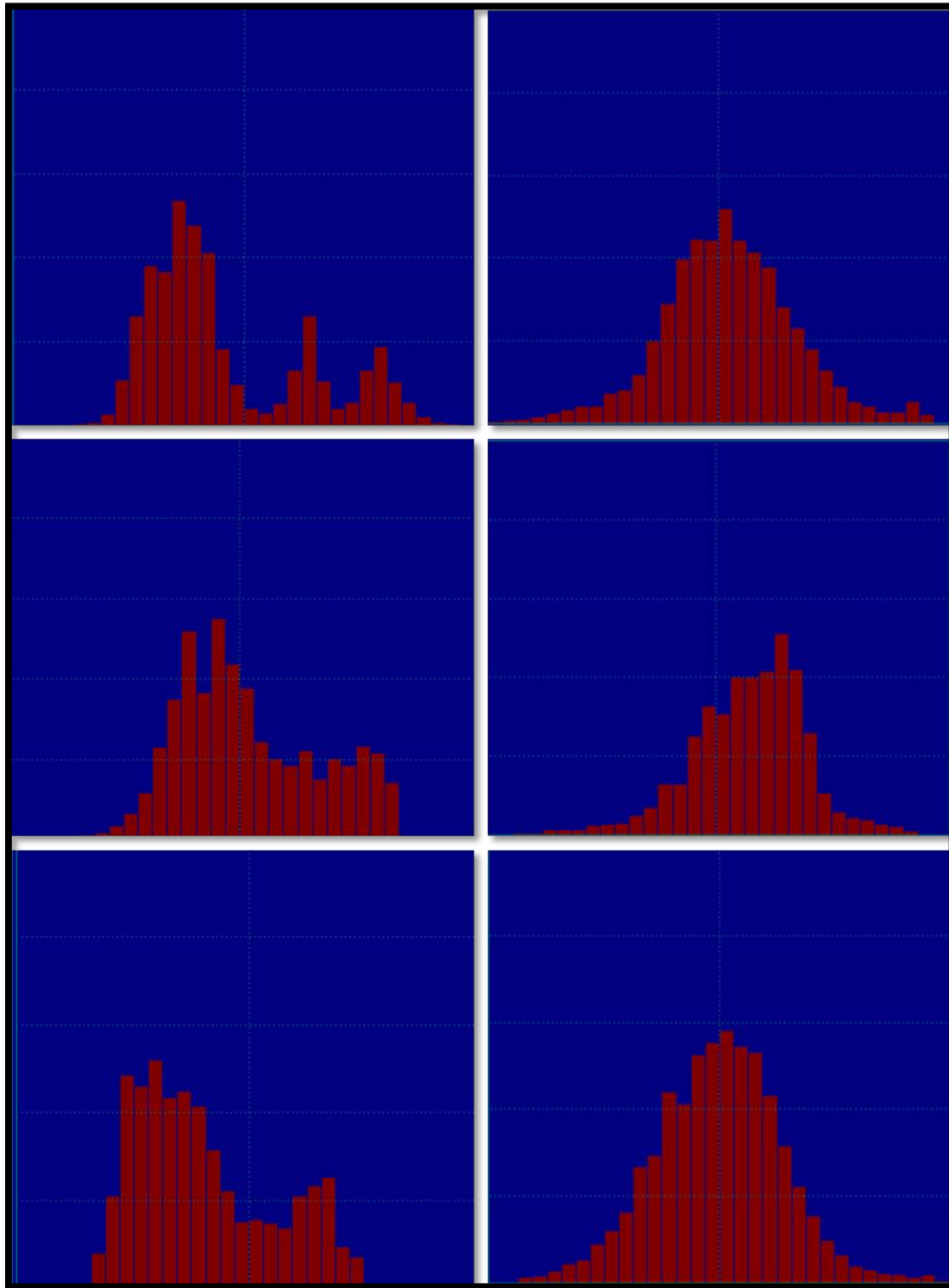
Electroencefalogramas de pacientes 2, 3,4 antes y después de recibir la terapia de CMBF



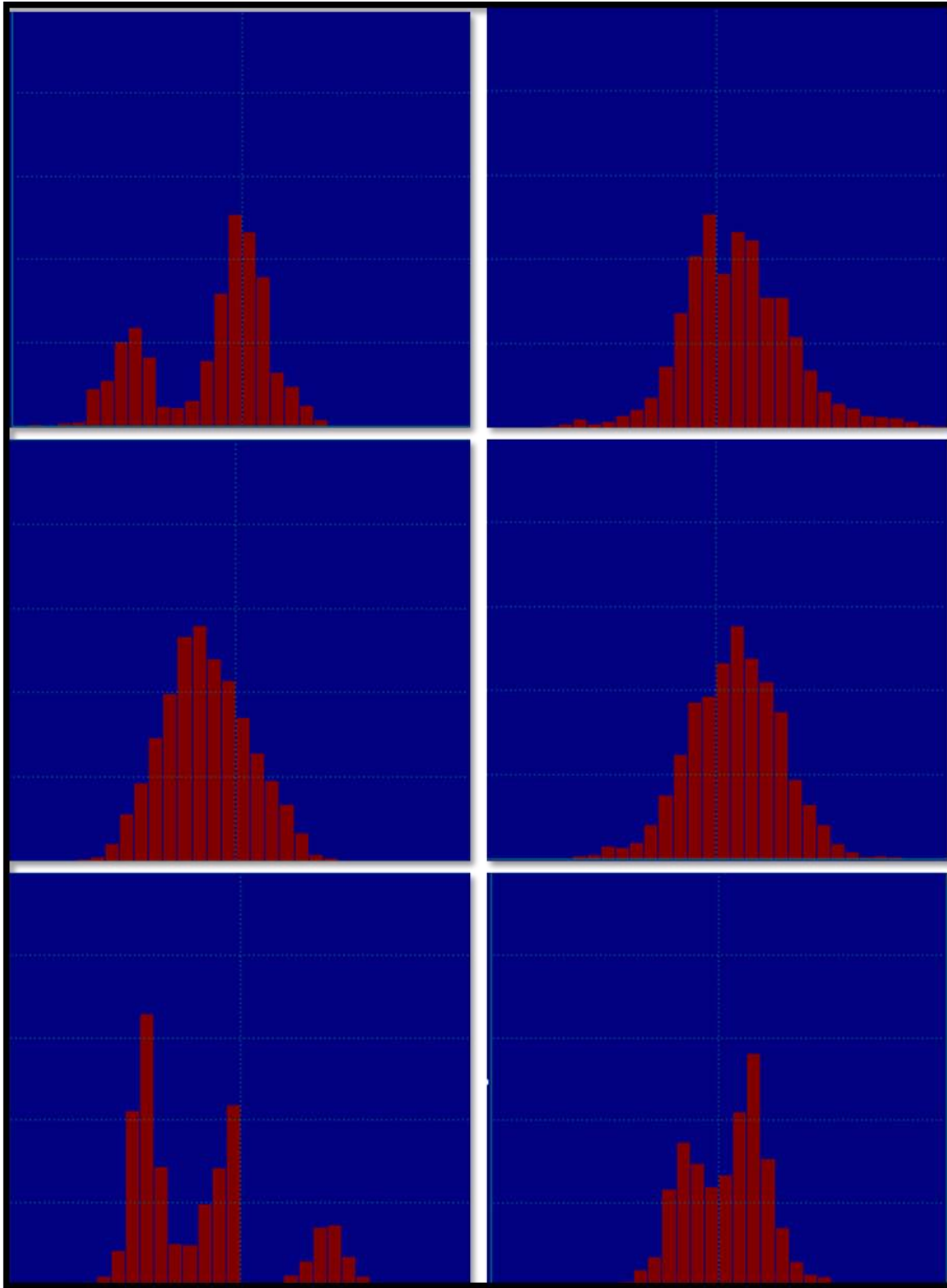
Electroencefalogramas de pacientes 5, 6,7 antes y después de recibir la terapia de CMBF



**RESULTADOS DE PROBABILIDAD DE DISTRIBUCION DE PACIENTES  
ANTES Y DESPUES DE RECIBIR LA TERAPIA DE CMBF**



Comparación de pacientes 2,3,4 antes y después de tomar la terapia de CMBF



Comparación de pacientes 5, 6,7 antes y después de tomar la terapia de CMBF



### **RESULTADOS DE ASIMETRÍA Y CURTOSIS**

<u>PACIENTES</u>	<u>CURTOSIS</u>	<u>ASIMETRÍA</u>
<b>2</b>	-0.4573	-0.0811
<b>3</b>	-0.7879	-0.4203
<b>4</b>	-0.7444	-0.6074
<b>5</b>	-0.4122	-0.1505
<b>6</b>	-0.4004	-0.0513

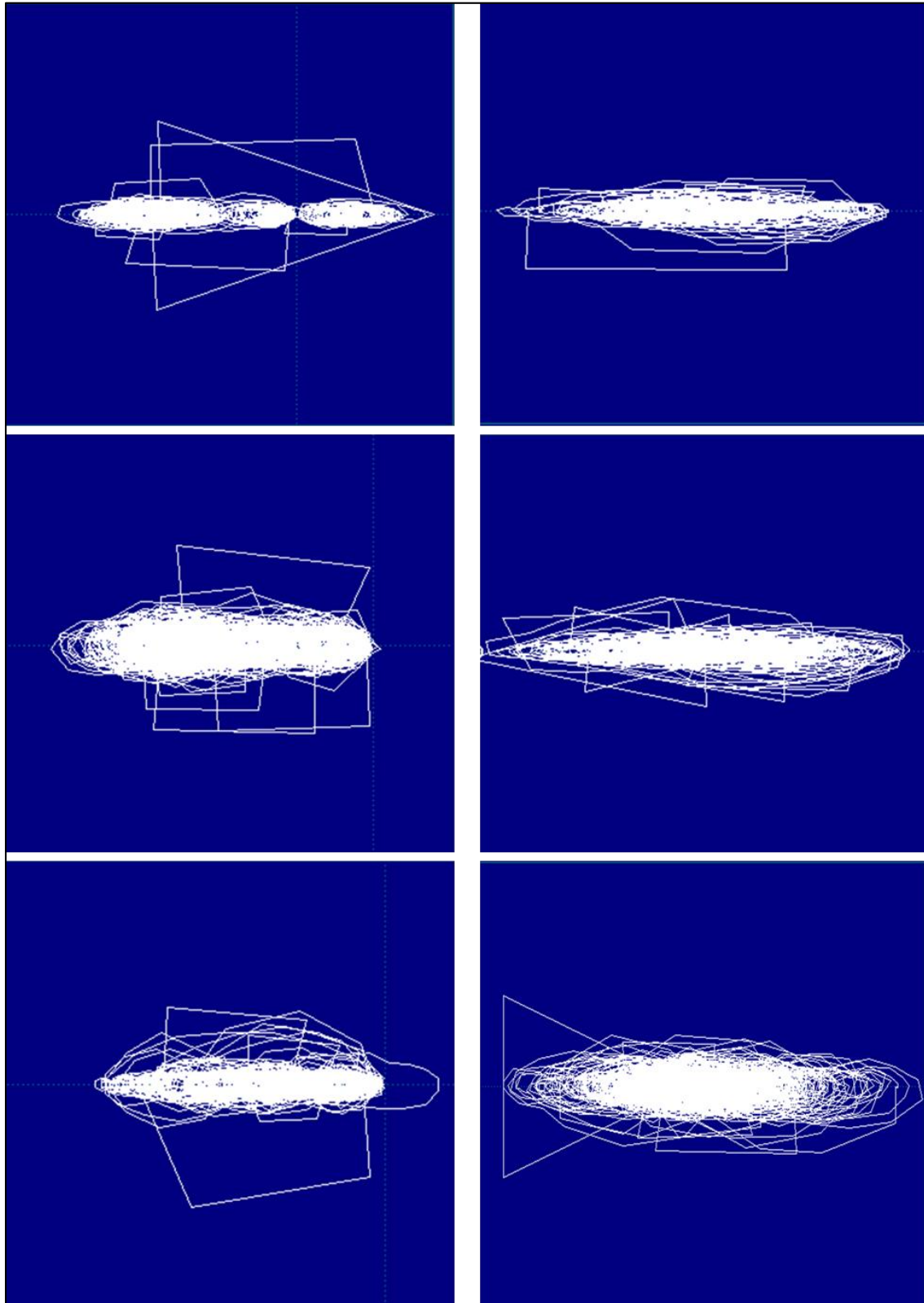
Pacientes antes de tomar la terapia de CMBF

<u>PACIENTES</u>	<u>CURTOSIS</u>	<u>ASIMETRÍA</u>
<b>2</b>	0.7528	0.4182
<b>3</b>	0.5537	0.1148
<b>4</b>	0.4255	0.1515
<b>5</b>	0.1079	0.1378
<b>6</b>	0.1314	0.0356

Pacientes después de tomar la terapia de CMBF

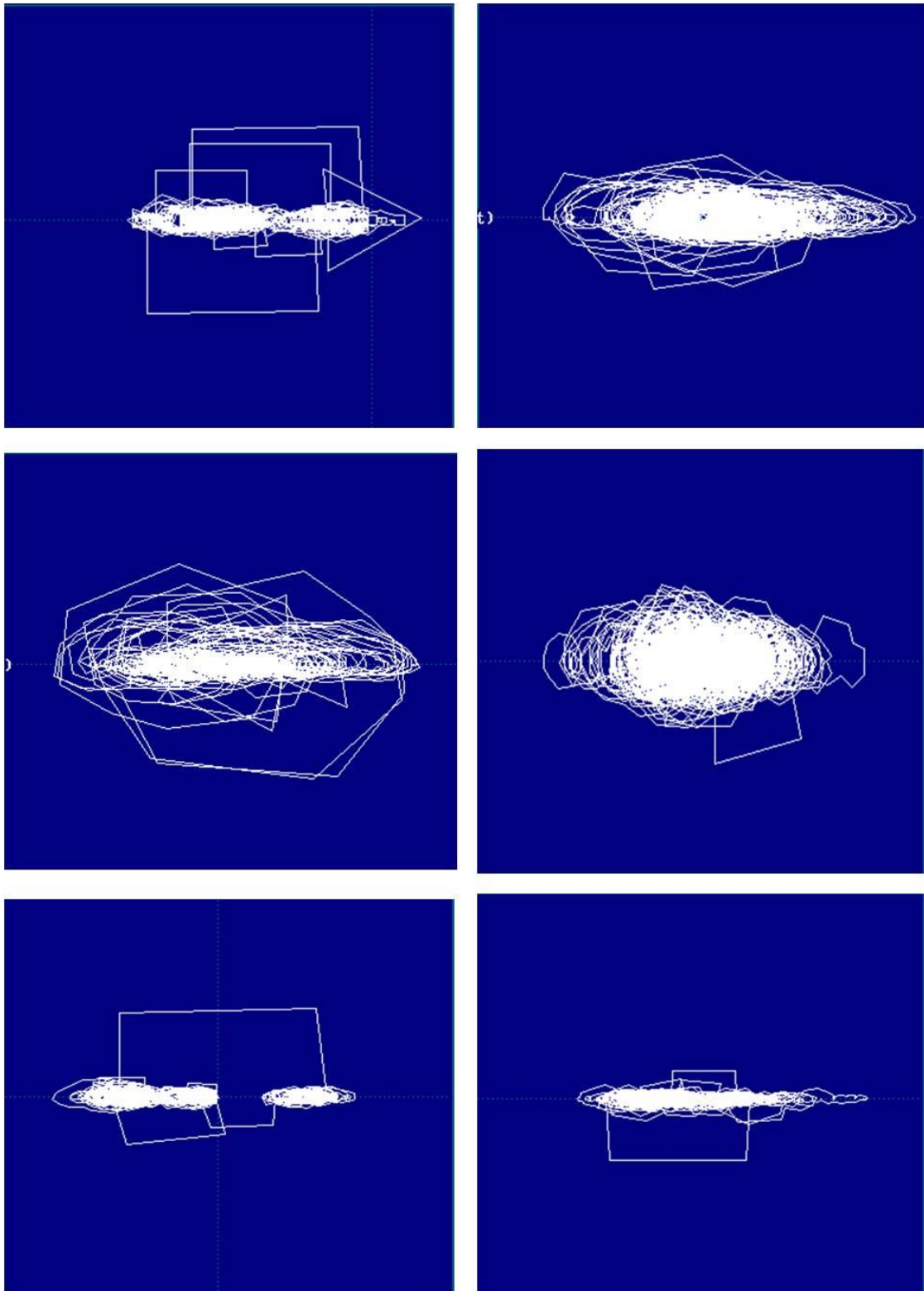


## **RESULTADOS DE ATRACTORES EXTRAÑOS**



Atractores extraños de pacientes 2, 3, 4 antes y después de tomar la terapia de CMBF





Atractores extraños de pacientes 5, 6, 7 Antes y Después de tomar la terapia de CMBF

**RESULTADOS DE EXPONENTE DE HURST**



PACIENTES	Antes de tomar terapia de CMBF	Después de tomar terapia de CMBF
2	0.3351	0.3949
3	0.3528	0.3992
4	0.3939	0.4112
5	0.3941	0.4217
6	0.4033	0.4257
7	0.4050	0.4329

Pacientes antes y después de tomar terapia de CMBF.

### **RESULTADOS DE EXPONENTE DE LYAPUNOV**

PACIENTES	Antes de tomar terapia de CMBF	Después de tomar terapia de CMBF
2	0.397 +- 0.020	0.378+-0.019
3	0.582+-0.021	0.412+-0.019
4	0.507+-0.019	0.392+-0.023
5	0.492+-0.019	0.414+-0.025
6	0.5023+-0.020	0.409+-0.021
7	0.382+-0.019	0.241+-0.016

Pacientes antes y después de tomar terapia de CMBF.



**RESULTADOS DE DIMENSIÓN CORRELACIÓN**

PACIENTES	Antes de tomar terapia de CMBF	Después de tomar terapia de CMBF
2	3.121+-0.360	2.090+-0.58
3	4.453+-0.181	3.306+-0.424
4	3.371+-0.380	2.932+-0.327
5	3.202+- 0.244	2.056+-0.344
6	3.408+-0.386	2.443+0.169
7	3.263+-0.279	2.330+-0.488

Pacientes antes y después de tomar terapia de CMBF.

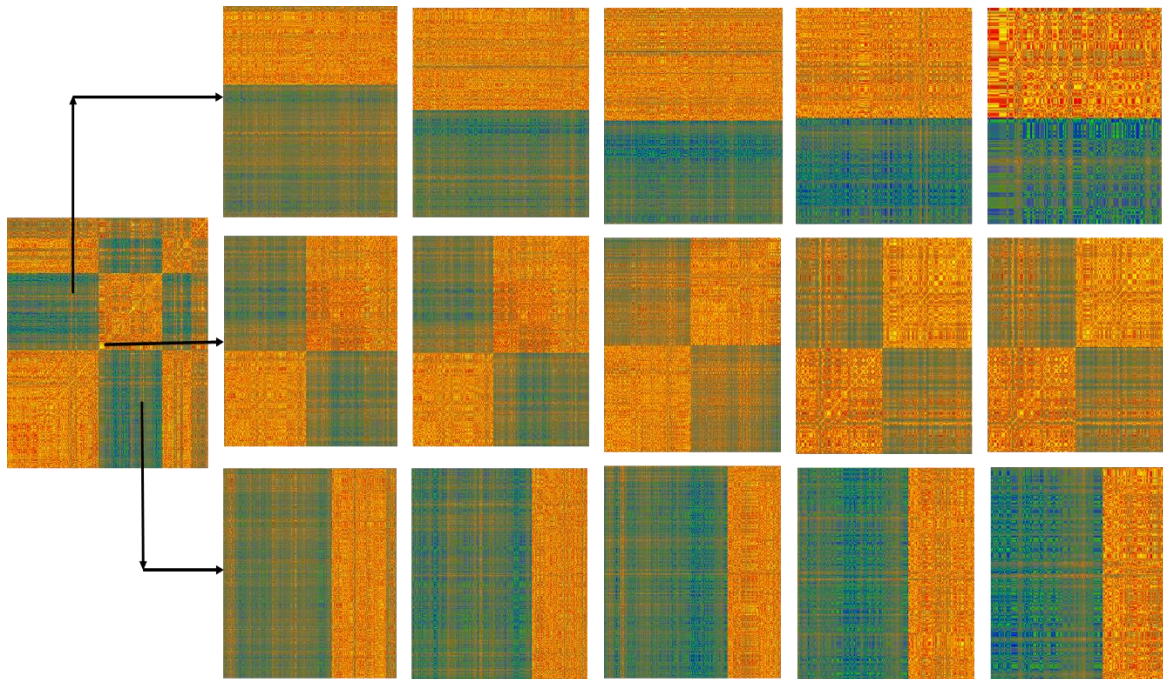
**RESULTADOS DE DIMENSIÓN DE CAPACIDAD**

PACIENTES	Antes de tomar terapia de CMBF	Después de tomar terapia de CMBF
2	1.792+-0.140	1.712+-0.138
3	1.610+-0.126	1.565+-0.122
4	1.724+-0.135	1.690+-0.132
5	1.661+-0.130	1.527+-0.119
6	1.397+-0.109	1.277+-0.120
7	1.331+-0.079	1.089+-0.085

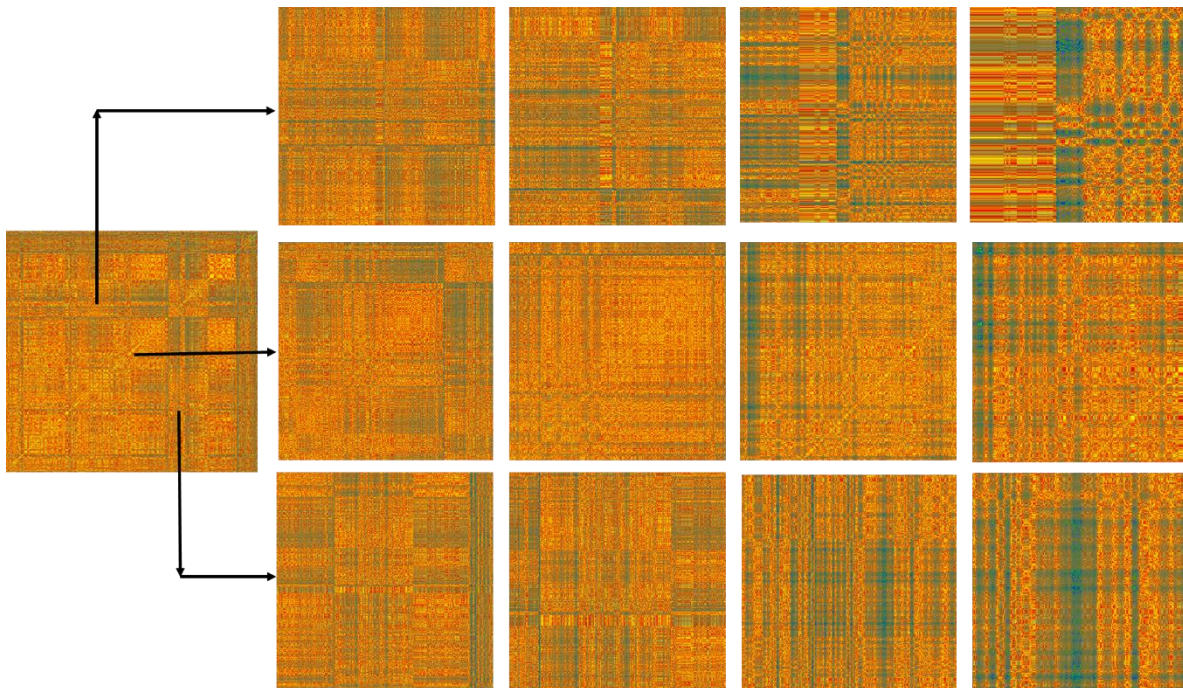
Pacientes antes y después de tomar terapia de CMBF.



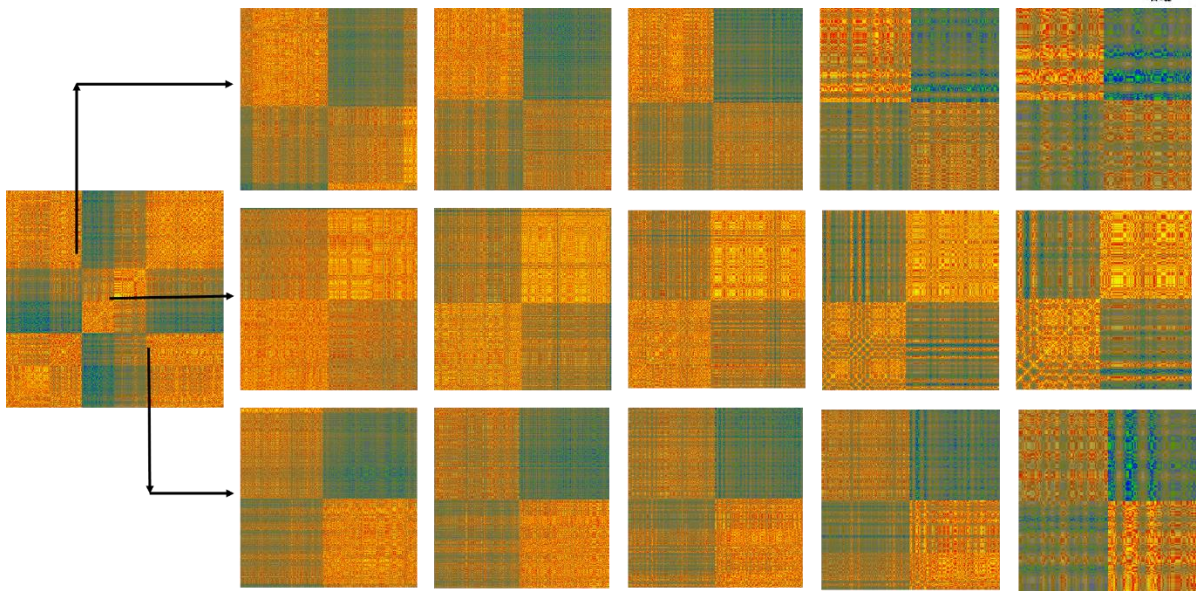
## **RESULTADOS DEL TRAMA DE RECURRENCIA**



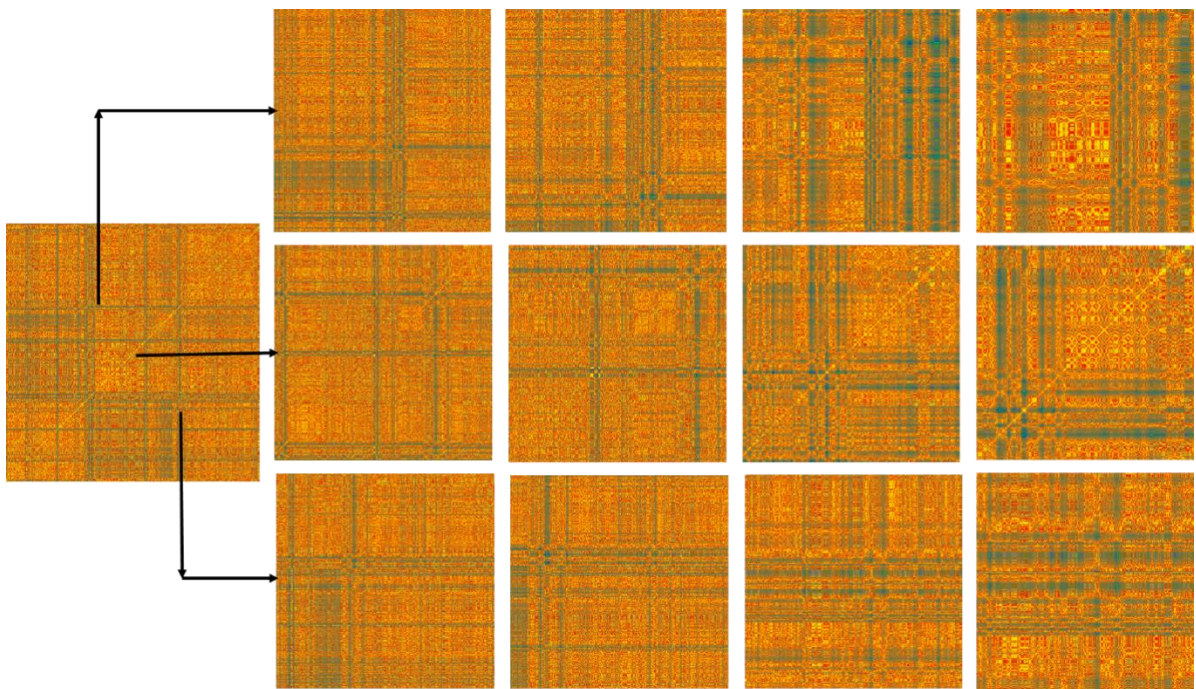
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 2, Antes de tomar la terapia de CMBF



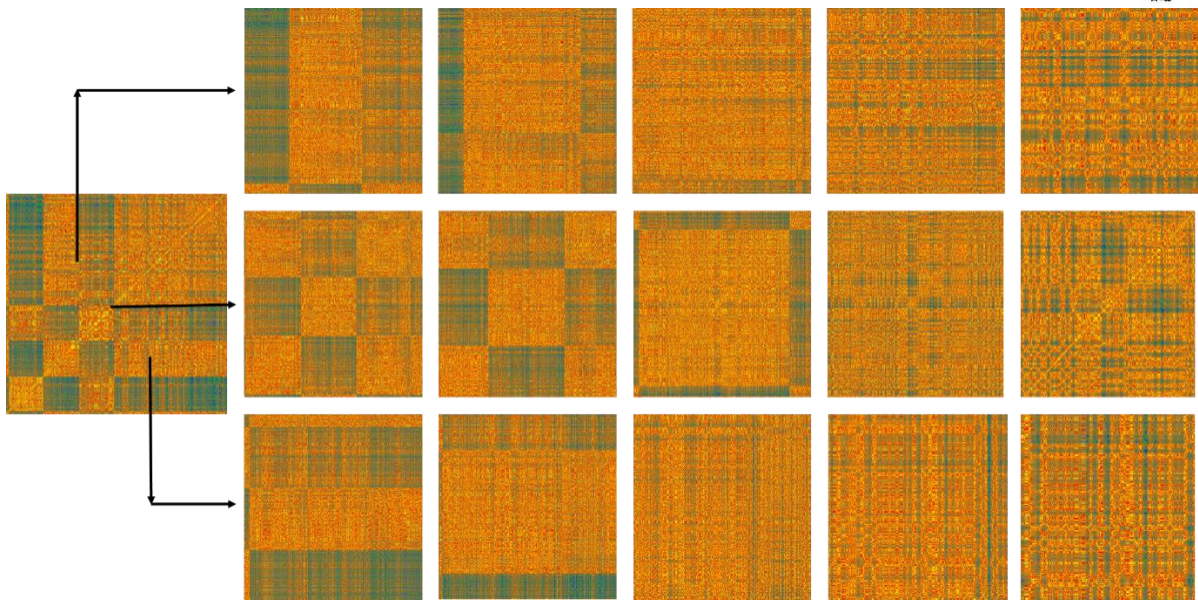
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 2, Después de tomar la terapia de CMB



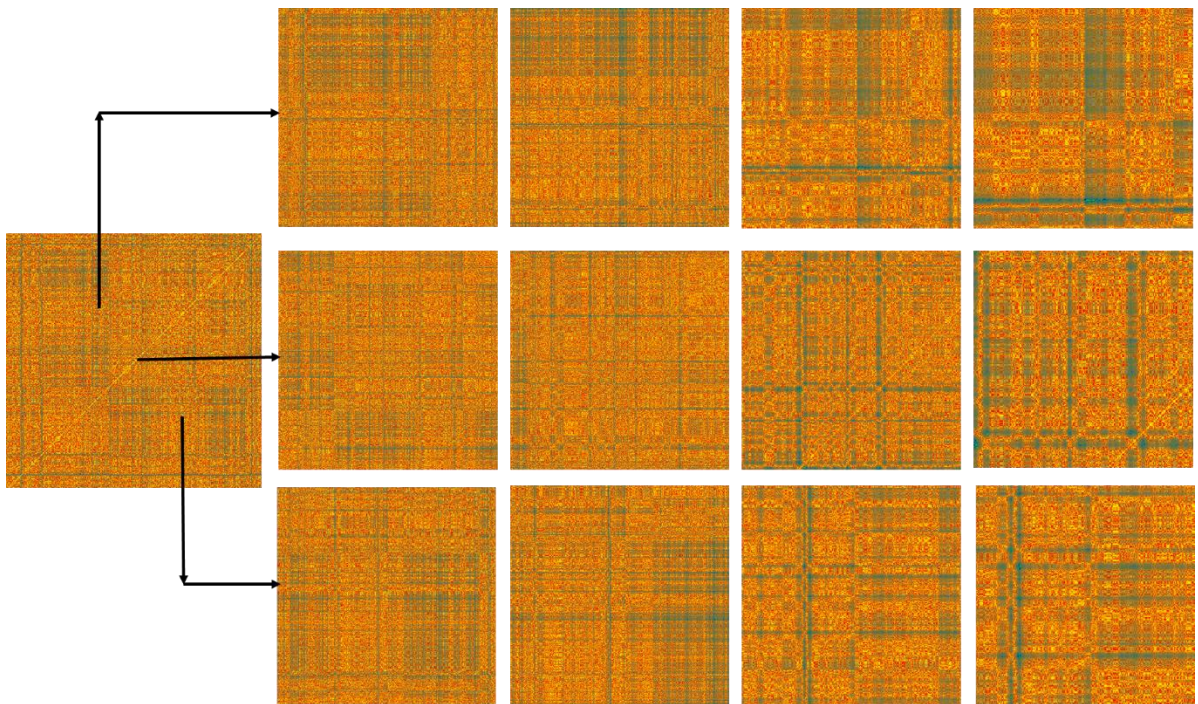
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 3, Antes de tomar la terapia de CMBF



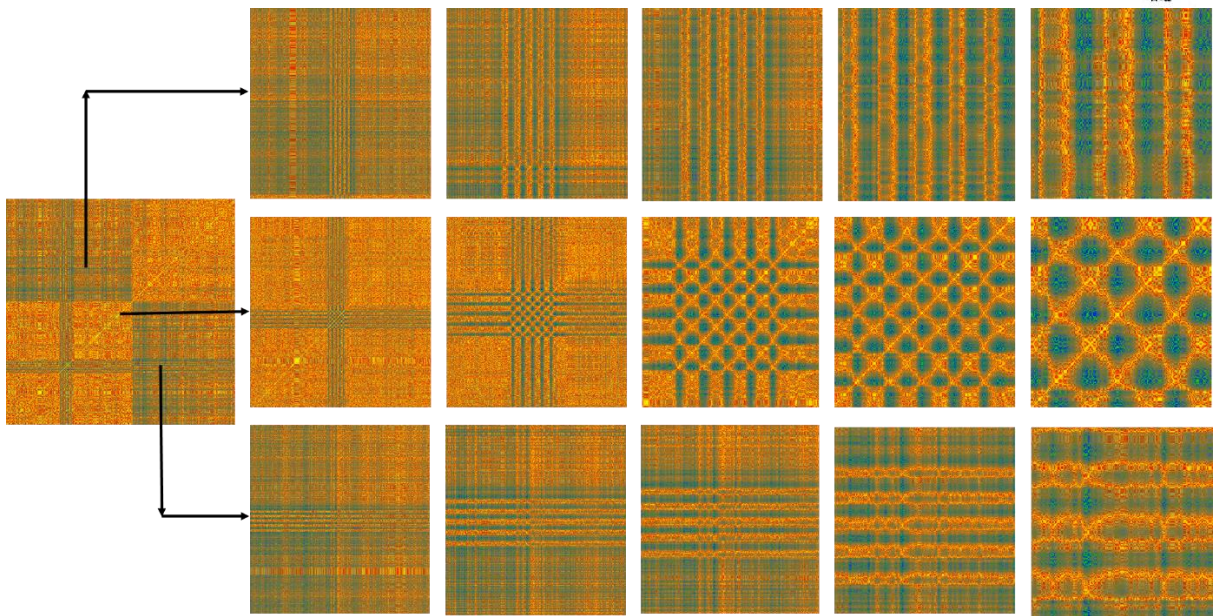
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 3, Después de tomar la terapia de CMBF



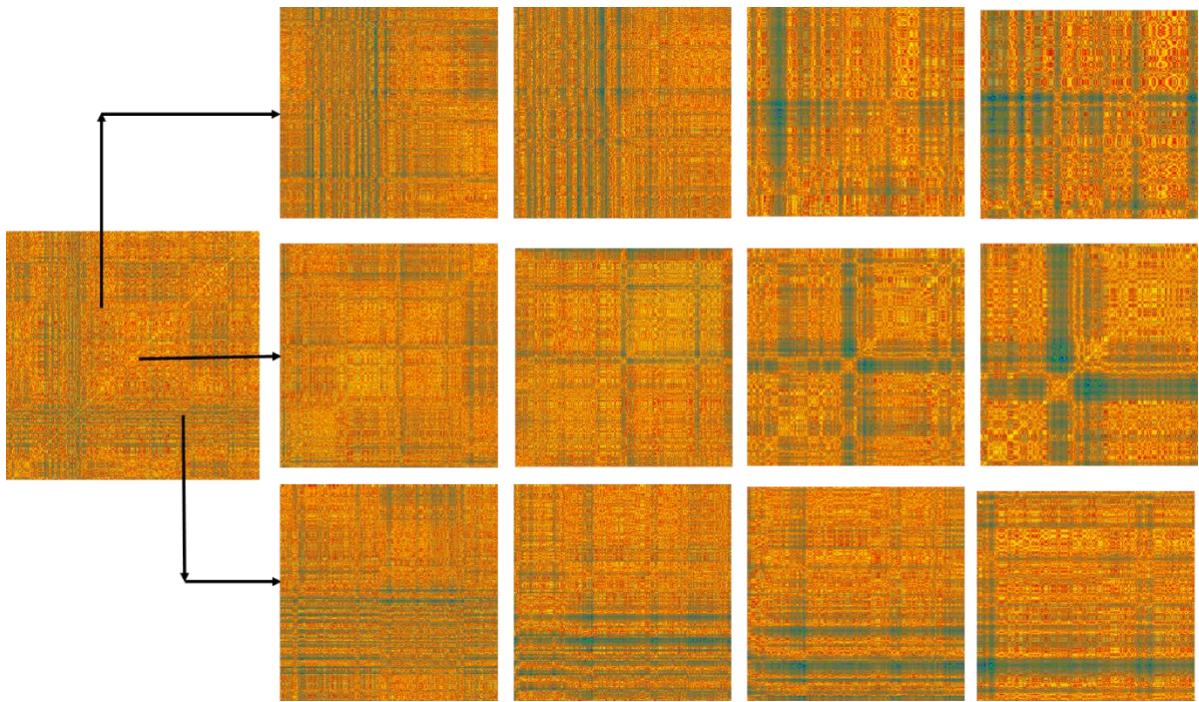
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 4, Antes de tomar la terapia de CMBF



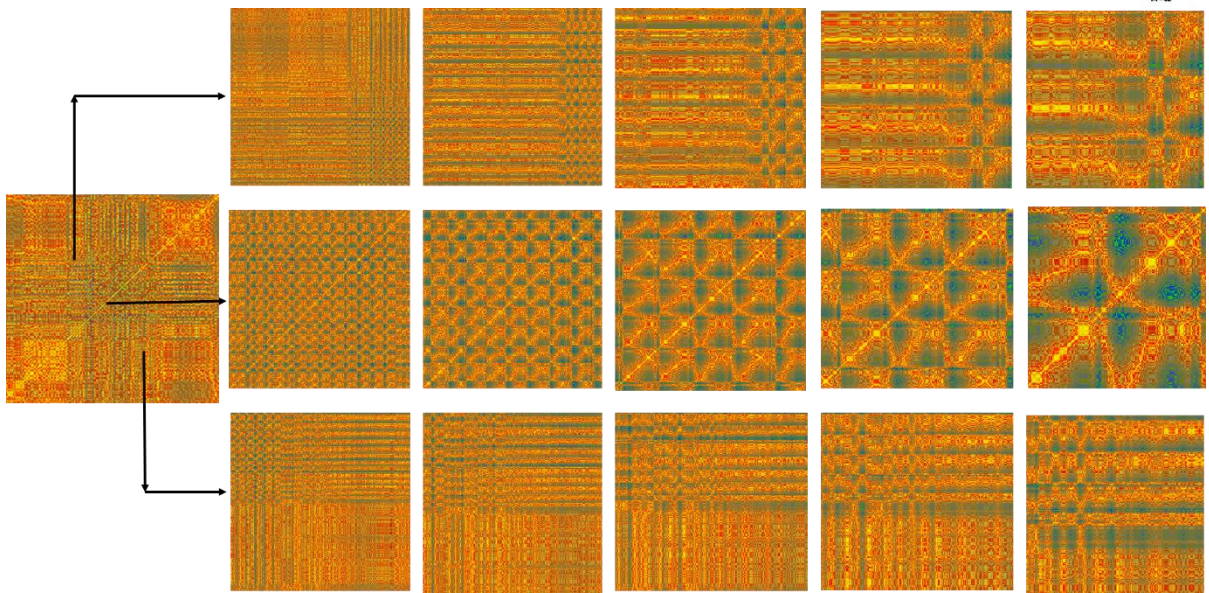
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 4, Después de tomar la terapia de CMBF



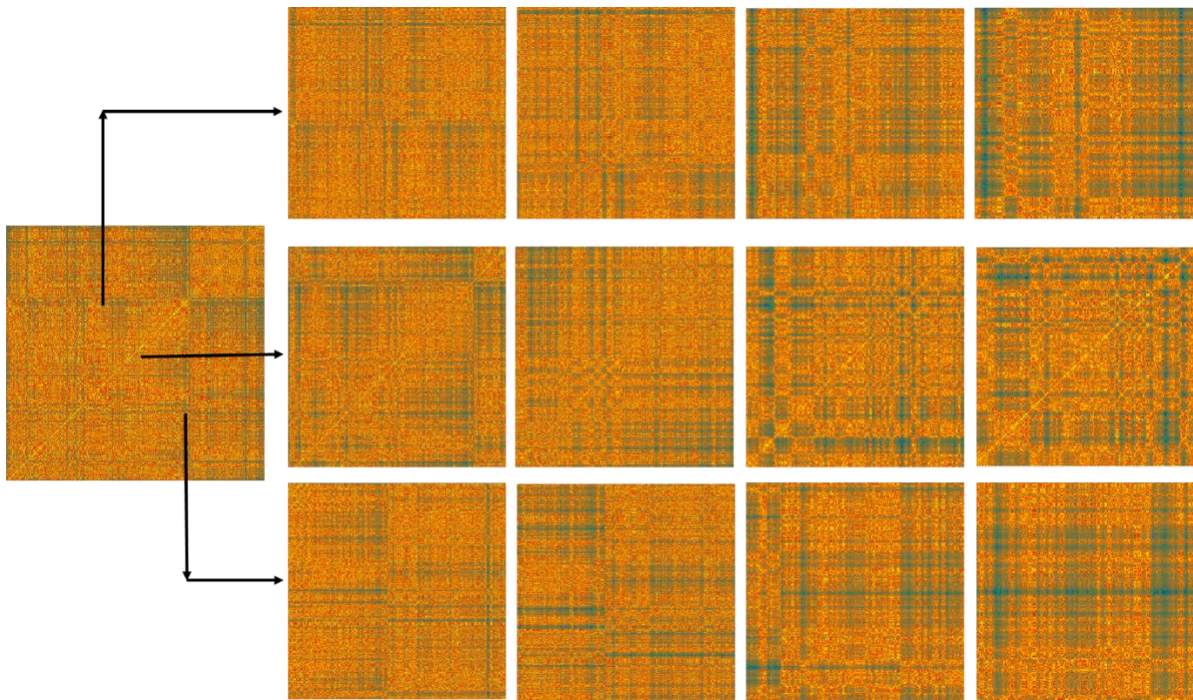
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 5, Antes de tomar la terapia de CMBF



Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 5, Después de tomar la terapia de CMBF

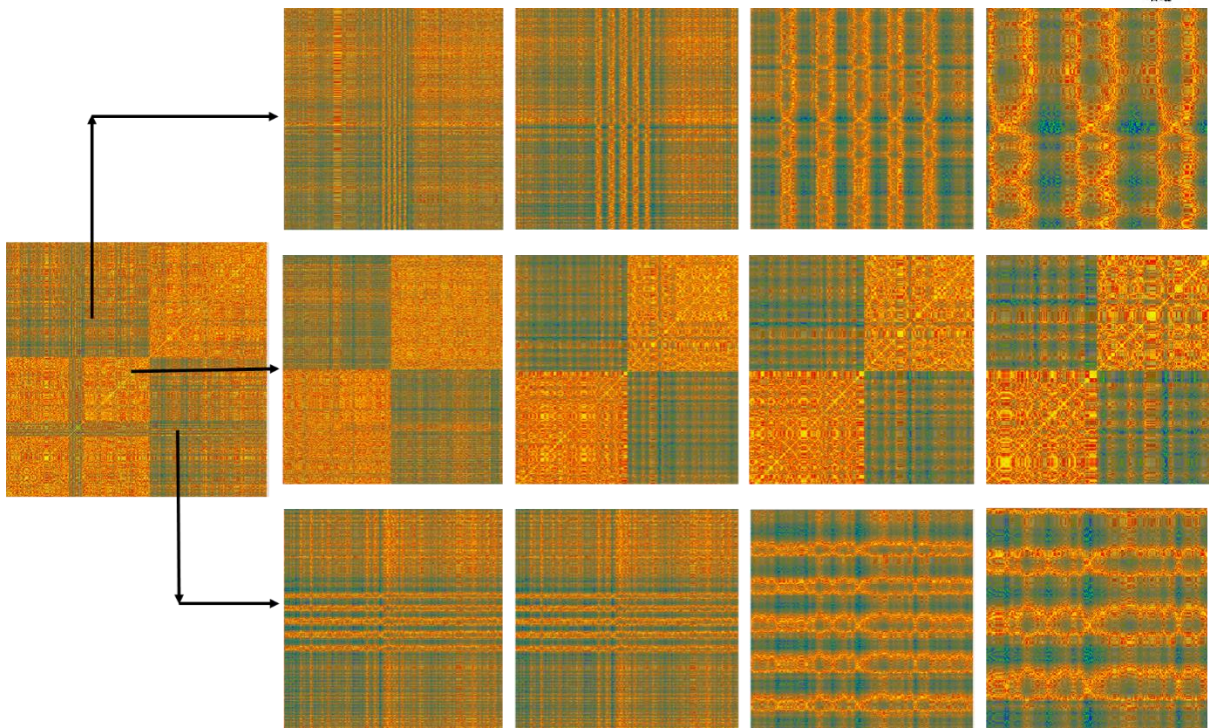


Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 6, Antes de tomar la terapia de CMBF

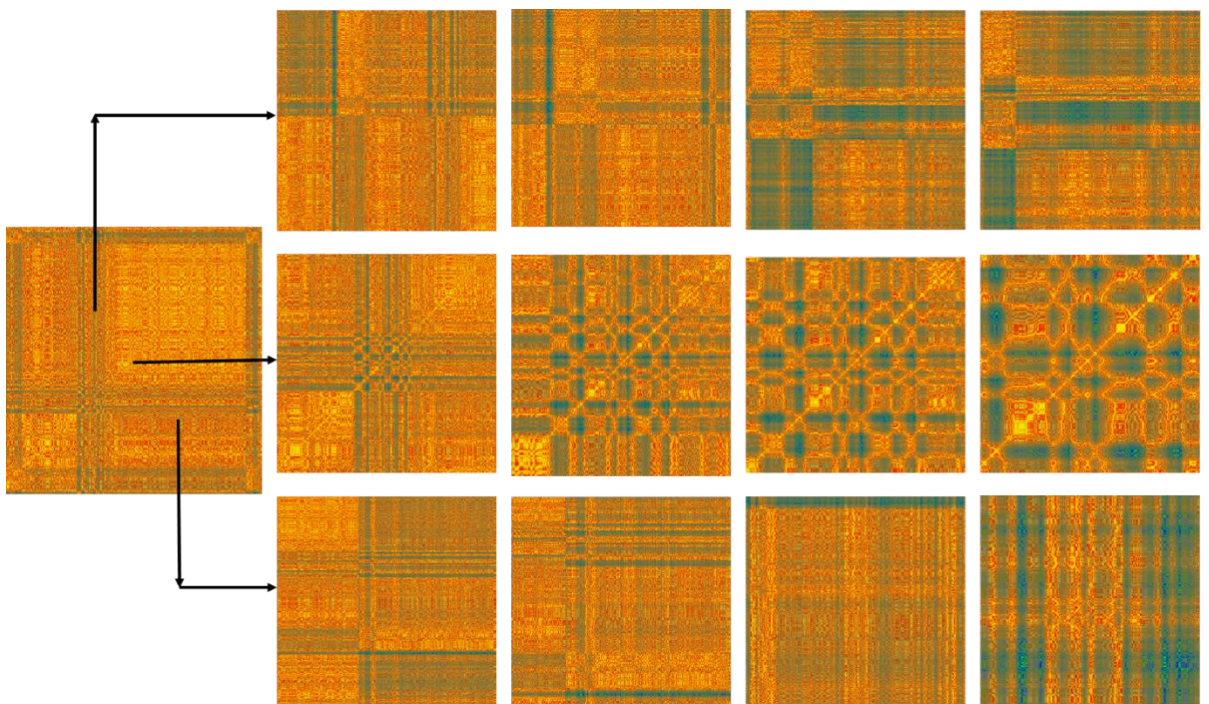


Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 6, Después de tomar la terapia de CMBF





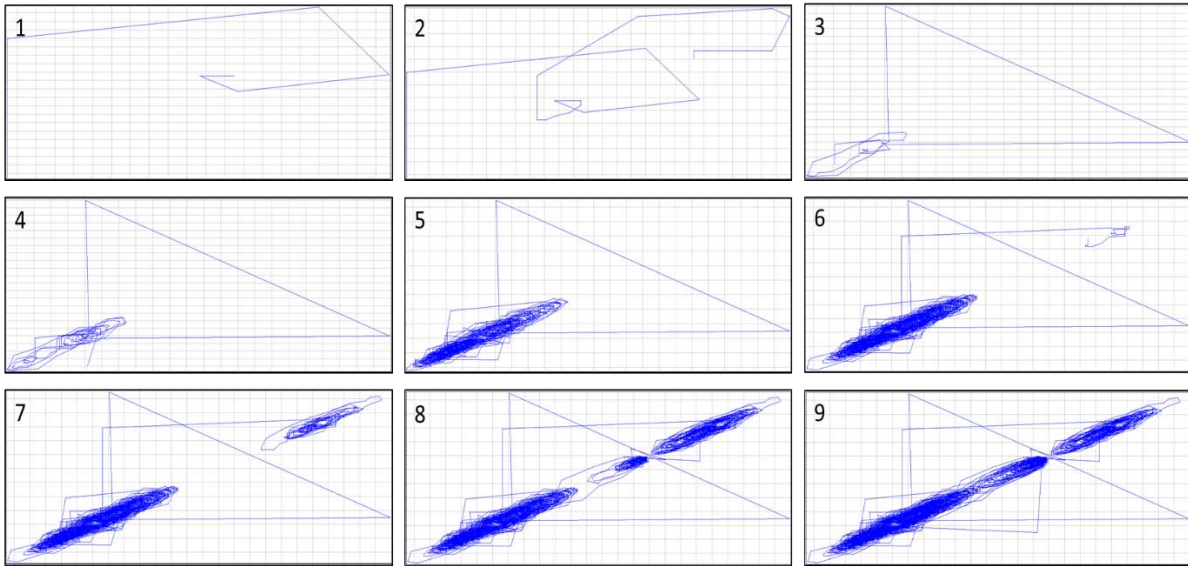
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 7, Antes de tomar la terapia de CMBF



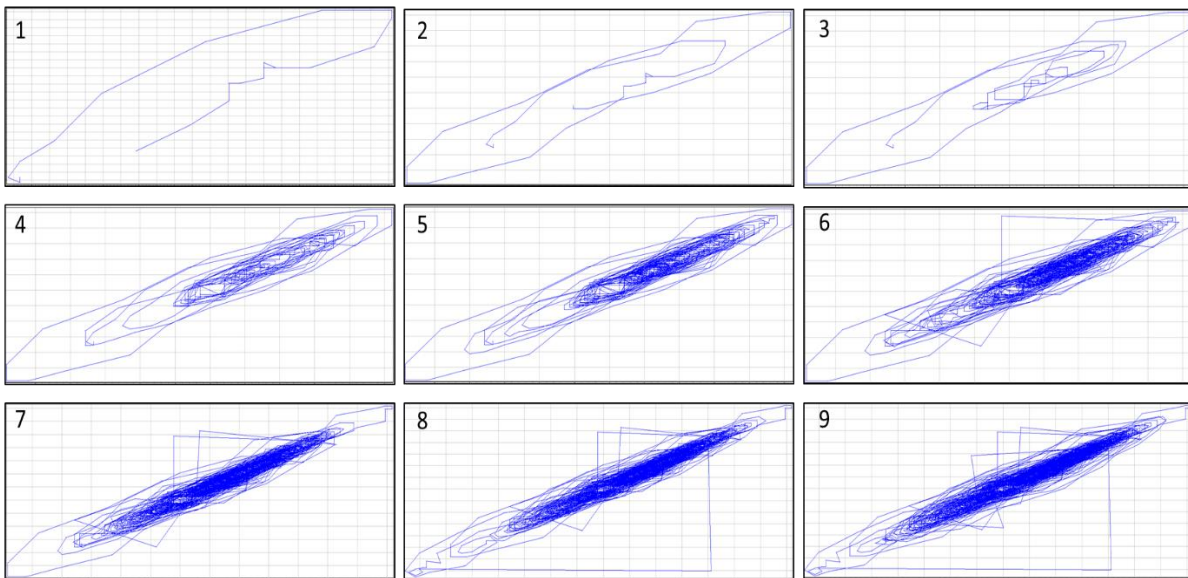
Secuencia del Trama inicial de recurrencia de Paciente 7, Después de tomar la terapia de CMBF



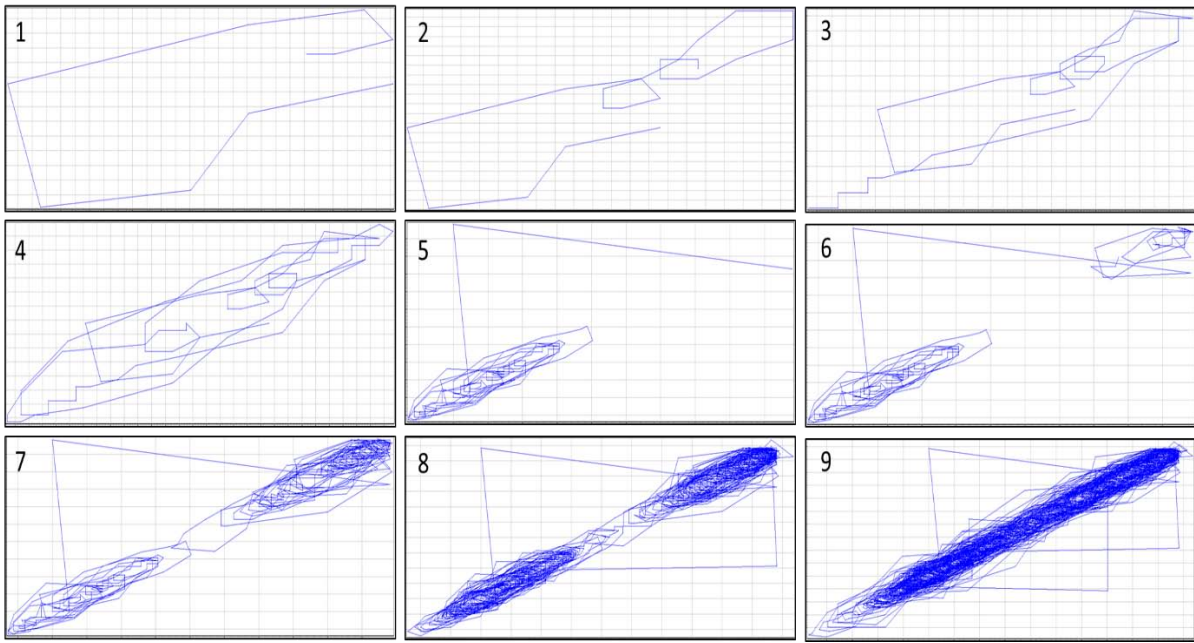
## **RESULTADOS DE LA EVOLUCIÓN DEL TRACTOR EXTRAÑO**



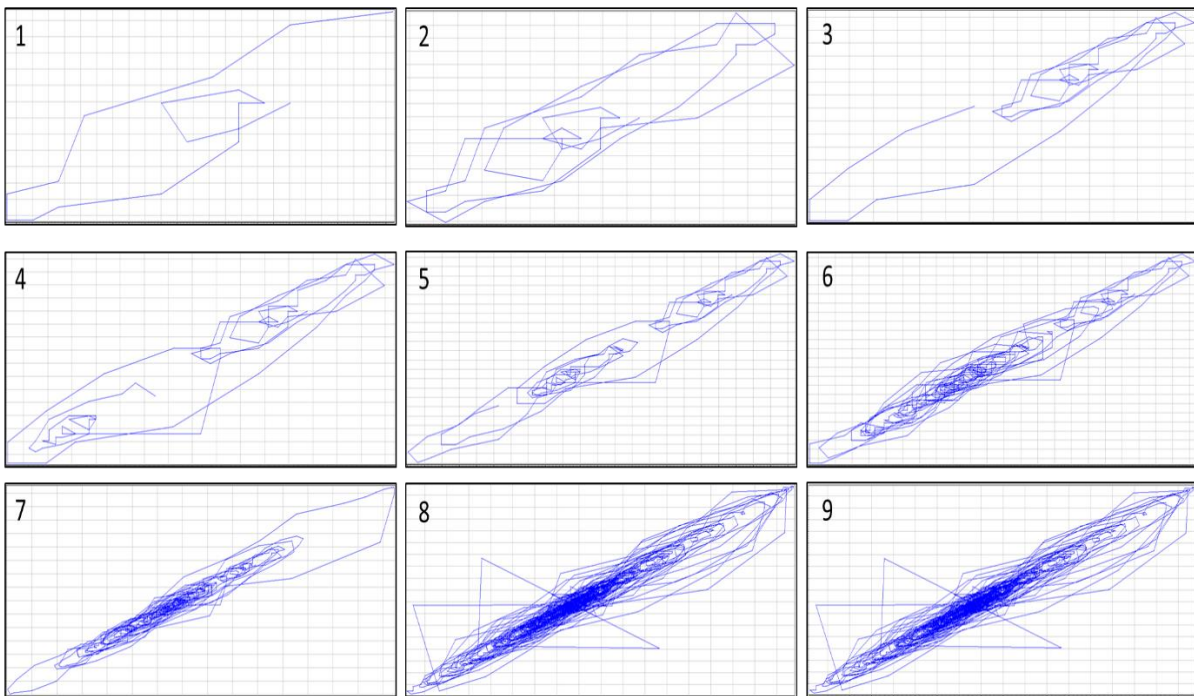
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 2, Antes de tomar la terapia de CMBF



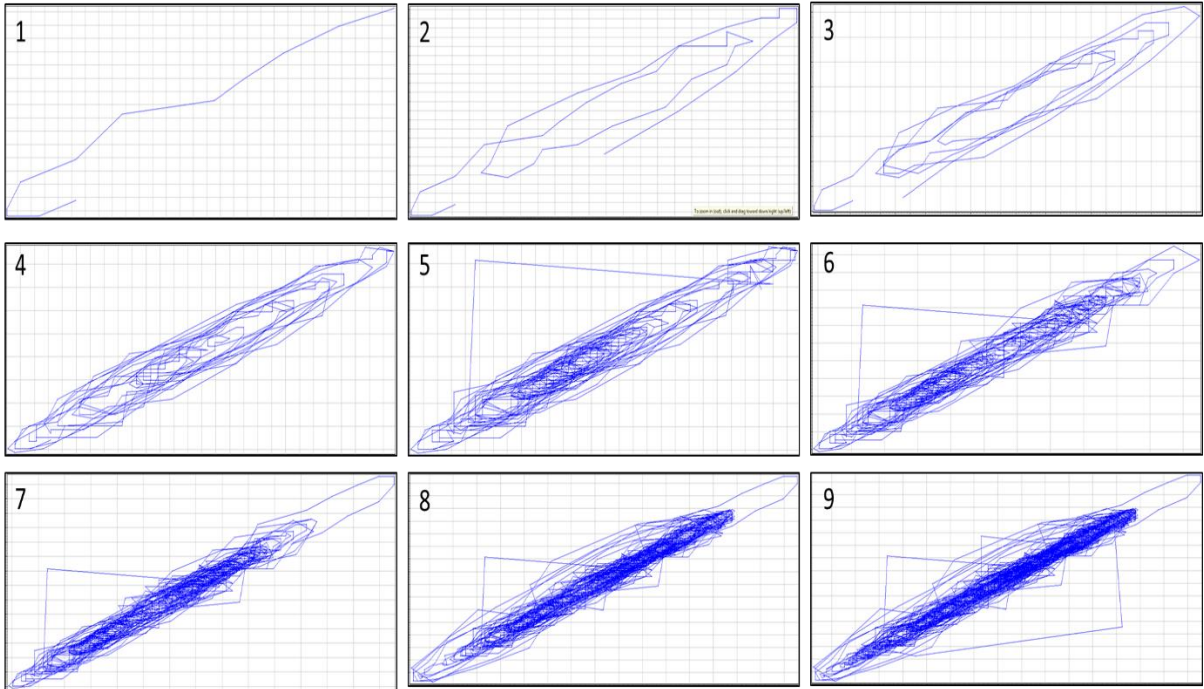
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 2, Después de tomar la terapia de CMBF



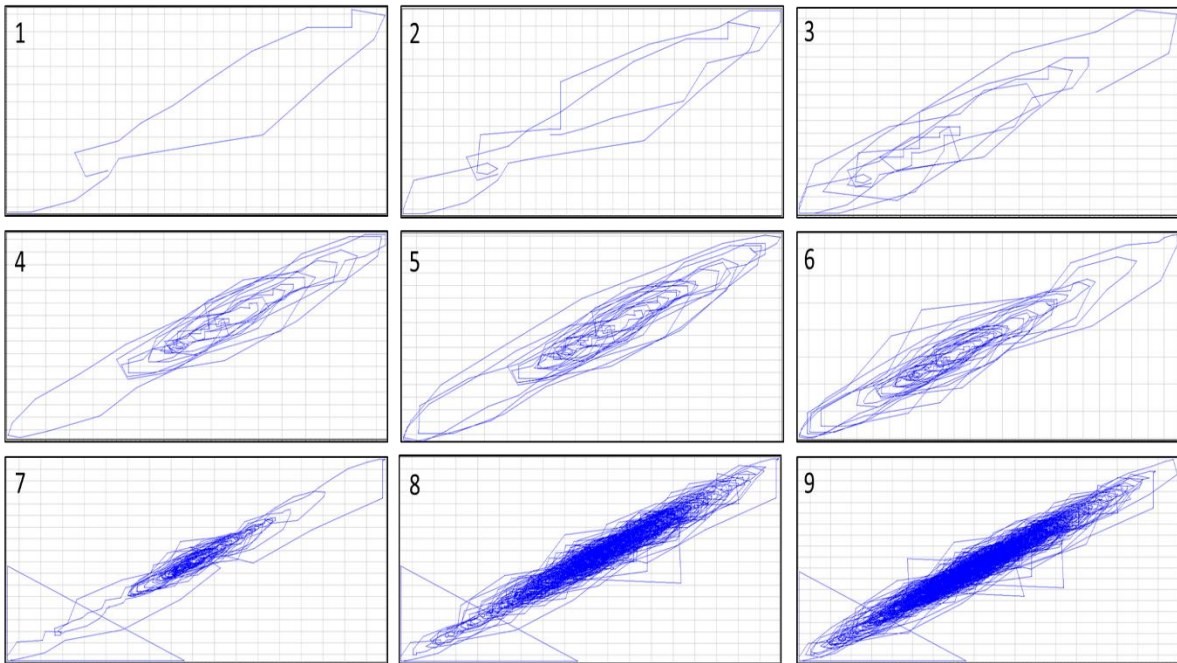
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 3, Antes de tomar la terapia de CMBF



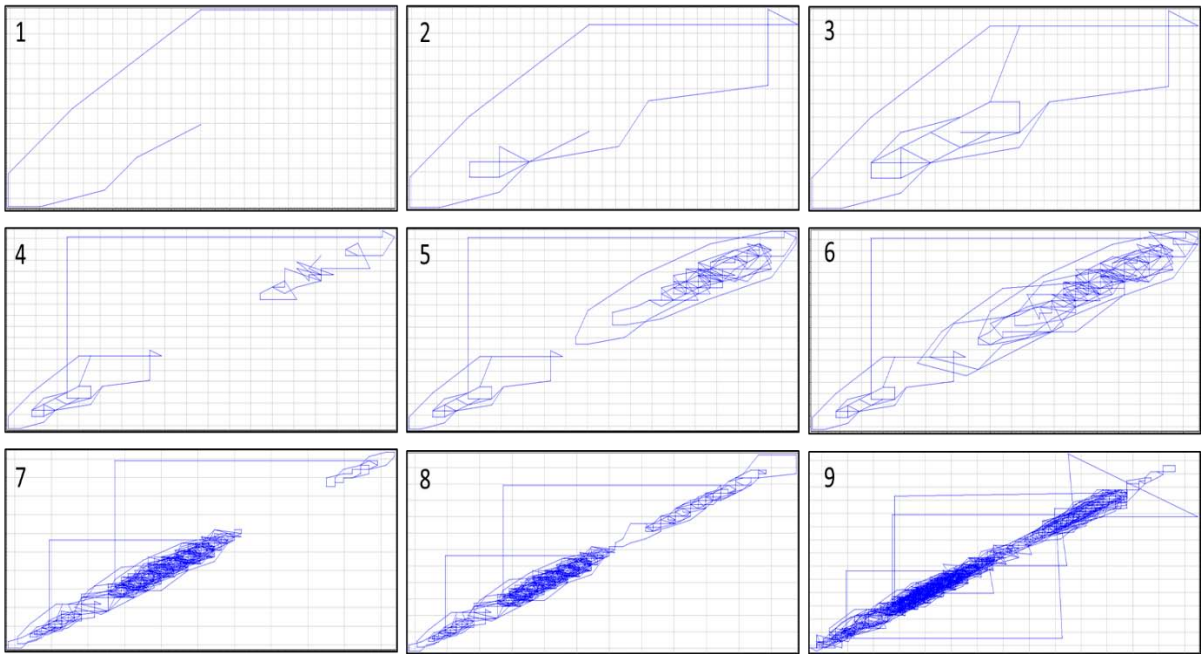
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 3, Después de tomar la terapia de CMBF



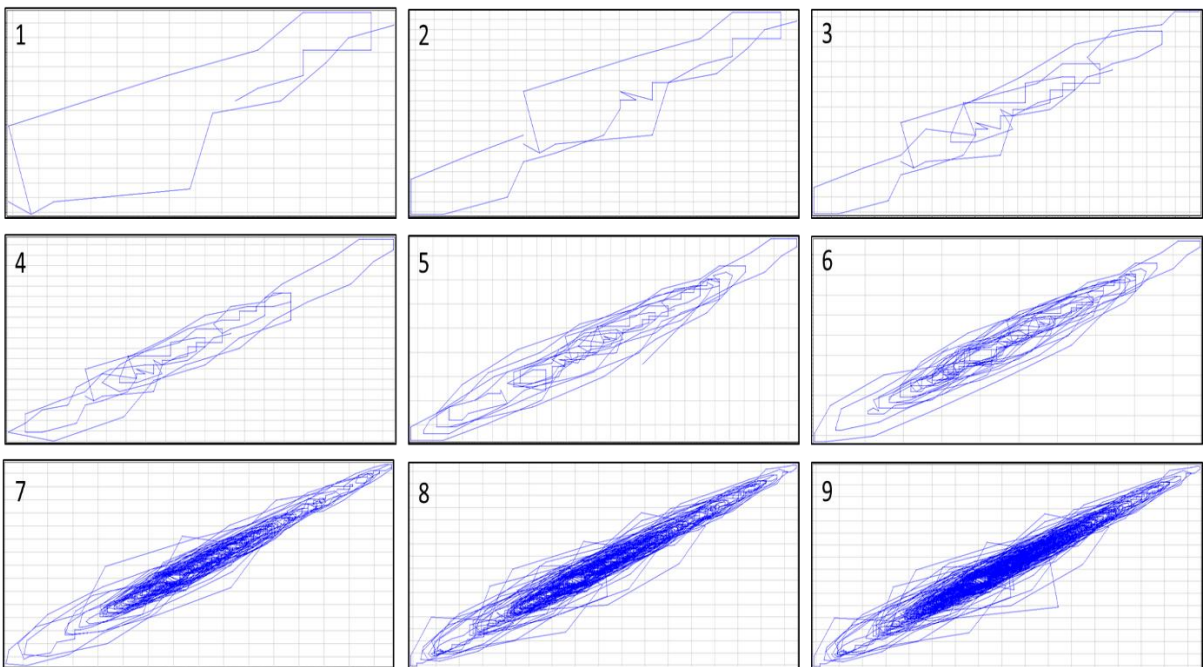
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 4, Antes de tomar la terapia de CMBF



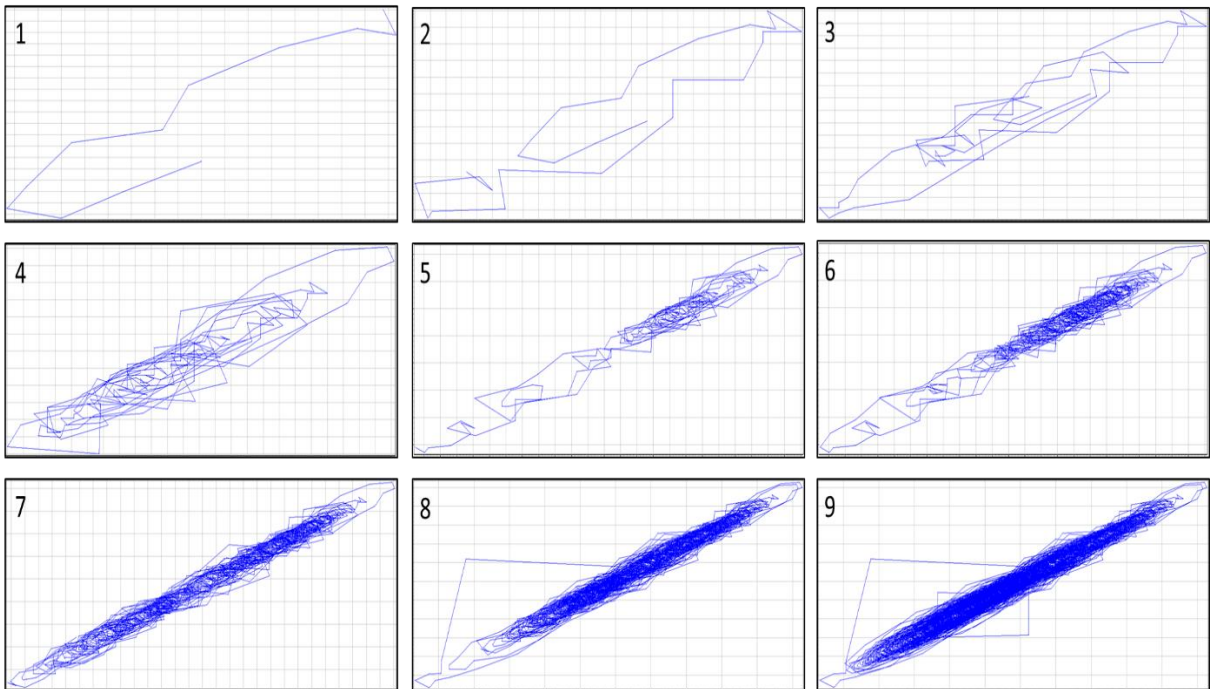
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 4, Después de tomar la terapia de CMBF



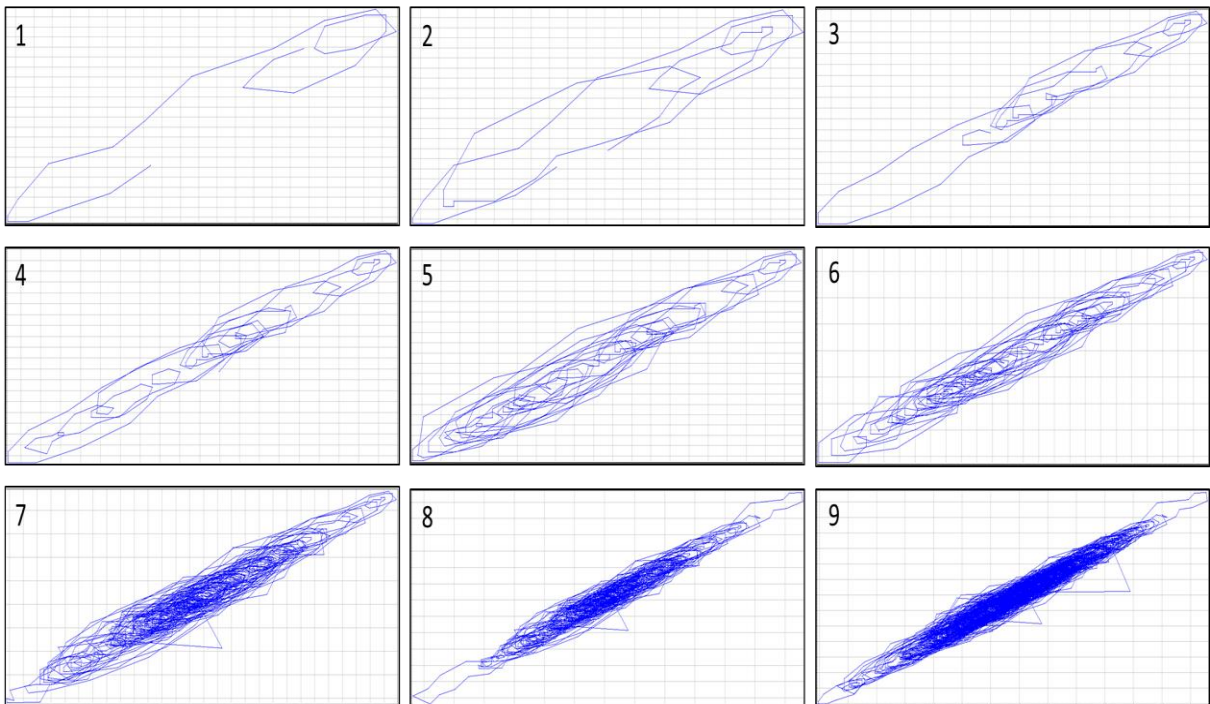
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 5, Antes de tomar la terapia de CMBF



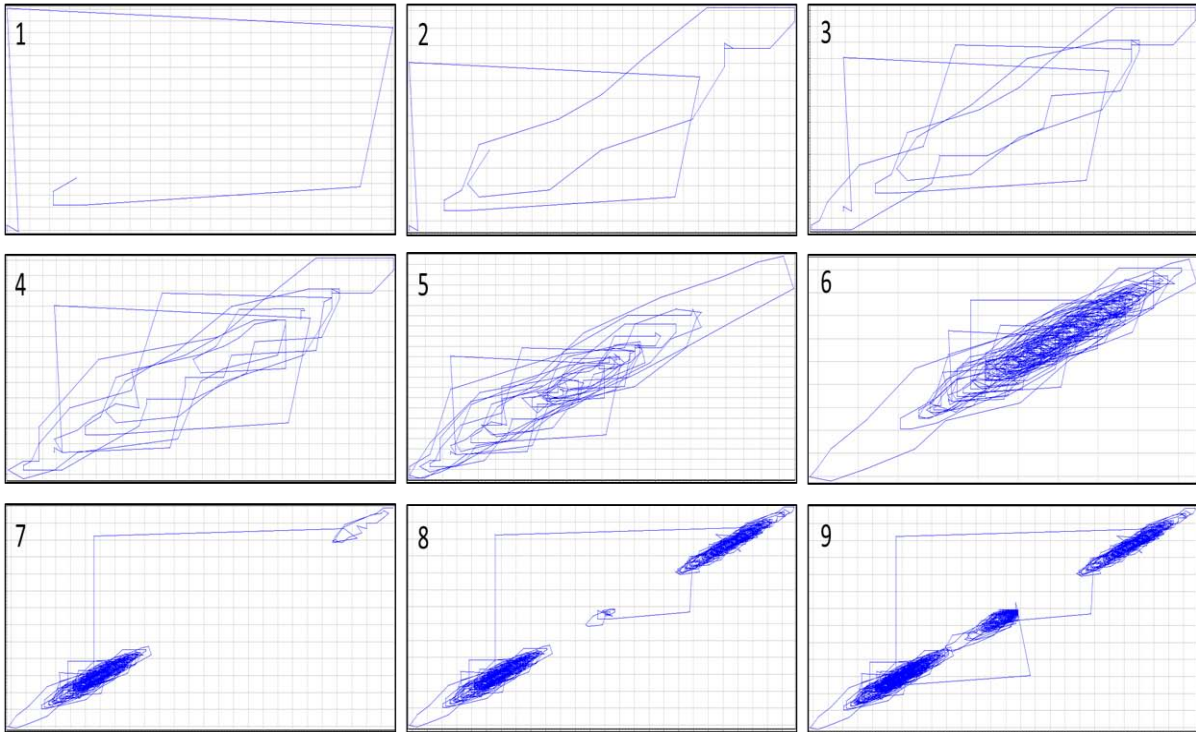
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 5, Después de tomar la terapia de CMBF



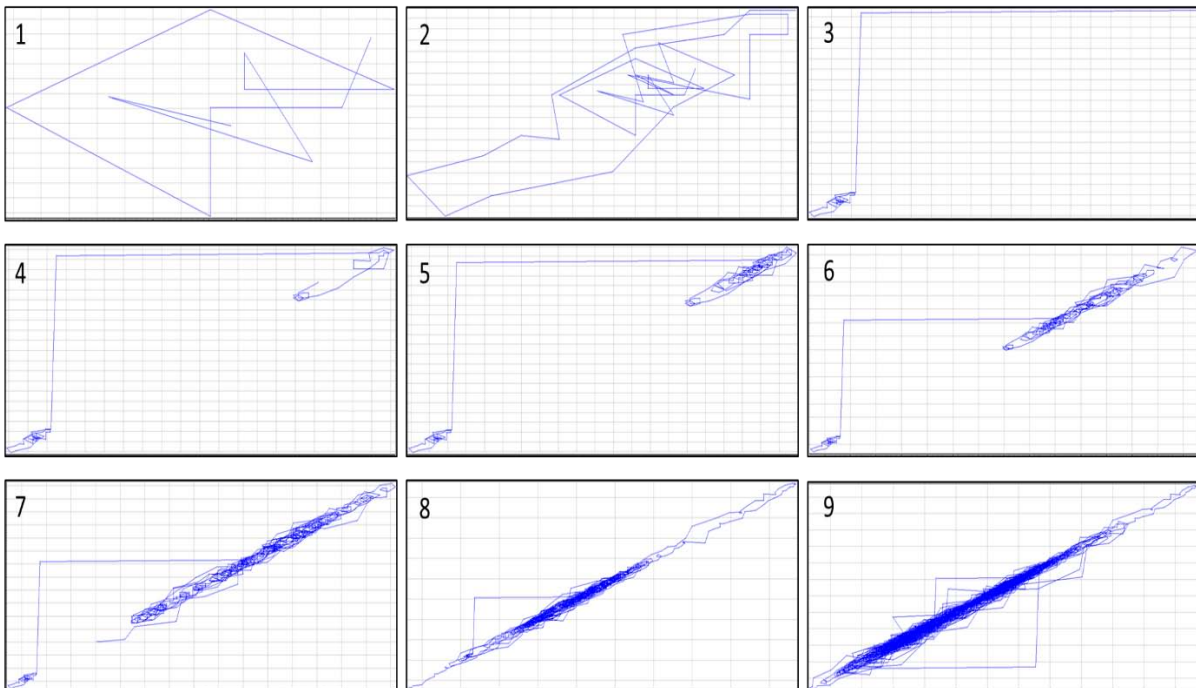
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 6, Antes de tomar la terapia de CMBF



Evolución de Atractor Extraño de Paciente 6, Después de tomar la terapia de CMBF



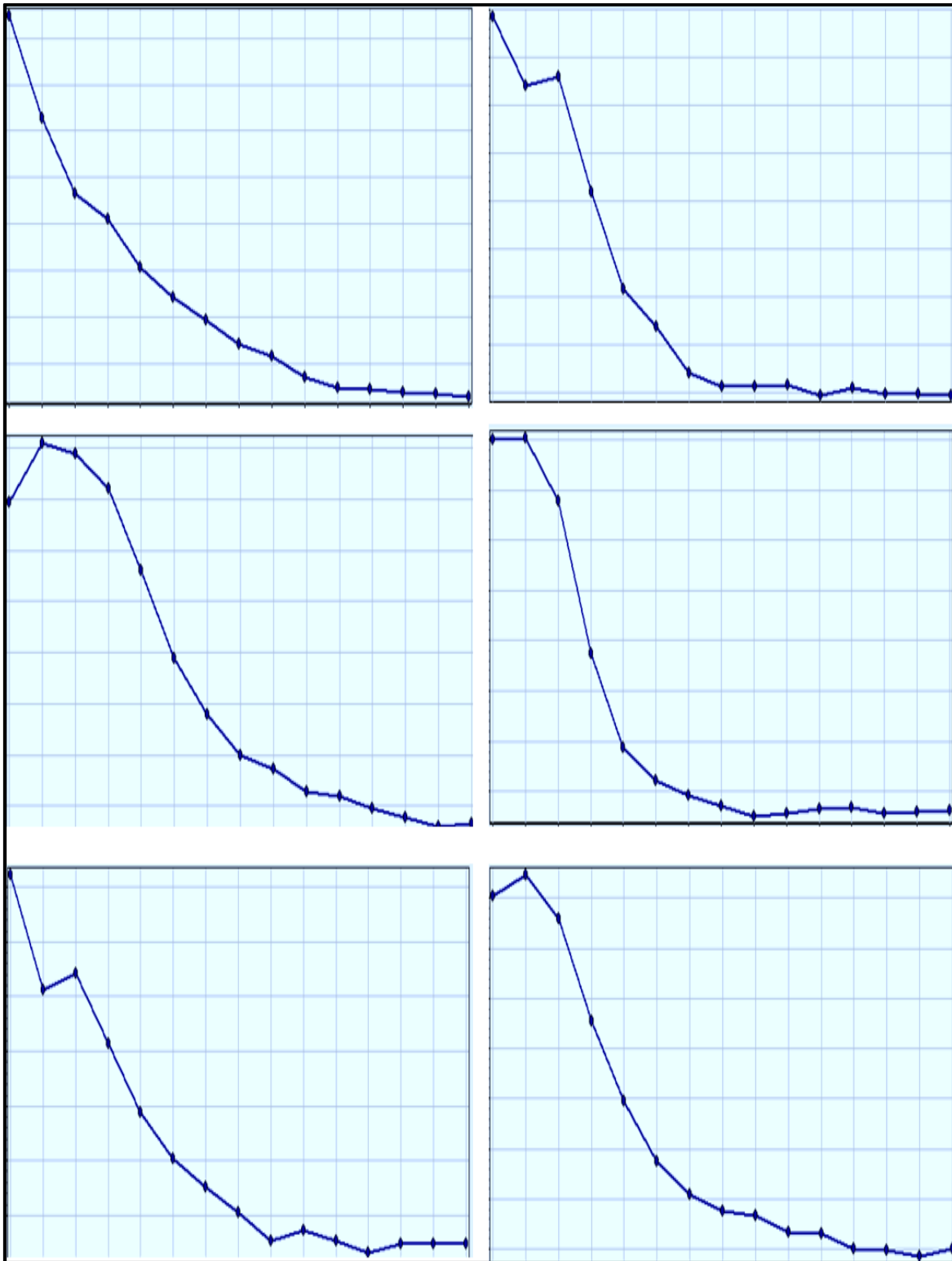
Evolución de Atractor Extraño de Paciente 7, Antes de tomar la terapia de CMBF



Evolución de Atractor Extraño de Paciente 7, Después de tomar la terapia de CMBF

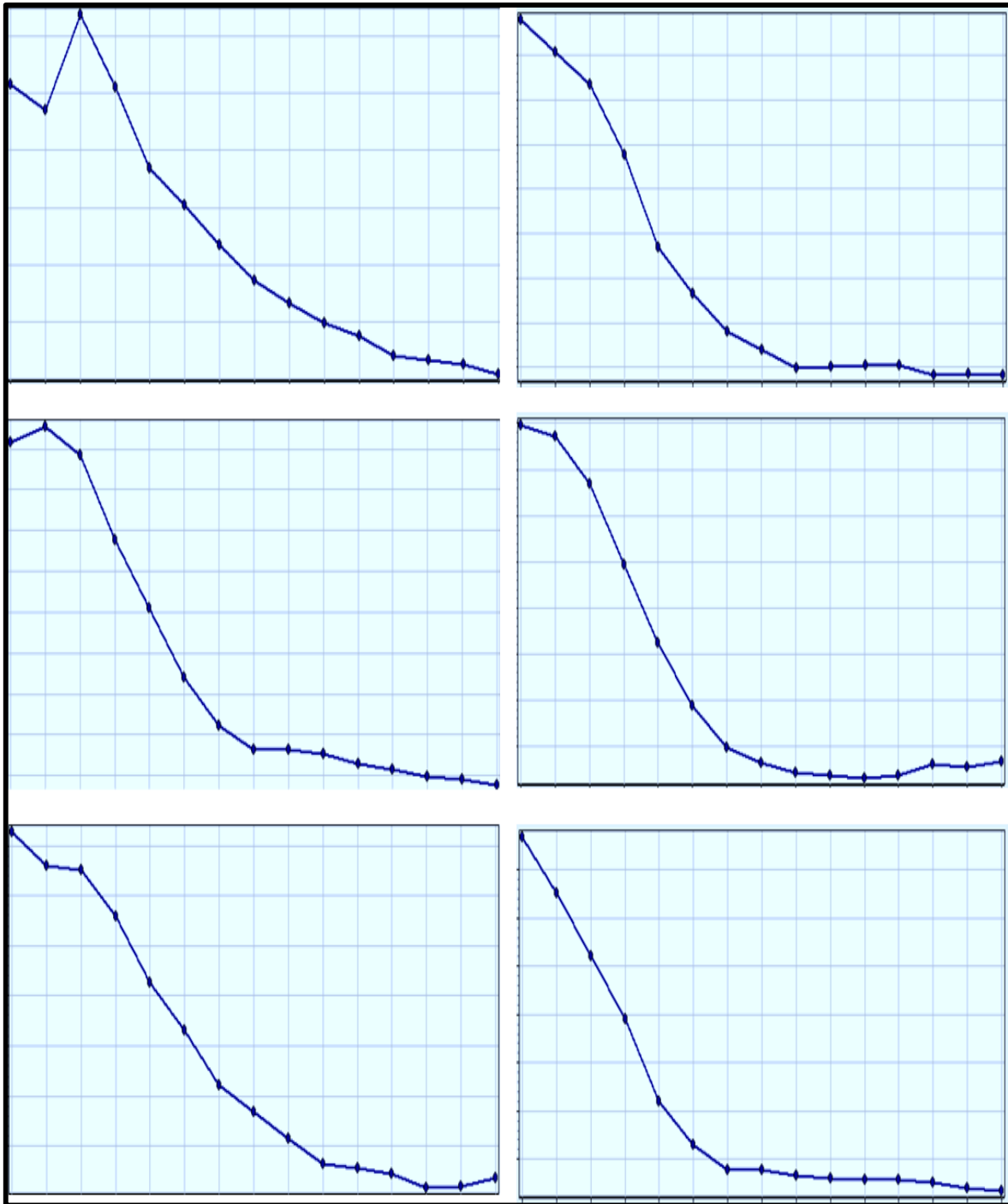


## **RESULTADOS FALSOS VECINOS CERCANOS**



Comparación de falsos vecinos cercanos de Pacientes 2, 3, 4, Antes y Después de tomar la terapia de CMBF





Comparación de falsos vecinos cercanos de Pacientes 5, 6, 7, Antes y Después de tomar la terapia de CMBF