



Universidad de Los Andes
Mérida - Venezuela

Departamento de Física

Área de Caos y Sistemas Complejos

**Análisis de la Dinámica No-lineal
de Señales Electroencefalográficas (EEG)**

Trabajo de grado presentado ante la ilustre

Universidad de Los Andes

como requisito parcial para optar al Título de:

Licenciado en Física

Presentado por:

Br. Miguel Ángel Escalona Morán

Tutor: **Dr. Pablo Guillén**

Co-Tutor: **Dr. Mario Cosenza**

Mérida, Abril del 2004

Los teóricos realizan los experimentos en sus cerebros, los experimentales utilizan, además, las manos. Aquellos son pensadores, y éstos artesanos. Aquellos no necesitan cómplices, éstos han de juntar estudiantes graduados, dar cabida a maquinistas y halagar a los ayudantes de laboratorio.

El teórico actúa en un lugar prístino, limpio de ruido, vibración y suciedad. El experimento desarrolla intimidad con la materia, como el escultor con la arcilla, batallando con ella, modelándola, estimulándola. El teórico inventa sus compañeros, como ingenuo Romeo que sueña su Julieta ideal. Los amores del experimentador son sudor, quejas y esperanza.

Al fin y al cabo, se necesitan mutuamente.

James Gleick; Chaos, Making a New Science.

*A mis padres: Mireya y Adán
Son ustedes mi más fuerte razón de ser.*

*Un obsequio no te pertenece, mientras no lo
hayas agradecido debidamente.*

Lord B. Powell, Escultismo para muchachos.

Agradecimientos

La culminación de esta tesis es el resultado no sólo de los siete u ocho meses de loca escritura de cientos de programas utilizando las estaciones de trabajo. La aventura comenzó hace poco mas de 5 años llenos de buenos y no tan buenos momentos. Años en los que me he cubierto de deudas, deudas de gratitud de las que he ido acumulando tantas que ahora me encuentro incapaz de corresponder a todas y he de declararme insolvente. Una vez leí una cita de *Alfred Tennyson*, un poeta inglés que muy sabiamente dijo: *Yo soy parte de todo aquello que he encontrado en mi camino*. Afortunadamente he tenido mucha suerte y en mi camino sólo he encontrado buenos compañeros, de estudios, de trabajo, de viaje,....., de vida.

Todo esto no hubiese sido posible si el *Dr. Pablo Guillén* y el *Dr. Mario Cosenza*, un par de desconocidos para mí hace un año, no me hubieran brindado la posibilidad de integrarme a un grupo interdisciplinario compuesto por las áreas de Bioingeniería e Imagenología Médica del Centro Nacional de Cálculo Científico (CeCalCULA), y el área de Caos y Sistemas Complejos del Centro de Astrofísica Teórica (CAT) de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (ULA), respectivamente. Caos sería lo que yo tendría en mi cabeza desde entonces, menos mal que –como se mostrará en este trabajo– eso es *positivo*. A estos dos doctores dudo que pueda en algún modo compensar el tiempo y la paciencia que me han dedicado, especialmente en estos últimos meses.

También quiero expresar desde aquí mi más profundo agradecimiento al *Profesor Braulio Fernández* por la amabilidad y el afecto con el que me integró al Laboratorio de Temperaturas Bajas (LTB), por su amistad, apoyo y por lo mucho que he

aprendido de él.

En Octubre de 2003 entré a trabajar activamente con *los caóticos*, que poco a poco se han ido convirtiendo en amigos y que serán difíciles de olvidar, el apoyo y el tiempo que de manera egoísta les he hecho gastar. A todos y cada uno les doy mis mas sinceras gracias: Hender, Juan Carlos, Carlos (*carlitos*), Javier (*el gallego*), Gilberto y los recién ingresados José Manuel y José Luis.

Quiero agradecer a mis compañeros de carrera que me han acompañado por el duro camino de la Física en estos años, quizás comprendan realmente el significado de la finalización de este trabajo. Como ellos, a Javier quien me ha acompañado en mis altibajos durante la elaboración de los programas. A mis compañeros de viaje en los congresos con quienes he disfrutado grandes momentos y quienes conmigo han vivido la emoción de ir alcanzando esta meta. Ustedes saben quienes son, y me quedaría sin hojas si los nombrase uno a uno.

A *Rebeca (beca)*, *Faviola (favisol)*, *Nadia (nadiviri)*, *Dayana (la negra)*, *Eduardo (don eduardo)*, *Bernardo (rayo)* y *Teobaldo (pipo)*; quienes de una manera discreta me han acompañado a lo largo de este logro, quienes conmigo han vivido la ilusión de los logros y el trago amargo del fracaso. Por sus palabras, por sus silencios, por sus compañías y simplemente por ser ustedes mismos.

A todas esas personas que me han hecho crecer como tal, que estando fuera del ámbito académico me han enseñado en mi carrera paralela de la vida, a quienes me han hecho madurar, a quienes me han hecho ser quien soy, a quienes me han hecho ser una persona capaz de llegar a afrontar un reto como éste y a quienes me dan aliento para continuar. A *José Alfredo* que con su serenidad y buen humor ha conseguido que el lado oscuro no lo fuera tanto.

Estoy seguro que se me queda un montón de gente en el tintero pero a estas alturas las palabras valen su peso en oro, así que envío mi mas sincero agradecimiento a ese tintero lleno de gente buena.

Con mi familia ya lo tengo mas fácil o quizás mas difícil, ella me sufre con la serena y gozosa confianza de quien se sabe beneficiario de una indulgencia plenaria, sin

ellos todo esto sería una quimera inalcanzable, gracias es lo menos y a la vez lo más que puedo decirles. Sobre todo a mi madre *Mireya* y mi padre *Adán*, por haberme apoyado desde aquel momento en que decidí romper con las opciones establecidas y dar un paso mas hacia lo que sería mi primer reto: poder estudiar Física en Mérida, luego de esto no encuentro –ni creo que existan– palabras para poder expresarles lo grandemente agradecido que me siento. A mis hermanas y sobrinos que han sido parte fundamental en mi vida.

No puedo continuar con este manuscrito sin mostrarle mi gratitud a la Universidad de Los Andes quien a través de sus profesores –como *Ibaníz Lozano*, *Héctor Rago*, *Cesar Mendoza*, *Kay Tucci*, *Nelson Pantoja*, *Mario Cosenza*, *Luís Nuñez* y *Pablo Guillén* – me ha brindado la educación que he requerido para alcanzar mi título. A la ciudad de Mérida por ser la mejor ciudad en la que un estudiante puede vivir en Venezuela. A CeCalCULA por la colaboración prestada con el espacio suministrado en los servidores Pegaso y Cronos, así como la ayuda brindada por los administradores y demás miembros del Centro. Al CAT por haberme brindado un espacio en sus instalaciones para desarrollar gran parte de esta investigación.

Al *Dr. Pedro Coutín* del Hospital San Juan de Dios de la ciudad de Mérida, por haber proveído la mayoría de las señales electroencefalográficas utilizadas en este trabajo y por prestar su colaboración en la evaluación del mismo. A la *Lic. Yolanda Morán* (mi tía), por todo el esfuerzo, las carreras, etc, pero sobre todo por el apoyo incondicional con el que me ha ayudado. Al *Dr. Francisco Villazan* del Hospital Luis Gómez López de la ciudad de Barquisimeto, por el apoyo prestado.

A todos, **GRACIAS**

Resumen

En este trabajo se investigan fenómenos de sincronización y formación de dominios dinámicos, así como el comportamiento colectivo en sistemas dinámicos acoplados. Se han usado osciladores de Rössler acoplados globalmente y se ha considerado al cerebro como un sistema dinámico acoplado. Se establece un estudio de la formación de dominios dinámicos o *clusters* en el sistema de Rössler, mediante una técnica de la dinámica no-lineal, donde se consigue una sincronización a través de la formación de clusters y dos parámetros de orden. Otros investigadores han usado el esquema de diferencia finita, para resolver el sistema de Rössler, mientras que en este trabajo se ha resuelto mediante el Método de Runge–Kutta de cuarto orden, encontrando resultados similares a los presentados por ellos. Se presenta una nueva técnica del análisis no-lineal, la cual permite caracterizar los cambios de complejidad que ocurren en las señales fisiológicas y permite extraer información oculta, la cual no puede ser obtenida con las técnicas clásicas del análisis lineal. Esta técnica se basa en la transformación de la señal fisiológica en un conjunto de índices, los cuales caracterizan los cambios de complejidad de la señal EEG. Una vez presentada y validada la técnica de dinámica no-lineal usada en esta tesis, se realiza un análisis de la sincronización y formación de *clusters* de las señales electroencefalográficas de sujetos sanos y pacientes epilépticos, lo cual evidencia cambios de la actividad cerebral en las señales EEG bajo estudio.

Índice General

Agradecimientos	i
Resumen	iv
Introducción	1
1 Introducción al Caos	5
2 Formación de Dominios Dinámicos Inducida por Ruido	9
2.1 Formación de <i>clusters</i> inducida por ruido	11
2.2 Formación de <i>clusters</i> respecto a ϵ	13
2.3 Parámetros de orden $r(t)$ y $s(t)$	14
3 Electroencefalografía y Patología Epiléptica	17
3.1 Examen Electroencefalográfico	18
3.1.1 Electroodos	19
3.1.2 Disposición de electrodos	19
3.2 Patología Epiléptica	21
4 Base de Datos Electroencefalográficos	24
4.1 Características de la obtención de las Señales EEG	24
4.2 Nomenclatura de las ondas del EEG	25
4.3 Descripción de las señales EEG de sujetos sanos	26
4.4 Descripción de las señales EEG de pacientes epilépticos	29
5 Análisis de los EEG	32
5.1 Análisis de señales EEG del grupo de sujetos sanos	32

5.2	Análisis de señales EEG del grupo de pacientes epilépticos	44
5.3	Discusión	56
	Conclusiones	59
	Bibliografía	62
A	Tabla de tiempos de las señales EEG	64
A.1	Señales del grupo de sujetos sanos	64
A.2	Señales del grupo de pacientes epilépticos	65
B	Glosario para físicos	66

Chaos has come again.

W. Shakespeare, Othello, III. 3.

Introducción

¿Es el mundo predecible? ¿Existe un orden oculto detrás de los torbellinos de la turbulencia? ¿Es estable el sistema solar? ¿Qué es el desorden?. La respuesta a estas preguntas, planteadas por los científicos desde hace mucho tiempo, ha sido motivo de profundas discusiones y, no obstante, se han derivado pocas conclusiones. Sin embargo, desde principios de los años 70, una nueva, revolucionaria y sorprendente solución apareció bajo el nombre de *caos*. Las consecuencias de este descubrimiento han sido enormes. Gran parte del desorden que nos rodea resultó ser sólo aparente. Detrás de él se oculta un orden que podemos llegar a traducir en modelos matemáticos simples, los cuales han modificado por completo la visión clásica de orden-desorden como conceptos opuestos.

El caos determinista es, sin embargo, sólo una pieza (aunque especialmente bien comprendida) de un enorme conjunto de nuevos conceptos que, genéricamente, se agrupan bajo lo que conocemos como *teoría de sistemas complejos*. La búsqueda de las leyes de lo complejo se ha convertido, desde el final del siglo XX, en el objetivo de estudiosos procedentes de campos muy diversos. Esta búsqueda ha sido muy difícil, pero en su curso se han generado nuevas teorías y modelos. Las redes neurales, los autómatas celulares, los objetos fractales o la criticalidad auto-organizada han permitido formular, de forma simple, las primeras hipótesis generales.

La interdisciplinariedad y el campo emergente de la dinámica no-lineal, ofrecen nuevas estrategias y paradigmas para la comprensión de sistemas complejos tales como el cerebro humano. Lentamente, pero de manera segura, la visión de los sis-

temas complejos es disminuir la brecha que existe entre lo que un elemento hace y lo que muchos de ellos hacen cuando éstos realizan funciones en conjunto. La misión de la neurociencia, desde un principio, ha sido tratar a una neurona igual que a grupos neuronales. La neurociencia debe ahora estar apoyada con nuevas ideas matemáticas, estrategias de investigación y herramientas computacionales. De esta idea, en todo el mundo están naciendo grupos de jóvenes investigadores de diferentes disciplinas para crear una nueva ciencia que llevará como nombre *Neurodinámica*. Esta ciencia será teóricamente orientada, matemáticamente sofisticada y computacionalmente asistida, y brindará nuevas formas de pensar en el campo teórico-experimental.

Sin duda alguna, el cerebro es la estructura más compleja que conocemos. Diez mil millones de neuronas forman la materia prima de este "*órgano de la mente*". A lo largo de la evolución, los primeros sistemas neurales simples, constituidos por unas pocas neuronas, fueron modificándose, aumentando en tamaño y complejidad. Con la aparición de mayores estructuras, la percepción del mundo externo fue acompañada por un procesamiento cada vez más refinado y a menudo constituido por varias etapas. Al explorar a escala celular, descubrimos un sistema de notable sofisticación.

El cerebro es un buen ejemplo de cómo la información se procesa a distintas escalas. Las señales enviadas por una neurona a sus vecinas con las que conecta (de decenas a miles) pueden propagarse a distintas escalas hasta dar lugar a patrones macroscópicos. El registro temporal que caracteriza el llamado *electroencefalograma* (EEG), nos da una clara idea de la existencia de elementos de coherencia junto a pautas desordenadas. Esta coherencia a gran escala nos recuerda que incluso en sistemas de gran complejidad, donde los elementos son en sí mismos estructuras complejas (como las neuronas) pueden aparecer estructuras macroscópicas regulares que implican la auto-organización coherente de centenares de miles de unidades básicas [1].

En este trabajo se presenta una técnica de la dinámica no-lineal, que permite caracterizar; el efecto del ruido sobre osciladores caóticos acoplados globalmente, así como también, el grado de sincronización que experimentan los osciladores. Seguidamente, esta técnica es utilizada para analizar señales EEG de sujetos sanos y pa-

cientes epilépticos, la cual permite la obtención de unos índices que cuantifican los cambios de complejidad de la actividad cerebral entre sujetos sanos y el grupo de pacientes epilépticos.

A continuación, se describe el contenido de esta tesis.

En el Capítulo 1, se presenta una introducción muy breve a la Teoría del Caos, donde se explican ciertos conceptos y cómo, desde hace ya varios años, el caos ha sido una buena alternativa para estudiar al cerebro humano.

En el Capítulo 2, se realiza un estudio de la formación de dominios dinámicos inducida por ruido. Aquí se introduce la noción de sincronización de sistemas caóticos y se realiza una descripción detallada del sistema estudiado. Entre los estudios realizados están la formación de dominios dinámicos inducida por ruido, la cantidad de *clusters* formados para diferentes valores de la intensidad de acoplamiento y un estudio de la sincronización por medio de dos parámetros de orden.

En el Capítulo 3, se presenta una discusión sobre la consideración del cerebro como un sistema no-lineal. Además, se encuentra una descripción de la práctica del examen de onda cerebral, así como una descripción de los electrodos usados y la disposición sistemática de los mismos sobre el cuero cabelludo según el sistema 10-20. Por otra parte, se presenta la definición de una patología epiléptica, de como se clasifican, quienes las padecen y su diagnóstico.

Una vez presentada y validada la técnica de dinámica no-lineal usada en esta tesis, se realiza un análisis de la sincronización y formación de *clusters* de las señales electroencefalográficas de sujetos sanos y pacientes epilépticos, lo cual evidencia cambios de la actividad cerebral en las señales EEG bajo estudio.

En el Capítulo 4, Se presenta una descripción de la base de datos utilizada en esta tesis, así como la descripción de las señales EEG de sujetos sanos y pacientes patológicos.

En el Capítulo 5, se realiza el análisis de la base de datos de las señales EEG descrita en el capítulo anterior, y se presenta una discusión de los resultados obtenidos

con la técnica de dinámica no-lineal empleada.

Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo.

*Antes del comienzo de un gran brillo,
debe existir caos.*

I Ching, Imagen # 3.

Capítulo 1

Introducción al Caos

La ciencia clásica termina donde el caos comienza. Mientras los físicos indagaron las leyes naturales, el mundo padeció de una ignorancia especial en lo que concierne a los desórdenes de la atmósfera y del mar; a las fluctuaciones de poblaciones de animales y plantas; y las oscilaciones del corazón y el cerebro. El comportamiento irregular de la naturaleza, su parte discontinua y variable, ha sido un rompecabezas a los ojos de la ciencia.

El término *Caos* ha aparecido cada vez con más frecuencia en la literatura científica ya que esta nueva teoría ha nacido con ciertas ventajas con respecto a la relatividad y a la mecánica cuántica. Los fenómenos supuestamente caóticos suelen poder verse y apreciarse sin necesidad de telescopios ni microscopios, y pueden registrarse sin cámaras de alta velocidad o con exposición. El caos se encuentra tanto en sucesos cotidianos como la caída de una hoja o el ondear de una bandera, como en otros tan complejos como las fluctuaciones climáticas, las trayectorias de los cometas o la evolución del propio sistema solar [2]. Tal comportamiento ha sido encontrado, por ejemplo, en células cardíacas periódicamente estimuladas, en señales eléctricas provenientes del cerebro, en circuitos electrónicos [3, 4], en el principio de turbulencia, en reacciones químicas, en láser, etc. . .

La teoría del caos se caracteriza por la descripción matemática del comportamiento, en extremo complejo y previsible sólo dentro de unos horizontes tempo-

rales limitados, de sistemas físicos que en apariencia pueden parecer muy simples. El movimiento caótico aparece cuando divergencias exponenciales locales en la trayectoria están acompañadas de un confinamiento global en el espacio de fases. La divergencia produce un alargamiento local del espacio de fases pero, a causa del confinamiento, esta dilatación no puede continuar sin plegarse; repetidos plegamientos y redoblamientos producen un comportamiento muy complicado, conocido como comportamiento caótico.

El nombre de *caos* y el adjetivo *caótico* son usados para describir el comportamiento temporal de un sistema cuando dicho comportamiento es aperiódico y aparentemente aleatorio o ruidoso. La palabra clave es “aparentemente”. Bajo esta aparente aleatoriedad caótica subyace un determinado orden, dado por las ecuaciones que describen el sistema.

En general, hacen falta tres ingredientes para determinar el comportamiento de un sistema. Estos ingredientes son las ecuaciones de evolución temporal, los valores de los parámetros que describen el sistema y por último las condiciones iniciales.

Los requerimientos para que un comportamiento se considere caótico son la intersección de diferentes trayectorias, el confinamiento de las mismas y la divergencia exponencial de trayectorias cercanas. Dado que una de las manifestaciones más características del comportamiento caótico es su sensibilidad a cambios en las condiciones iniciales del sistema, es lógico buscar la forma de medir el grado de sensibilidad de trayectorias vecinas a perturbaciones en sus condiciones iniciales, con vistas a caracterizar la caoticidad de un sistema.

La noción de divergencia exponencial de órbitas cercanas es formalizada con la introducción de los exponentes de Lyapunov. Dadas dos órbitas cercanas de un atractor empezando en el instante $t=0$, y con una separación d_0 , a lo largo del tiempo las trayectorias divergirán de modo que su separación en el instante t , (dada por $d(t)$), satisfaga la expresión:

$$d(t) = d_0 e^{\lambda t} \tag{1.1}$$

Si el parámetro λ , llamado exponente de Lyapunov, es positivo entonces la trayec-

toria será caótica. El exponente de Lyapunov puede ser considerado como una medida de la atracción o repulsión desde un punto fijo en el espacio de fases. También se podría aplicar esta noción o idea a la divergencia de trayectorias cercanas, en general, a cualquier punto en el espacio de fases.

La teoría del caos se alza con un doble rostro que participaría, por un lado, de las aproximaciones clásicas y, por otro lado, de las perspectivas complejas de investigación. Esta dualidad no es otra que la dada por el determinismo y la impredeción. Tradicionalmente, para la ciencia clásica, si se puede determinar en un instante dado, uno de los estados del sistema que se pretende investigar y conocer la ley que rige la evolución de ese sistema, se podrá entonces predecir el comportamiento, la posición futura y cualquiera de las anteriores posiciones pasadas del mismo. En la actualidad, ni siquiera acerca de lo que está determinado puede garantizarse la posibilidad de que sea previsible. La teoría del caos ha terminado con esta conexión, que los sistemas caóticos son deterministas y en este sentido son clásicos: se conoce tan precisamente como se quiera la secuencia que les da origen, la ley que rige su evolución y, sin embargo, son impredecibles dada su sensibilidad a las condiciones iniciales y en este aspecto, muestran su carácter complejo.

Con frecuencia el comportamiento caótico se ha visto como una conducta perjudicial e indeseable. Desde este punto de vista nos encontramos con ejemplos de caos en fisiología, tales como las arritmias cardíacas y respiratorias [5]. En este caso, se buscará suprimir este comportamiento mediante diversas técnicas de control [6]. Pero no siempre esto es así, los sistemas caóticos también pueden exhibir aplicaciones potenciales en procesado de señales no lineales y en computación neuronal [7, 8, 9].

En los últimos años han surgido nuevos descubrimientos sobre el comportamiento de procesos perceptivos como un sistema caótico, de forma que, el abandono de dicha conducta caótica constituye la pérdida fisiopatológica de las posibilidades adaptativas del sistema. Según estos autores [10, 11], en el sistema neuronal el proceso de cambio de estado que conduce a un dominio caótico es esencial para prevenir convergencias a patrones previamente aprendidos y facilitar así el reconocimiento de nuevos estímulos. También se puede considerar que el comportamiento caótico puede ser

bastante útil en ciertos mecanismos fisiológicos en los que el comportamiento regular puede ser perjudicial, tal es el caso de los temblores musculares producidos por una activación periódica de las unidades motoras o de los ataques epilépticos en los que el electroencefalograma, llega a ser periódico y regular [10].

Por éstas y otras muchas aplicaciones, aún en desarrollo, han surgido, y siguen surgiendo, numerosas investigaciones en la búsqueda del control y la comprensión del comportamiento caótico, bien para suprimirlo o activarlo, abriéndose un nuevo camino en el estudio de la física, lejos del orden y la predicción newtoniana.

*Lo que llamamos casualidad no es, ni puede ser,
sino la causa ignorada de un efecto desconocido.*

Voltaire.

Capítulo 2

Formación de Dominios Dinámicos Inducida por Ruido

Después de que Yamada y Fujisaka lo predijeran en su artículo publicado en 1983 [12], y Pecora y Carroll en 1990 [13] demostraran experimentalmente que dos comportamientos caóticos aparentemente aleatorios e imprevisibles pueden constituirse en una única trayectoria, nuevas expectativas han surgido en torno a la teoría del caos. La idea que subyace bajo el fenómeno de sincronización es que dos sistemas caóticos, que inicialmente evolucionan sobre atractores diferentes, al acoplarse de algún modo, finalmente siguen una trayectoria común. El hecho de que osciladores caóticos globalmente acoplados pueden llegar a sincronizarse cuando la intensidad de acoplamiento supera un cierto valor [14] da origen a esta investigación numérica de los efectos del ruido sobre osciladores de Rössler globalmente acoplados. En este trabajo, se ha estudiado una población de $N=1000$ osciladores acoplados globalmente. El modelo viene descrito por el siguiente sistema de ecuaciones [15]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= -y_i - z_i + \epsilon(\bar{x} - x_i) + \xi_i(t) \\ \dot{y}_i &= x_i + ay_i + \epsilon(\bar{y} - y_i) \\ \dot{z}_i &= b - cz_i + x_iz_i + \epsilon(\bar{z} - z_i)\end{aligned}\tag{2.1}$$

con $i=1, \dots, N$, donde ξ_i son ruidos cuyo valor medio es $\langle \xi_i \rangle = 0$ y que cumple con una correlación $\langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = 2S\delta(t-t')\delta_{ij}$, donde S es la dispersión del ruido.

El parámetro ϵ en estas ecuaciones representa la intensidad de acoplamiento global entre los osciladores, y

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j(t) \quad (2.2)$$

con expresiones similares para \bar{y} y \bar{z} . Los valores de los parámetros a, b y c son elegidos de forma tal, que los osciladores individuales se encuentran en régimen caótico, esto es, $a=b=0.2$ y $c=4.5$ [16].

Se define un dominio dinámico o *cluster*, como un subconjunto de la población de osciladores, tal que, las distancias en pares de elementos distintos, pertenecientes a este subconjunto, sean menor que un cierto valor umbral γ , esto es, $d_{ij} < \gamma$. La misma definición de *cluster* fue usada para mapas logísticos de redes aleatoriamente acopladas [17].

La formación de dominios dinámicos puede ser caracterizada por la frecuencia de distancias en pares entre elementos, la cual se define como:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2.3)$$

Para llevar a cabo el estudio de la sincronización y formación de *clusters* propuesto, se desarrolló un código en lenguaje **Fortran90**, el cual, soluciona el sistema descrito por las ecuaciones (2.1) haciendo uso del método de Runge–Kutta de cuarto orden, con un incremento de tiempo $\Delta t=10^{-2}$.

Para preparar las condiciones iniciales del sistema, se le permitió a éste evolucionar hasta $t=1000$ sin acoplamiento ni ruido, tal que los osciladores estuvieran distribuidos uniformemente sobre el atractor de Rössler [Figura (2.1)]. Luego de obtener las condiciones iniciales para cada uno de los 1000 sistemas, el tiempo es inicializado a cero y se activa el acoplamiento y el ruido. Al sistema se le permite evolucionar hasta $t=5000$. El ruido es aplicado en cada paso de tiempo del cálculo numérico, a través de la adición, a la variable x_i de un número aleatorio η_i , que se encuentra dentro del intervalo $[-\eta_0, \eta_0]$. La amplitud η_0 y la dispersión S del ruido están relacionadas por $S=\eta_0^2/6\Delta t$ [15].

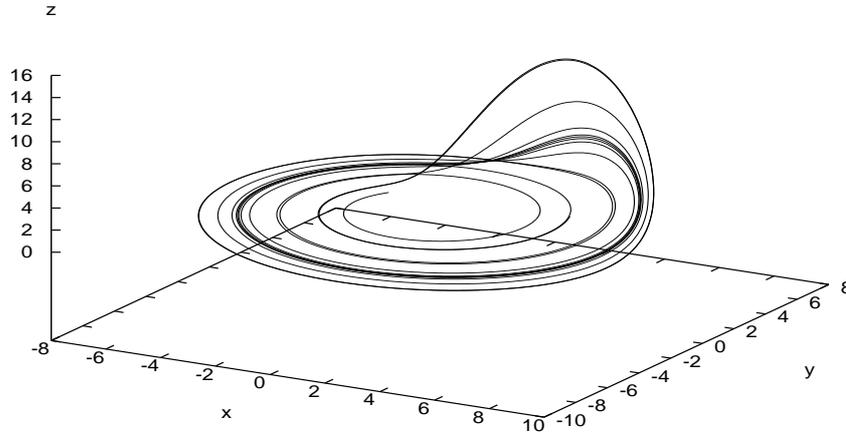


Figura 2.1: *Atractor de Rössler con parámetros $a=b=0.2$ y $c=4.5$.*

El ruido determina el límite inferior para la elección del valor umbral γ . Si las fluctuaciones introducidas por el ruido en el tamaño de los *clusters* son mayores que el valor γ , la comparación de las distancias en pares con el valor umbral falla al proveer información sobre la estructura real de la formación de dominios dinámicos en la población de osciladores de Rössler. En la práctica, para valores de γ muy pequeños se observan variaciones irregulares en los parámetros de orden (Sección 2.3). Para la amplitud de ruido considerada en las siguientes secciones, el límite inferior para γ está alrededor de 10^{-4} . Por otro lado, si $\gamma > 10^{-1}$, los parámetros de orden son estacionarios para tiempos muy grandes, pero experimentan una dependencia considerable en γ . Entonces, para $10^{-4} < \gamma < 10^{-1}$, los parámetros de orden r y s adquieren valores estacionarios prácticamente independientes de γ , por lo que la formación de *clusters* está bien definida. Esto justifica nuestra elección de $\gamma = 10^{-3}$.

2.1 Formación de *clusters* inducida por ruido

Para el análisis de la formación de *clusters* se ha investigado la influencia del ruido con una dispersión $S=10^{-2}$. La Figura (2.2) muestra la distribución normalizada

de pares de distancias al tiempo $t=5000$, para diferentes valores de la intensidad de acoplamiento. Las distribuciones están graficadas como histogramas de 80-columnas en el intervalo de distancias $[0,16]$.

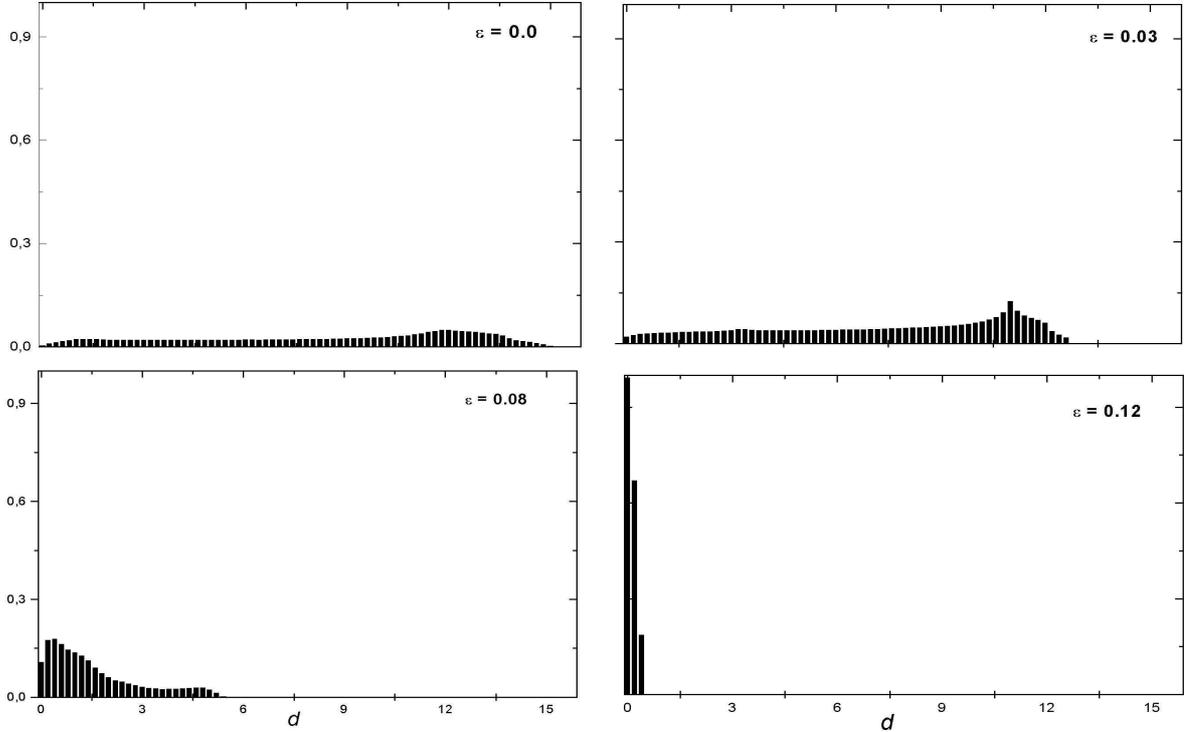


Figura 2.2: *Histogramas de la distribución normalizada de distancias en pares entre elementos inducida por ruido a un tiempo $t=5000$, para varios valores de intensidad de acoplamiento.*

En la Figura (2.2) se puede observar que en ausencia de acoplamiento ($\epsilon=0$) los osciladores independientes evolucionan sobre el atractor de Rössler, por lo que las distancias entre pares de elementos se encuentran distribuidas sobre un amplio rango, con una leve preferencia en el intervalo $[10,13]$. Si se aumenta un poco la intensidad de acoplamiento ($\epsilon=0.03$) se observan ligeros cambios en la estructura, la mayor columna corresponde a una distancia de 11 unidades. Para una intensidad de acoplamiento mayor ($\epsilon=0.08$) se encuentra una distribución poco uniforme, con distancias sustancialmente pequeñas; una fracción considerable de distancias se encuentra muy cercana a $d=0.02$. Para $\epsilon=0.12$, el histograma está formado por pocas líneas, indicando que la población de osciladores está dividida en *clusters*: tres en

este caso; esto nos quiere decir que la población de osciladores se ha dividido en tres grupos sincronizados muy cercanos unos de otros. Estos histogramas varían dependiendo del tiempo de evolución del sistema, así como de la magnitud de la dispersión del ruido aplicado.

2.2 Formación de *clusters* respecto a ϵ

El número de *clusters* a tiempos muy grandes es altamente dependiente de las condiciones iniciales del sistema [15]. En la Figura (2.3) se muestra el número de *clusters* formados a un tiempo $t=5000$ para varios valores de la intensidad de acoplamiento.

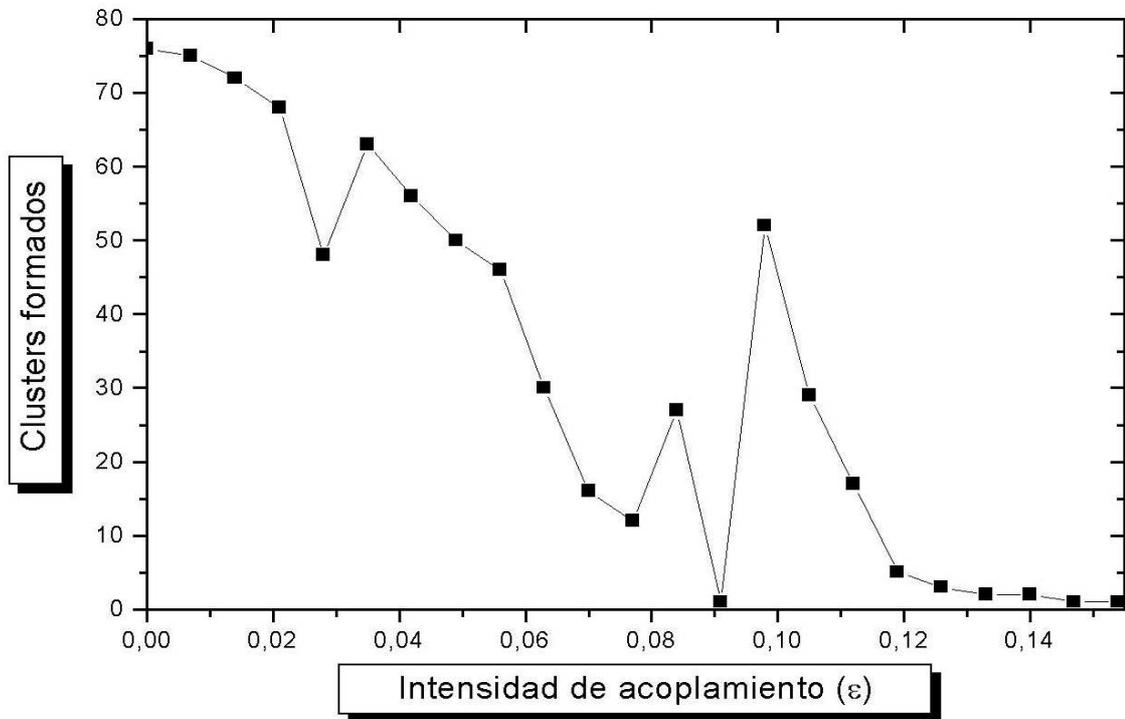


Figura 2.3: *Número de clusters formados, contados en $t=5000$.*

En la Figura (2.3) se puede observar que para valores muy pequeños de la intensidad de acoplamiento, $\epsilon < 0.02$, mas de 60 *clusters* son detectados, reportando así el valor máximo encontrado. Luego, se encuentra una zona ($0.02 < \epsilon < 0.035$) donde el número de *clusters* decrece y aumenta rápidamente. A partir de $\epsilon > 0.035$ se observa

que el número de *clusters* decrece de manera suave lo que nos indica que el sistema se está sincronizando. Sin embargo, se encuentra un intervalo de intensidades de acoplamiento donde aumenta repentinamente la cantidad de *clusters* y luego, cuando $\epsilon=0.091$, el sistema comienza a sincronizarse hasta formarse tan sólo un *cluster*. Para una intensidad de acoplamiento ligeramente mayor, se tiene que el sistema de osciladores rompe con esta sincronización y llega a formar 52 *clusters*. A partir de esta intensidad de acoplamiento el sistema intenta nuevamente sincronizarse. Luego de $\epsilon=0.12$ el sistema se encuentra en un régimen donde la formación de dominios dinámicos y la casi sincronización total coexisten como posibles atractores. Finalmente, para $\epsilon > 0.13$ únicamente un *clusters* es observado a lo largo del tiempo.

Un escenario similar se puede encontrar en el estudio de los parámetros de orden r y s , definidos ambos –en la siguiente sección– como una función de la intensidad de acoplamiento.

2.3 Parámetros de orden $r(t)$ y $s(t)$

Cercano al punto de formación de dominios dinámicos (llamado también *transición de condensación* en [18]) sólo una pequeña fracción de elementos se encuentran formando *clusters*, mientras que el resto de los elementos se encuentran dispersos entre sí. Para medir la extensión de la formación de dominios dinámicos, se introducen dos parámetros de orden [17, 18, 19]. El primero de ellos, $r(t)$, está dado por la fracción de pares de elementos (i,j) que en un tiempo t están separados una distancia $d_{ij}(t) < \gamma$. Esto es:

$$r(t) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Theta[\gamma - d_{ij}], \quad (2.4)$$

donde $\Theta(x)$ es la función escalón, tal que $\Theta(x)=0$ para $x < 0$ y $\Theta(x)=1$ en caso contrario. El segundo parámetro de orden, $s(t)$, es la fracción de elementos i que en un tiempo t tienen al menos un elemento j localizado a una distancia $d_{ij}(t) < \gamma$. Este puede ser expresado como:

$$s(t) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \prod_{j=1, j \neq i}^N \Theta[d_{ij} - \gamma], \quad (2.5)$$

el último término de la ecuación (2.5) es la fracción de elementos que no tienen ningún otro elemento dentro de una esfera de radio γ . Cuando la sincronización es total, $r=s=1$. Si toda la población de osciladores está formando *clusters* se tiene $s=1$, mientras que $r < 1$ debido a que las distancias pueden aún ser muy grandes [15]. Finalmente, si algunos de los elementos están formando *clusters* pero otros están libres, encontramos $r < s < 1$.

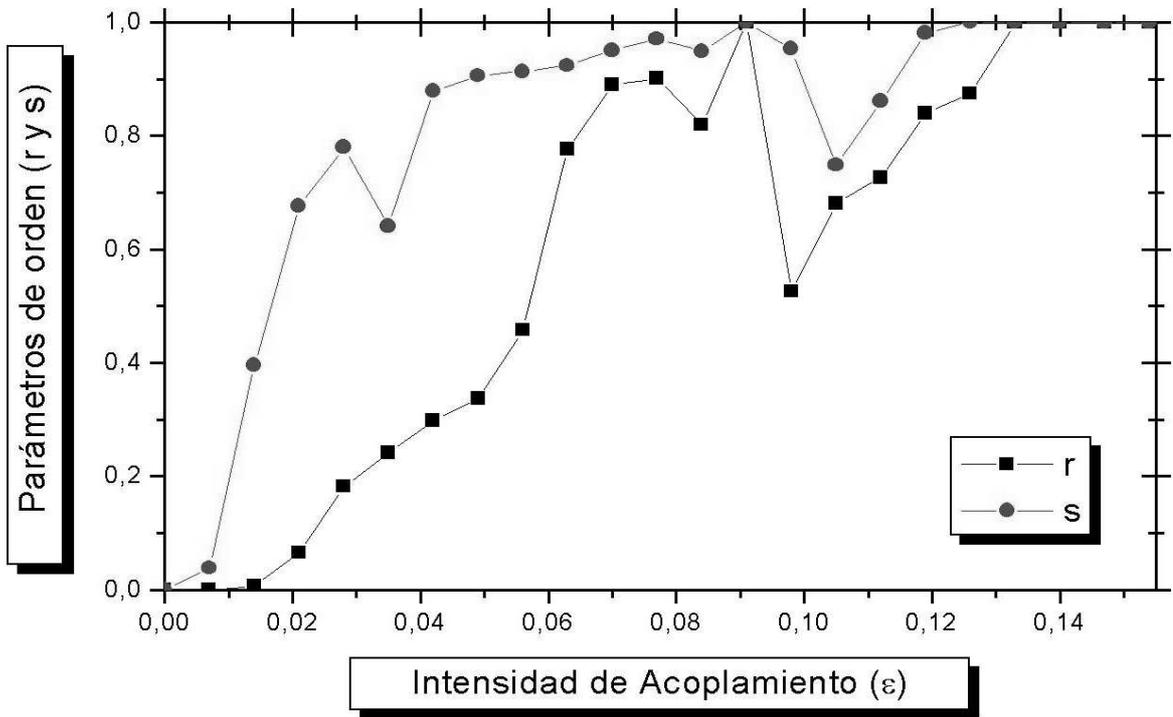


Figura 2.4: *Parámetros de orden r y s como una función de la intensidad de acoplamiento ϵ .*

En la Figura (2.4) se muestran los parámetros de orden r y s para cada valor de la intensidad de acoplamiento. Para pequeños valores de ϵ , tanto r como s son menores a la unidad, indicando que no todos los osciladores están formando *clusters*. En el intervalo $0.007 < \epsilon < 0.042$, se puede notar un suave aumento de r , mientras que, s lo hace de manera más rápida. Luego, en la zona donde $0.042 < \epsilon < 0.090$, tenemos que $r, s < 1$, lo que indica que una fracción de la población de osciladores no se encuentran

formando *clusters*. Cuando la intensidad de acoplamiento alcanza un valor de 0.091, se encuentra $r=s=0.999$, indicando que la población está dividida en pocos *clusters* y que existe una cantidad mínima de elementos libres. Luego, se encuentra un comportamiento similar al observado justo antes de este punto. En el intervalo $0.105 < \epsilon < 0.133$, los parámetros de orden revelan una rápida formación y coalescencia de *clusters*. Para $\epsilon > 0.133$ ambos parámetros de orden han definitivamente alcanzado sus valores máximos $r=s=1$, y la sincronización total ha sido detectada.

*Si el cerebro fuera tan simple que pudiéramos comprenderlo,
seríamos tan simples que no lo entenderíamos.*

Lyall Watson.

Capítulo 3

Electroencefalografía y Patología Epiléptica

El electroencefalograma (EEG) o examen de onda cerebral representa la serie de tiempo que traza el voltaje correspondiente a la actividad neurológica como una función del tiempo, en éste son captadas las oscilaciones de potencial que aparecen en la superficie corporal por un gran número de electrodos de manera simultánea y que son transmitidas a un intensificador con entrada poliódhmica y registradas después por canales de la máquina electroencefalográfica. Analizar señales electroencefalográficas en el computador ha sido una técnica en la investigación del cerebro. Muchos investigadores, por ejemplo, Duke et al (1991) [20], han demostrado que la evolución dinámica compleja del EEG se genera por regímenes caóticos.

Desde hace tiempo, ha habido un sustancial interés en describir los procesos neuronales y señales cerebrales, especialmente los EEG, dentro del contexto de dinámica no-lineal y teoría de caos determinista [21]. La teoría de dinámica no-lineal abre nuevas ventanas en la comprensión del electroencefalograma debido a que el sistema neuronal, ciertamente, involucra mecanismos no lineales a nivel microscópico. Esta conducta imprevisible de ciertos sistemas nerviosos macroscópicos, como aquéllos sondeados por el EEG humano, refleja los efectos de esos mecanismos no-lineales subyacentes [22].

Desde una perspectiva teórica, la identificación y caracterización de la no-linealidad en el EEG conlleva a usar las propiedades de modelos matemáticos para describir la conducta dinámica de un cerebro normal o patológico, y por lo tanto, nuestra comprensión de los procesos fisiológicos subyacentes. Muchos investigadores han usado métodos no-lineales para revelar que el EEG es generado por un proceso neuronal determinista. Algunos grupos han reportado que la no-linealidad encontrada es debida a un caos de dimensión baja [22, 23]. De acuerdo con estos reportes, siendo de dimensión baja y determinista, los datos electroencefalográficos tienen una dimensión finita y un Exponente de Lyapunov positivo.

El EEG se utiliza para diagnosticar la presencia y tipo de trastornos convulsivos y para evaluar las lesiones en la cabeza, tumores, infecciones, enfermedades degenerativas y alteraciones metabólicas que afectan al cerebro. También se usa para evaluar trastornos del sueño y para investigar períodos de pérdida del conocimiento. El EEG puede realizarse para confirmar la muerte cerebral en un paciente en estado de coma.

3.1 Examen Electroencefalográfico

Las células del cerebro se comunican produciendo pequeños impulsos eléctricos. En un EEG se colocan electrodos en el cuero cabelludo sobre múltiples áreas del cerebro para detectar y registrar patrones de la actividad eléctrica y revisar en busca de cualquier anormalidad.

El examen lo practica un técnico en una habitación especialmente diseñada que puede estar en un consultorio médico o en un hospital. Se le pide al paciente que se acueste boca arriba sobre una mesa o silla reclinable. El técnico coloca entre 16 y 25 discos metálicos planos (electrodos) en diferentes sitios del cuero cabelludo, los cuales se sostienen con un gel adhesivo. Los electrodos se conectan por medio de cables a un amplificador y a una máquina de registro.

La máquina de registro convierte las señales eléctricas en una serie de líneas ondeadas [Figura (3.1)], las cuales se dibujan en un pedazo de papel cuadriculado

en movimiento y la computadora almacena los valores de tiempo y voltaje en un archivo de datos. Se debe permanecer acostado, sin moverse y con los ojos cerrados, ya que el movimiento puede alterar los resultados [24].

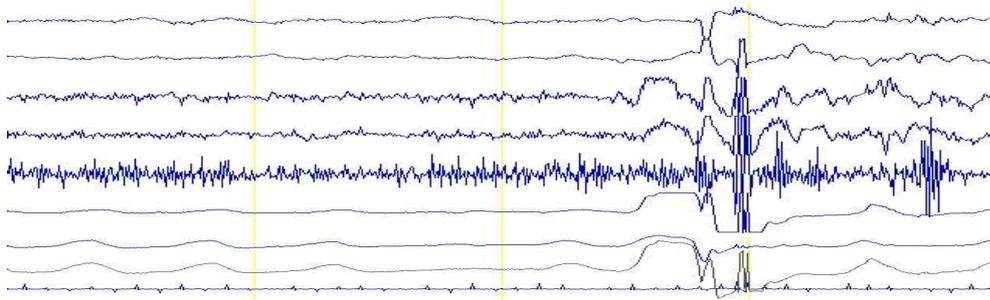


Figura 3.1: *Trazo electroencefalográfico para un registro de 9 canales.*

Es posible que al paciente se le pida hacer ciertas cosas durante el proceso de registro, como respirar profunda y rápidamente por algunos minutos o mirar hacia una luz muy brillante y centellante.

3.1.1 Electroodos

El Electroencefalograma es más difícil de registrar que otros biopotenciales ya que las señales electroencefalográficas tienen voltajes menores. Los electrodos tienen diversas formas y pueden ser de cualquier metal que, con la ayuda de una solución salina fisiológica o de una pasta conductora, pueda establecer contacto con la superficie de la cabeza. Las propiedades eléctricas de los electrodos dependen, antes que nada, del tipo de metal utilizado y pueden ser modificadas por cambios de estado de las superficies metálicas.

3.1.2 Disposición de electrodos

El montaje de los electrodos sobre los puntos de registro en la superficie del cráneo se lleva a cabo según una distribución sistemática. Con fines comparativos es preferible trabajar con un sistema de disposición de electrodos internacional y unitario; este sistema de registro se conoce como *sistema 10-20* [Figura (3.2)]. Se parte de cuatro

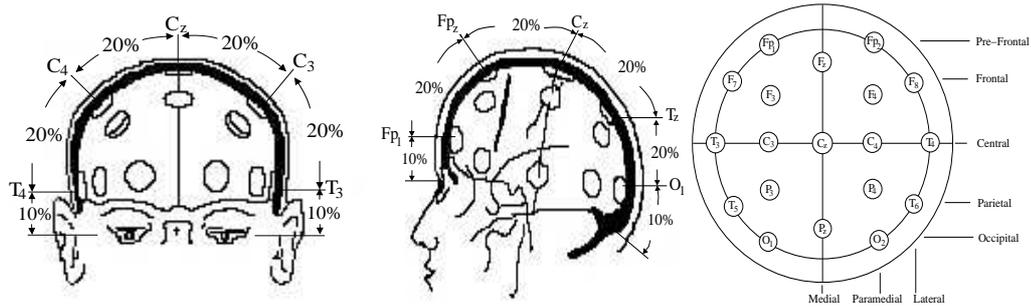


Figura 3.2: *Distribución sistemática de la posición de electrodos en el sistema 10-20.*

puntos determinados de la cabeza, del nasión (el punto ubicado en la base de la nariz sobre la sutura frontonasal), del inión (punto situado en la parte posterior de la cabeza que se corresponde con la protuberancia occipital) así como de los dos puntos preauriculares correspondiéndose cada uno de ellos con el comienzo del hueso cigomático delante del trago.

Para determinar la posición de los electrodos se considera como 100 % al valor de la distancia que separa al nasión del inión medida sobre el vértex en la línea media. Se marcan cinco puntos a lo largo de esa línea. Los electrodos se colocan de tal manera que el primer electrodo quede separado del nasión por una distancia correspondiente al 10% del total y de igual manera, el último electrodo esté separado del inión un 10% sobre la misma línea. El resto de la línea lo ocupan tres electrodos que están separados entre sí, así como del primer y último electrodo por distancias cada una equivalentes al 20% de la distancia total. A causa de este principio de distribución se denomina 10-20. Para la determinación de los puntos sobre la línea de unión entre nasión, puntos preauriculares e inión, las horizontales, se procede de manera idéntica partiendo del nasión y del inión, ya sea a derecha o izquierda.

La posición de los electrodos se identifica con letras y números, sobre el hemisferio derecho con números pares y sobre el izquierdo con impares. Las letras identifican cada región de la cabeza [Figura (3.3)]: frontopolar o prefrontal (Fp), frontal (F), temporal (T), central (C), parietal (P), occipital (O), con lo cual se dice únicamente que se registra sobre esas regiones de la cabeza. Esto no significa, sin embargo, que la información deba proceder de las regiones cerebrales ubicadas bajo ese punto. A cada uno de los electrodos ubicados sobre la línea media se le asigna la letra zeta

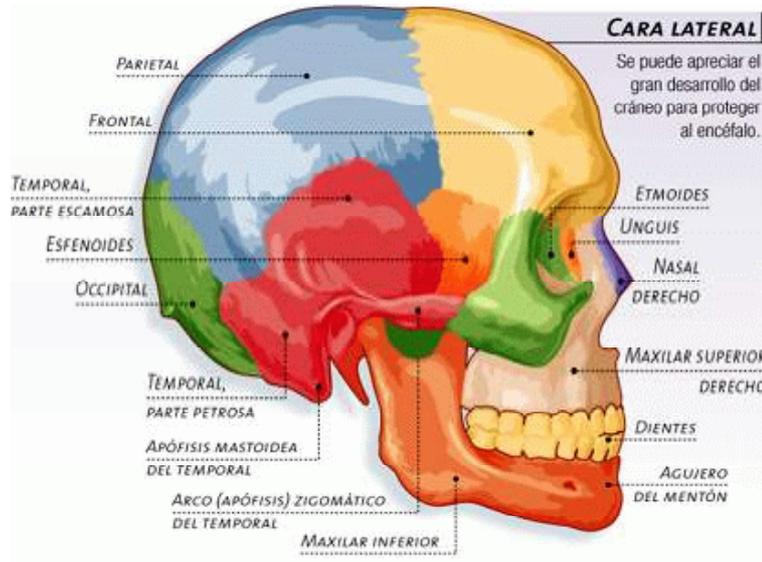


Figura 3.3: Anatomía del cráneo humano.

minúscula (z , de zero) (Fz, Cz, Pz).

3.2 Patología Epiléptica

Las *epilepsias* son enfermedades crónicas, de etiología diversa, caracterizadas por presentar *crisis epilépticas* recurrentes [25]. Las crisis epilépticas son aquellas que resultan de una descarga excesiva de las neuronas cerebrales, asociadas a diversas manifestaciones clínicas, éstas pueden aparecer como convulsiones caracterizadas por la actividad desordenada de los brazos y piernas acompañada por lo general de mordedura de lengua y emisión de orina. En otras ocasiones aparecen de forma menos aparatosa como una falta de respuesta a estímulos durante la que la persona se queda con la mirada fija, ausente, asociándose en ocasiones movimientos automáticos (como tragar repetidamente o frotarse las manos). Estas crisis se denominan crisis parciales o focales o bien ausencias, dependiendo de las características particulares [26].

Las crisis epilépticas pueden ser la manifestación de problemas muy variados y pueden deberse a problemas tan diversos como un tumor cerebral, una malformación,

una meningitis, una conmoción cerebral causada por un golpe en la cabeza, un exceso en la toma de bebidas alcohólicas, etc. En algunos casos no se encuentra la causa de la epilepsia o es de carácter familiar.

Las crisis epilépticas se producen por una alteración de las células cerebrales (las neuronas) en un lugar del cerebro (crisis focales) o por una excitabilidad general del cerebro en su conjunto (crisis generalizadas). Las crisis focales suelen ser debidas a lesiones cerebrales (un tumor, una malformación o una cicatriz). Por otra parte, en las crisis generalizadas no se suele encontrar una anomalía evidente en el cerebro y posiblemente sean debidas a una anomalía en la regulación de la comunicación de las células cerebrales tal vez de causa genética [27].

Por otro lado, cualquier persona puede presentar una crisis aislada en condiciones excepcionales. Por ejemplo, la falta de sueño, el abuso de drogas estimulantes (anfetaminas, cocaína), el alcohol o la fiebre pueden todos ellos aumentar el riesgo de tener crisis. Todo depende del llamado *umbral* para la epilepsia. Por ejemplo, algunas personas tienen una alta resistencia para tener crisis (un alto dintel) y por más factores provocadores a las que se las pueda someter no tendrán crisis. Por el contrario, hay personas con un dintel muy bajo que facilita el que tengan crisis. Generalmente la resistencia o facilidad para tener crisis está asociada a factores hereditarios poco conocidos.

La epilepsia puede aparecer a cualquier edad: desde la infancia hasta la ancianidad, aunque suele ser más frecuente en los dos extremos de la vida. La epilepsia no tiene prejuicios: afecta por igual a hombres y mujeres, ricos y pobres, y a personas de cualquier raza.

No hay una prueba única para diagnosticar la epilepsia. De hecho lo más importante para su diagnóstico es obtener una descripción detallada de las crisis. Por ello, es fundamental ir al neurólogo acompañado de un familiar o testigo de la crisis. Una vez hecho el diagnóstico se complementa con pruebas que ayudan a detectar cual es el origen de las crisis. Las pruebas más importantes son la Tomografía Axial Computarizada (o TAC) cerebral, la Resonancia Magnética Cerebral y el electroencefalograma. Las dos primeras son útiles para ver la estructura del cerebro y pueden

detectar la presencia de tumores, cicatrices, quistes, malformaciones cerebrales, etc. Por otra parte, con el electroencefalograma se obtiene el registro de la actividad eléctrica cerebral que indica la posible excitabilidad del cerebro y la localización de esta excesiva excitabilidad. En ocasiones, es necesario el registro de las crisis epilépticas mediante un sistema de circuito cerrado de vídeo-electroencefalograma para poder diagnosticar con seguridad la epilepsia o para poder determinar el lugar cerebral de origen de las crisis [27].

We now understand that chaos exists in many natural phenomena, including our brains, and thus we have to ask paradoxically why we perceive our own existence and why we recognize the separation between subject and object.

Kunihiko Kaneko.

Capítulo 4

Base de Datos

Electroencefalográficos

Durante el desarrollo de este trabajo se asumió un modelo de cerebro como un sistema de elementos dinámicos caóticos, consistente en neuronas acopladas que interactúan entre sí, y que producen el funcionamiento macroscópico del mismo. Para lo cual, se ha realizado un análisis de la dinámica no-lineal de señales electroencefalográficas, provenientes del cerebro humano, de una muestra de sujetos sanos y una población de pacientes con patología epiléptica. La base de datos esta compuesta por 20 señales EEG, constituidas por 18 canales, dispuestos como se explica en la Sección 3.1.2.

4.1 Características de la obtención de las Señales EEG

El registro de las señales electroencefalográficas se realizó en 18 canales a partir de electrodos adheridos a la superficie de la cabeza con pasta conductora, en los

sitios establecidos por el sistema internacional 10-20, midiéndose la diferencia de potencial respecto a una referencia constituida por ambas orejas cortocircuitadas. Se digitalizó la señal a una frecuencia de muestreo de 256 Hz y conversión A/D de 12 bits, filtrada digitalmente entre 0.5 y 30 Hz. Se seleccionaron para el análisis, registros de tiempo variable (ver Apéndice A) de actividad en reposo de sujetos sanos y pacientes epilépticos (entre los que se encuentra un registro antes y durante una crisis convulsiva, registrada accidentalmente en la consulta). Las señales EEG corresponden al Departamento de Electrofisiología del *Hospital San Juan de Dios* de la ciudad de Mérida, Venezuela.

4.2 Nomenclatura de las ondas del EEG

En el registro de un EEG aparecen ondas de diversas frecuencias, amplitudes y formas. Estos elementos aislados y sus combinaciones constituyen un variado contenido informativo. Seguidamente se describirán las ondas del EEG y sus características, en las distintas bandas de frecuencia.

Banda α : Ondas regulares o irregulares simétricas sobre ambos hemisferios de unos 8-13 Hz, en estado de vigilia relajado, con los ojos cerrados. Más notables en las regiones posteriores de la cabeza. Amplitud variable por debajo de $50 \mu\text{V}$.

Banda β : Ondas en las de más de 13 Hz, en estado de vigilia con los ojos cerrados, en las regiones frontocentrales de la cabeza. Amplitud variable, generalmente inferior a $30 \mu\text{V}$.

Zona de frecuencia de sueño: Ondas sobre las regiones centrales de la cabeza de unos 11-15 Hz, generalmente de 12-14 Hz, de distribución casi siempre difusa. Amplitudes variables, inferior a $50 \mu\text{V}$.

Banda θ : Ondas simétricas sobre las regiones anteriores de la cabeza de baja amplitud distribuidas irregularmente entre 4-7 Hz.

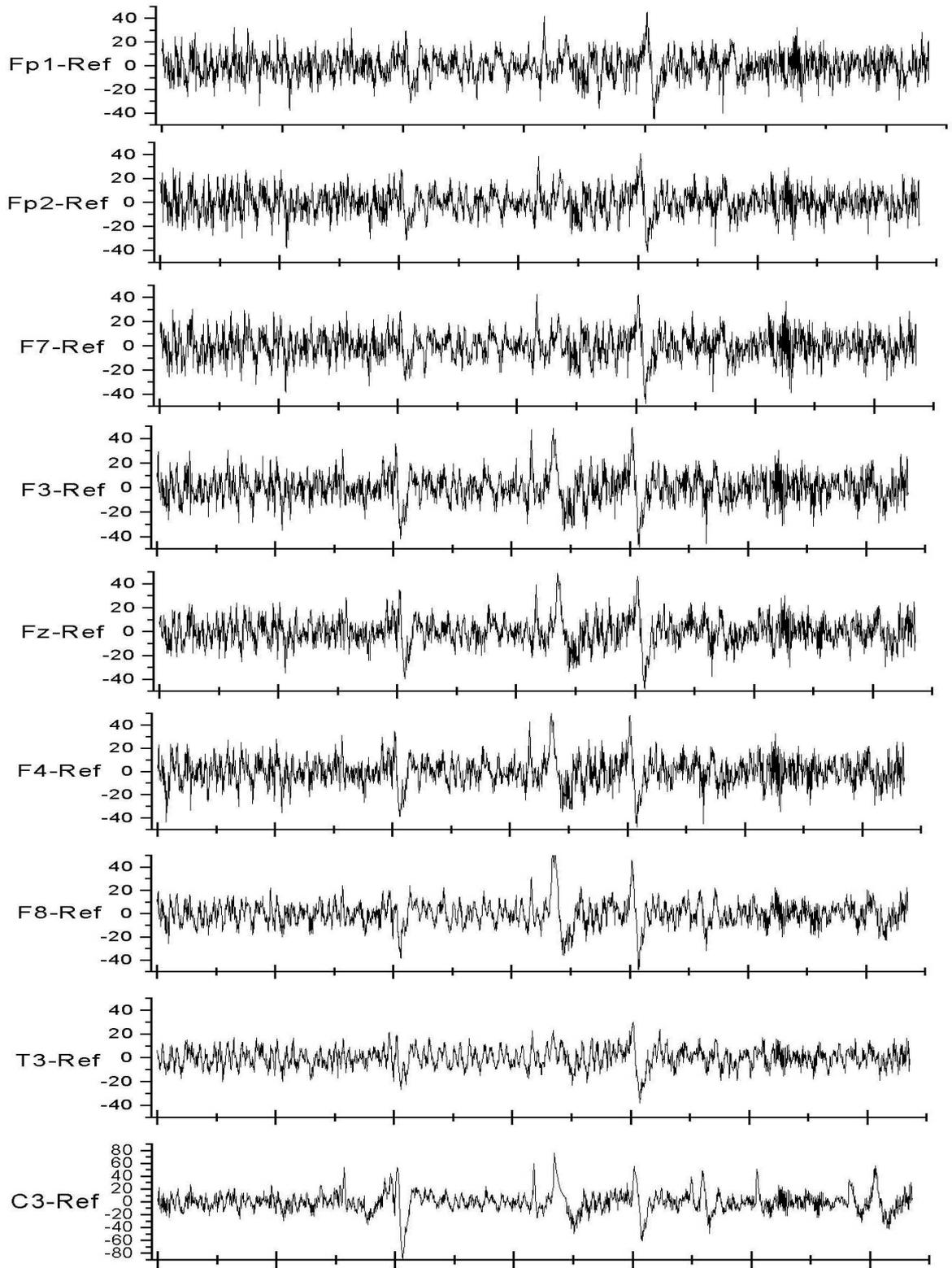
Banda δ : Ondas que no tienen un origen exacto, de baja amplitud, de unos 0.5-2 Hz y de distribución irregular.

4.3 Descripción de las señales EEG de sujetos sanos

Una de las señales EEG de sujetos sanos fue tomada durante un período de tiempo de 49.66 segundos. En ésta, se pueden observar distintos estados por los que el sujeto pasó durante el examen realizado; desconocemos exactamente cuales fueron estos estados; de la intensidad de la señal podemos deducir que a un paso de tiempo ligeramente superior a los 4000 intervalos de tiempo, después de iniciado el examen (llámese estado 2), el sujeto pudo haber cerrado los ojos, este estado tuvo una duración aproximada de unos 4000 intervalos de tiempo. Transcurridos 8000 intervalos de tiempo del inicio del registro (estado 3), se nota un brusco aumento del voltaje de la señal, indicando, posiblemente, la abertura de ojos o el cambio a un estado de actividad cerebral mayor, como por ejemplo, el hecho de despertar de manera repentina produce un aumento en la actividad eléctrica cerebral.

En la Figura (4.1) podemos observar estas características; además notamos que la evolución descrita anteriormente es más notable en los canales de registro C4, T4 y T6 correspondientes al hemisferio derecho del cerebro y T5, P3 y O1 del hemisferio izquierdo además del canal Pz de la zona central.

En rasgos generales es difícil determinar una estructura en los distintos canales del EEG ya que la señal eléctrica registrada es comparable con una señal de ruido. Sin embargo, sabemos que esto no es así y que bajo esa falsa aleatoriedad existe un cierto orden a nivel microscópico. En los canales T3, C3, Cz y P4 se observa una señal un tanto diferente a la encontrada en el resto del electroencefalograma donde se aprecia en detalle los estados alcanzados por el sujeto de prueba. Es importante hacer la observación que en los canales C3, Cz, Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4 y F8 se puede apreciar que en el momento de cambio de estado (del 1 al 2), el EEG experimenta una disminución repentina de la intensidad de la señal.



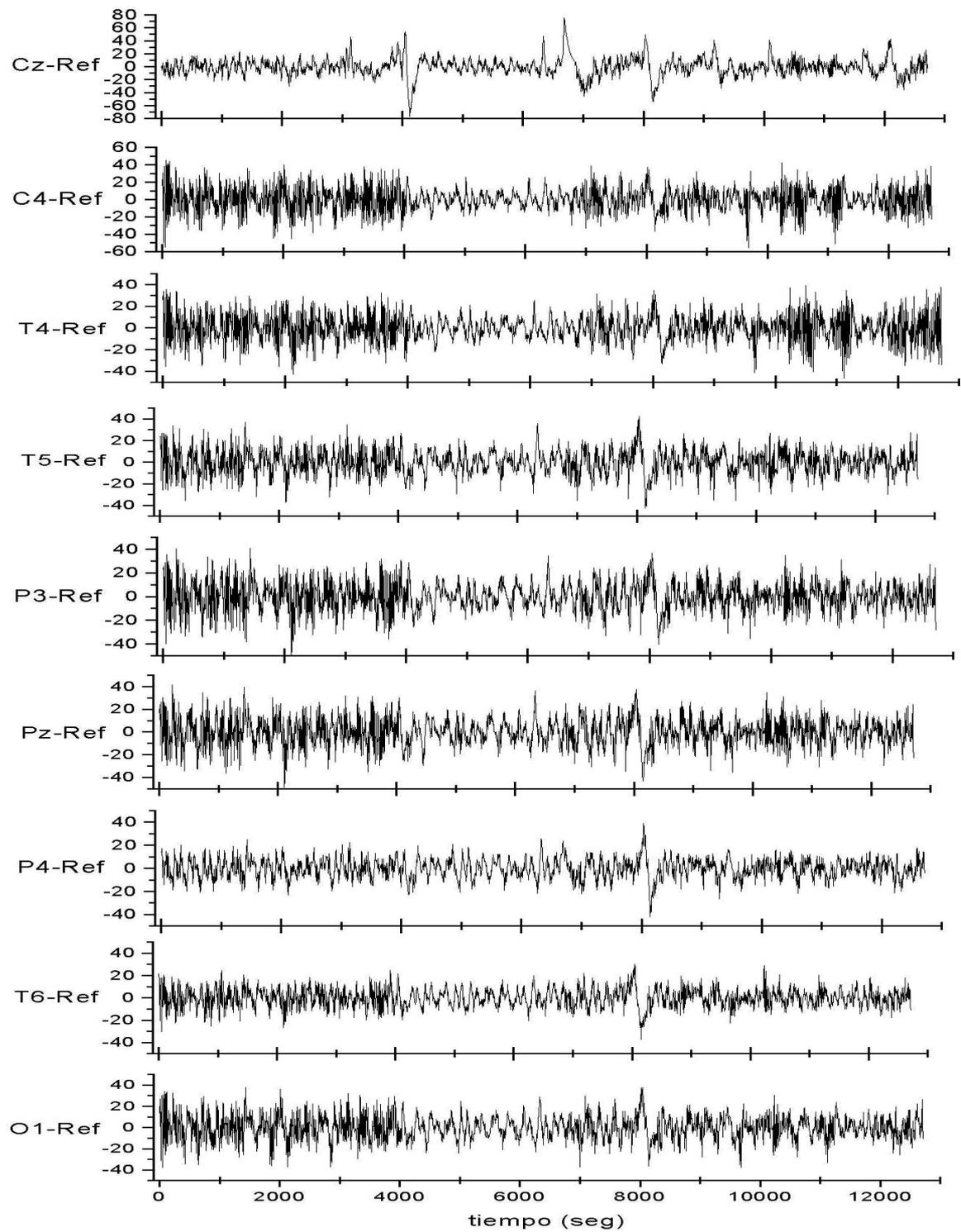


Figura 4.1: *Señales EEG de un sujeto normal.*

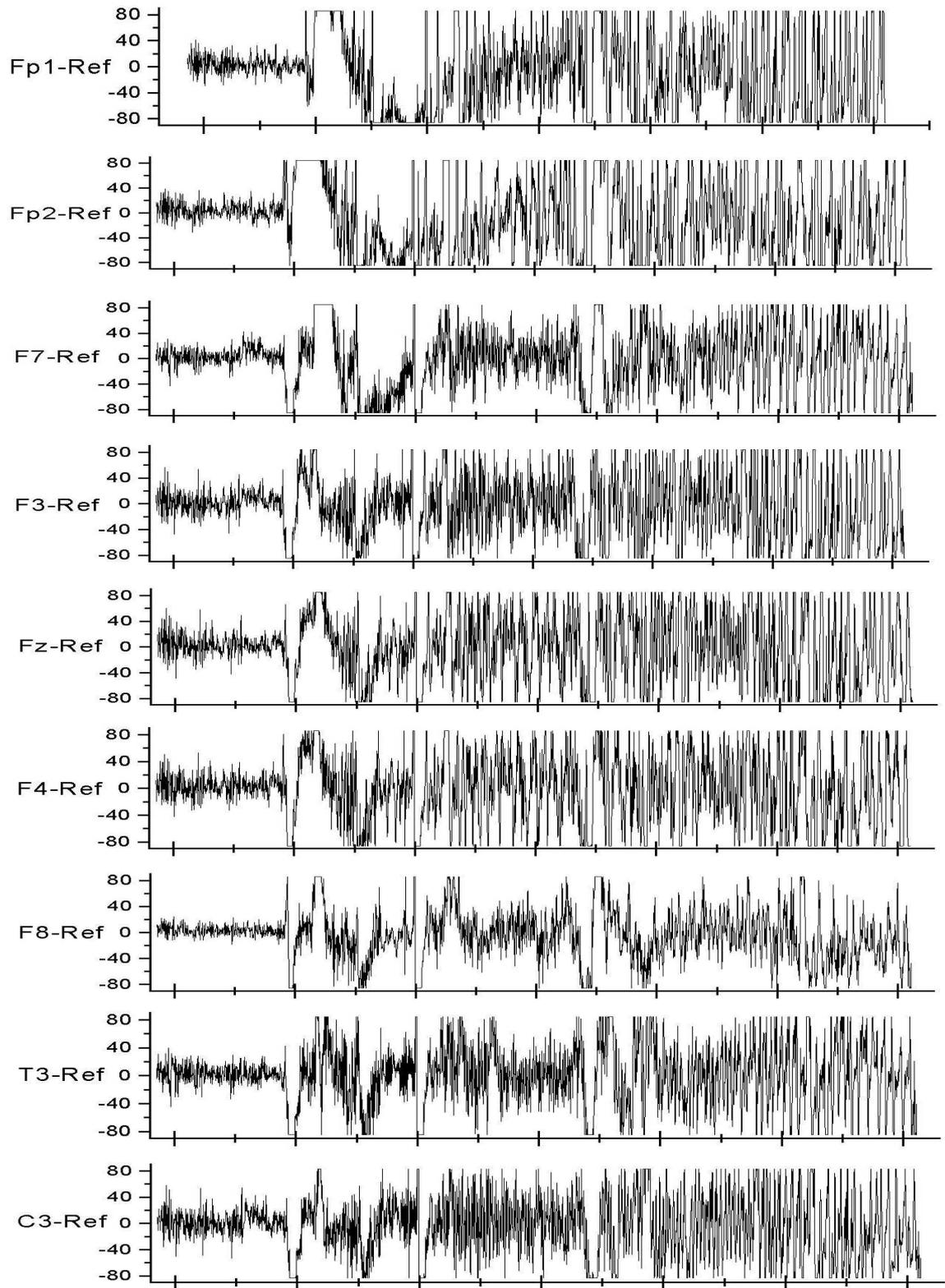
4.4 Descripción de las señales EEG de pacientes epilépticos

En esta sección se discuten las características encontradas en la señal electroencefalográfica de un paciente epiléptico cuyo registro eléctrico cerebral contiene información segundos antes de una crisis epiléptica, así como también, contiene información del comportamiento eléctrico del cerebro durante la crisis.

El período de tiempo en el que la señal fue registrada es de 62.61 segundos, en este intervalo, el computador obtuvo 16027 datos de información que constituyen cada canal de la Figura (4.2); en ésta, podemos observar que los voltajes registrados durante 10 segundos en el intervalo de tiempo 41990 y 42000 (al cual llamaremos Fase 1) son mayores a los observados en la Figura (4.1). Luego de este intervalo de tiempo observamos un cambio brusco en el registro EEG del paciente justo en el momento de inicio de la crisis epiléptica; en algunos canales – tales como Fp1, Fp2, F4, F8 y T6 – se registró el inicio de la crisis con una caída de la magnitud del voltaje, mientras que el resto de los canales muestran un aumento de la actividad eléctrica cerebral según la referencia dada.

El EEG de este paciente patológico presenta, durante la crisis, voltajes que superan la capacidad de registro de la máquina de toma de datos; por lo que se observan ciertas regiones planas en los bordes superior e inferior del electroencefalograma, donde los valores límites registrados son de +85,52 mV y -85,52 mV.

Durante el intervalo de tiempo comprendido entre 42000 y 42025 (Fase 2), se observa un comportamiento poco caótico y con algunos signos de regularidad, signos bastante marcados en comparación con la Fase 1 y el EEG del sujeto sano. Al intervalo de tiempo del registro que inicia en 42025 y concluye en 42052, lo llamaremos Fase 3. En esta fase Observamos una regularidad y casi periodicidad bastante fuerte, con ciertos comportamientos un poco diferentes registrados por los canales F8, P3, Pz, P4 y T6; sin embargo, los canales T5 y O1 muestran una regularidad mucho mayor al resto de los electrodos.



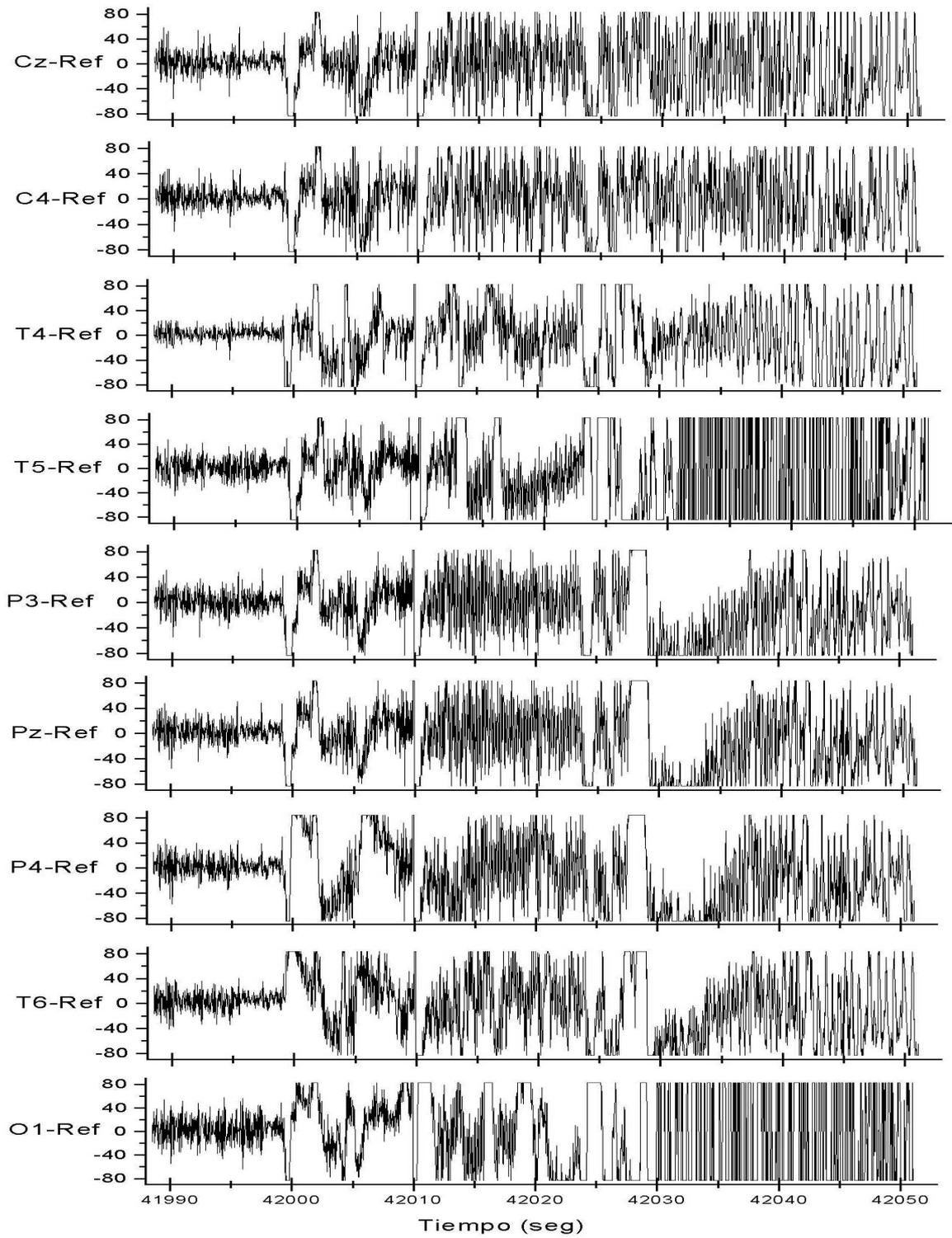


Figura 4.2: Señales EEG de un paciente epiléptico durante una crisis generalizada.

*Dudar todo y creer todo, son dos
soluciones igualmente convenientes,
ambas nos ahorran el tener que pensar.*
H. Poincaré, Ciencia e Hipótesis (1921).

Capítulo 5

Análisis de los EEG

Como se mencionó en el capítulo anterior, la base de datos para este trabajo contiene 20 señales electroencefalográficas, se cuenta con 10 señales EEG que corresponden al grupo de sujetos sanos y 10 señales EEG que corresponden al grupo de epilépticos, con un EEG de un paciente que ha sufrido una crisis epiléptica. A continuación se presenta un análisis general de estas señales.

5.1 Análisis de señales EEG del grupo de sujetos sanos

En la Sección 4.3, se realizó una descripción detallada de una de las señales pertenecientes a la base de datos de sujetos sanos; en esta sección, se muestra un análisis general de todas las señales EEG de sujetos sanos, por medio de la técnica de dinámica no-lineal presentada en este trabajo. Seguidamente, se muestran los gráficos correspondientes a los parámetros $r(t)$ y $s(t)$, así como el número de *clusters* formados, de cada sujeto sano en estudio. Es de hacer notar que los períodos de tiempo en los que se ha llevado a cabo el registro electroencefalográfico de cada señal, varía desde los 30 segundos hasta los 110 segundos (ver Apéndice A). A continuación se presenta el análisis detallado de una de las señales EEG del grupo de sujetos sanos y los gráficos del resto de los sujetos del grupo.

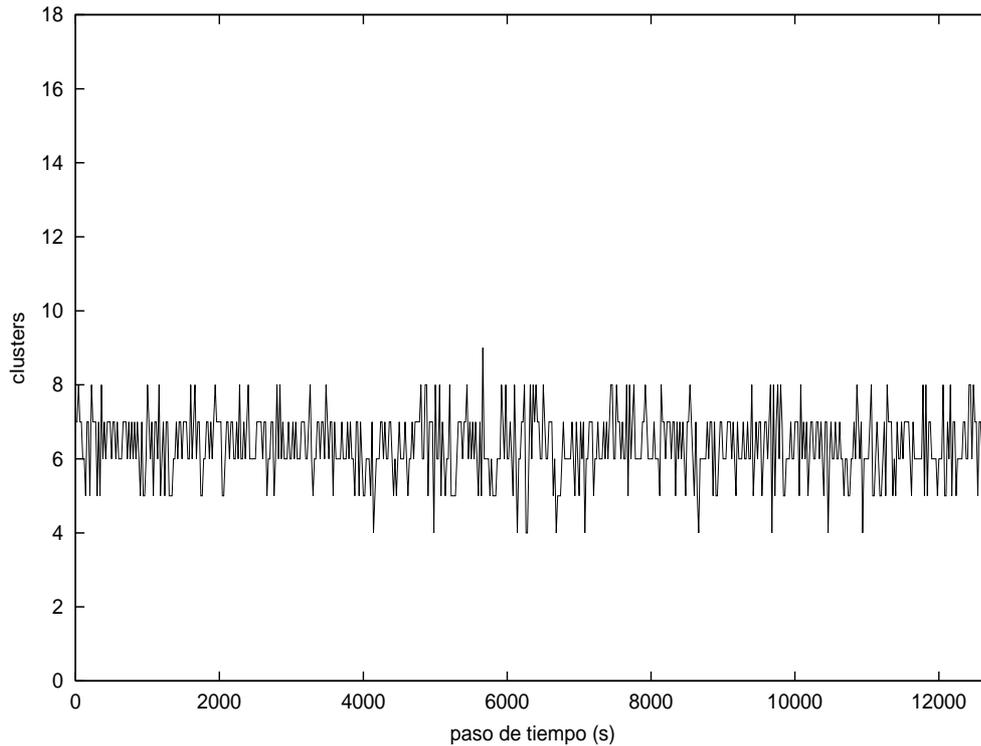


Figura 5.1: *Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral de un sujeto sano.*

Tal como se realizó en la Sección 2.2, en la Figura (5.1) podemos ver la cantidad de *clusters* formados en cada paso de tiempo.

En esta figura se observa que el menor número de *clusters* formados corresponde al momento en el que el sujeto sano cambia del estado 1 –definido desde el inicio del registro hasta un poco mas de los 4000 intervalos de tiempo– al estado 2 y está constituido por tan sólo 4 *clusters* para este instante de tiempo. Para este sujeto sano, podemos establecer un valor medio de 7 *clusters*.

En la Figura (5.2) se muestra la medida de la sincronización de un canal respecto de otro en un instante de tiempo dado, para realizar ésto, el programa codificado en **Fortran90**, toma cada instante de tiempo registrado en el archivo de la señal, así como el valor de cada uno de los 18 canales y para ese instante de tiempo específico, calcula el valor de $r(t)$ y $s(t)$ de la señal EEG.

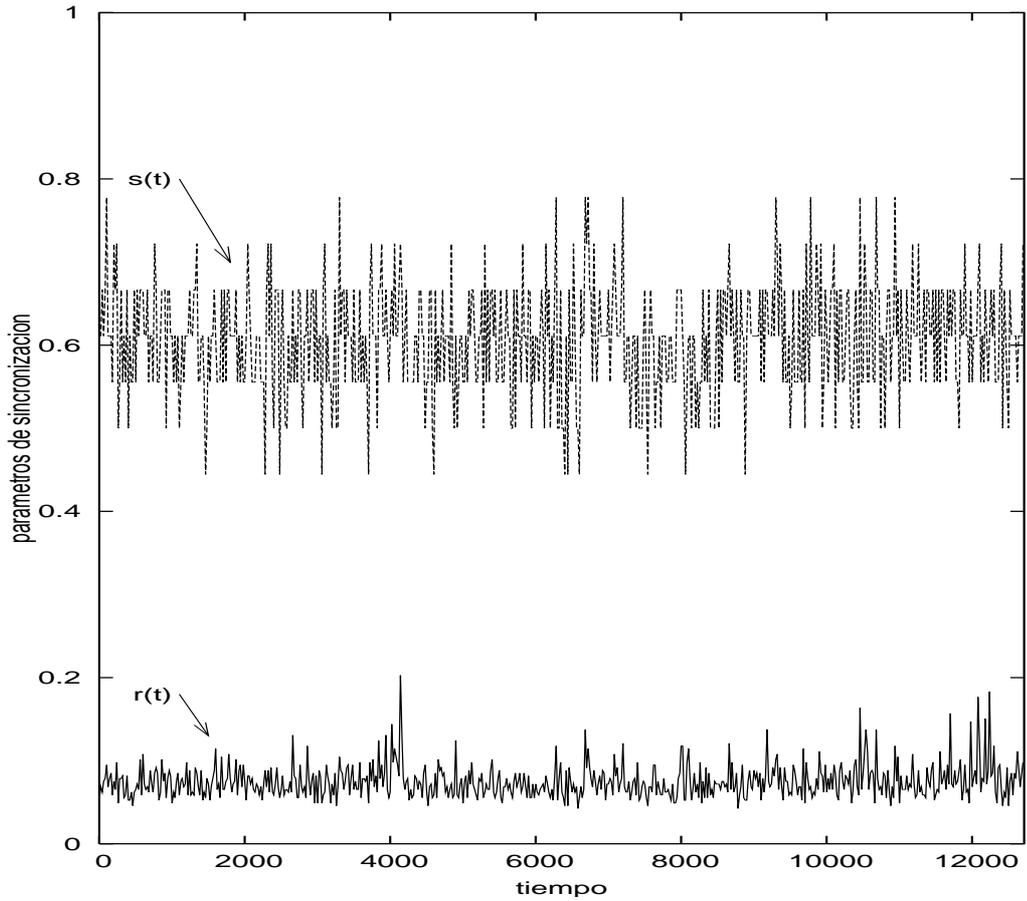


Figura 5.2: *Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo en un paciente sano.*

En la Figura (5.2) se puede observar el comportamiento de los parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$. El parámetro $r(t)$ obtiene valores muy bajos con respecto a aquellos valores que nos indican una fuerte sincronización en una serie de tiempo dada, su valor alcanza un máximo de 0.21. Por otra parte, el parámetro de sincronización $s(t)$ muestra valores más elevados que sugieren cierta organización en las señales entre cada canal. El máximo valor alcanzado por este parámetro es de 0.78, cabe destacar que este valor es encontrado en distintos instantes de tiempo del registro eléctrico cerebral. Sin embargo, el valor promedio del parámetro $s(t)$ durante todo el tiempo de registro es de 0.606. Es fácil ver que en ningún instante de tiempo el parámetro $s(t)$ alcanza el valor máximo 1, esto se podría interpretar como que las neuronas emiten impulsos eléctricos que no se encuentran totalmente

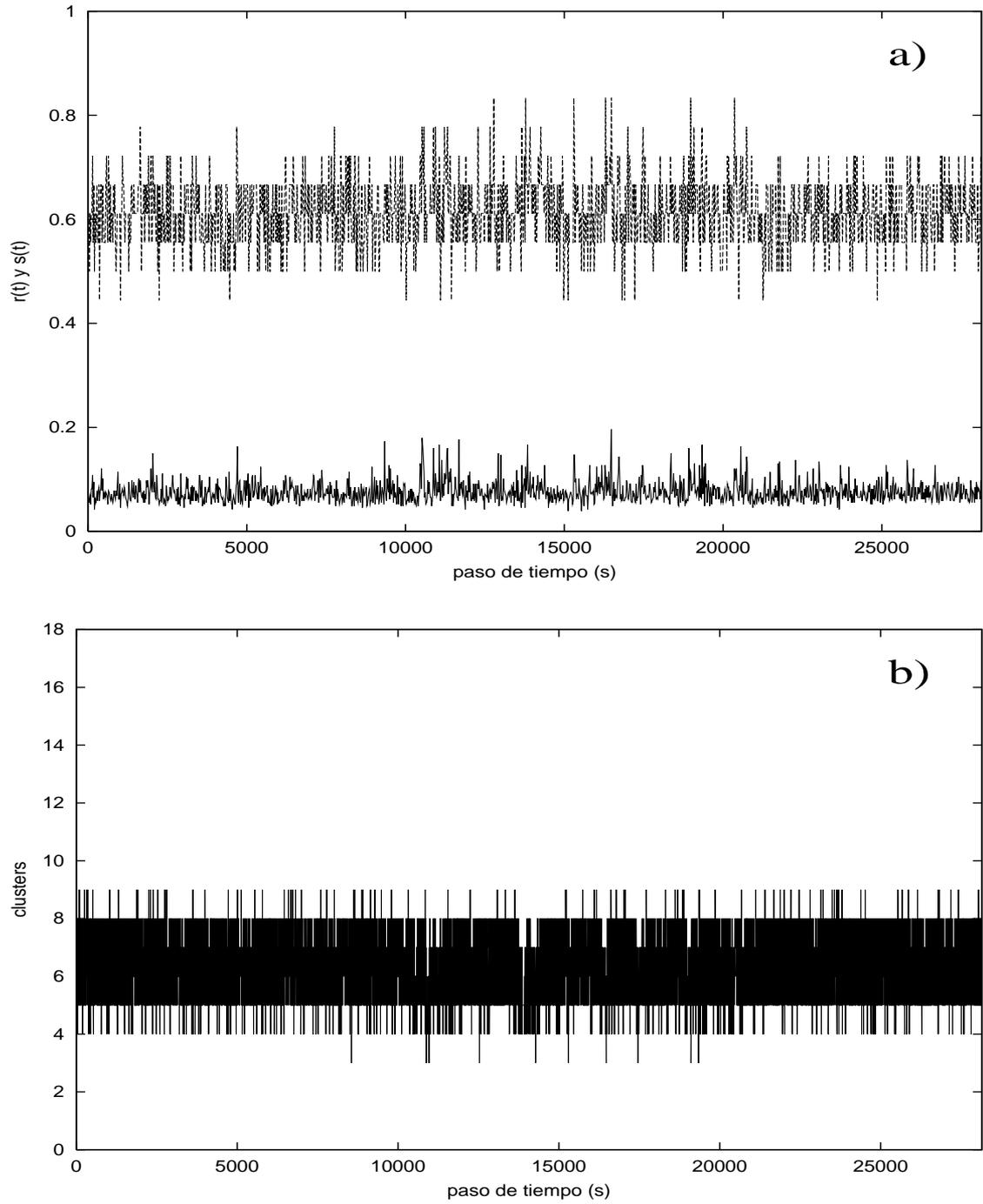


Figura 5.3: *Sujeto sano N° 2. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

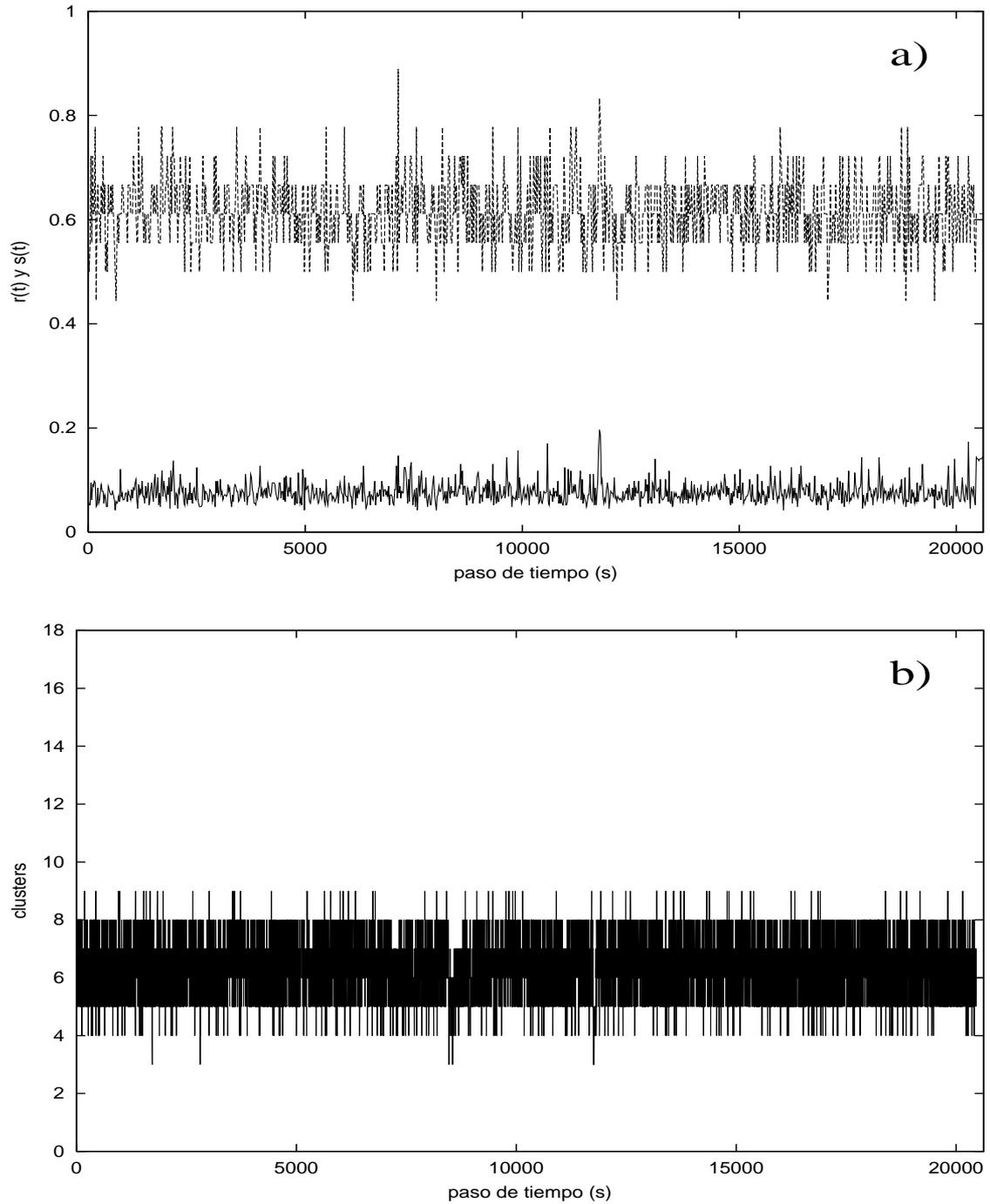


Figura 5.4: *Sujeto sano N° 3. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

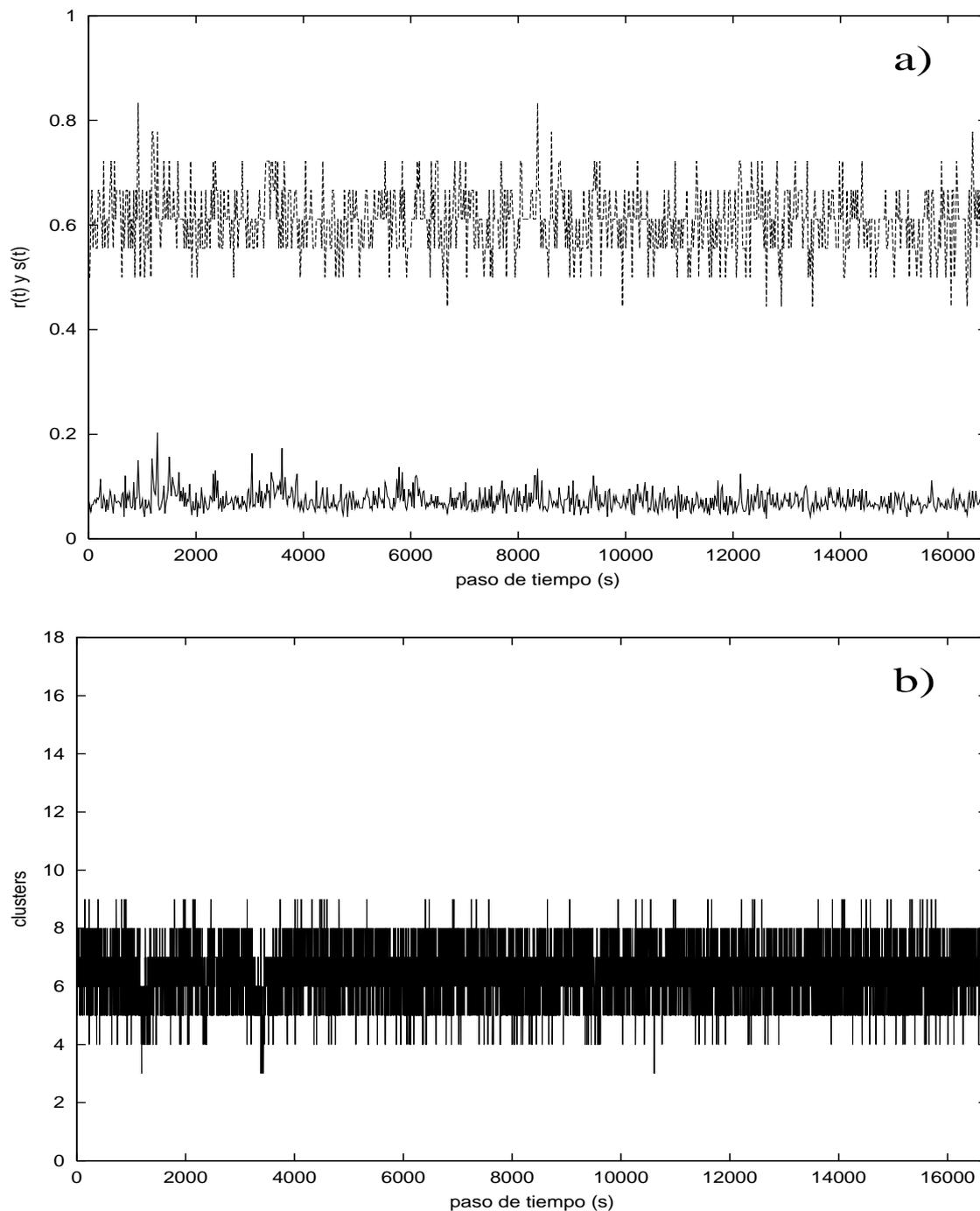


Figura 5.5: *Sujeto sano N° 4. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

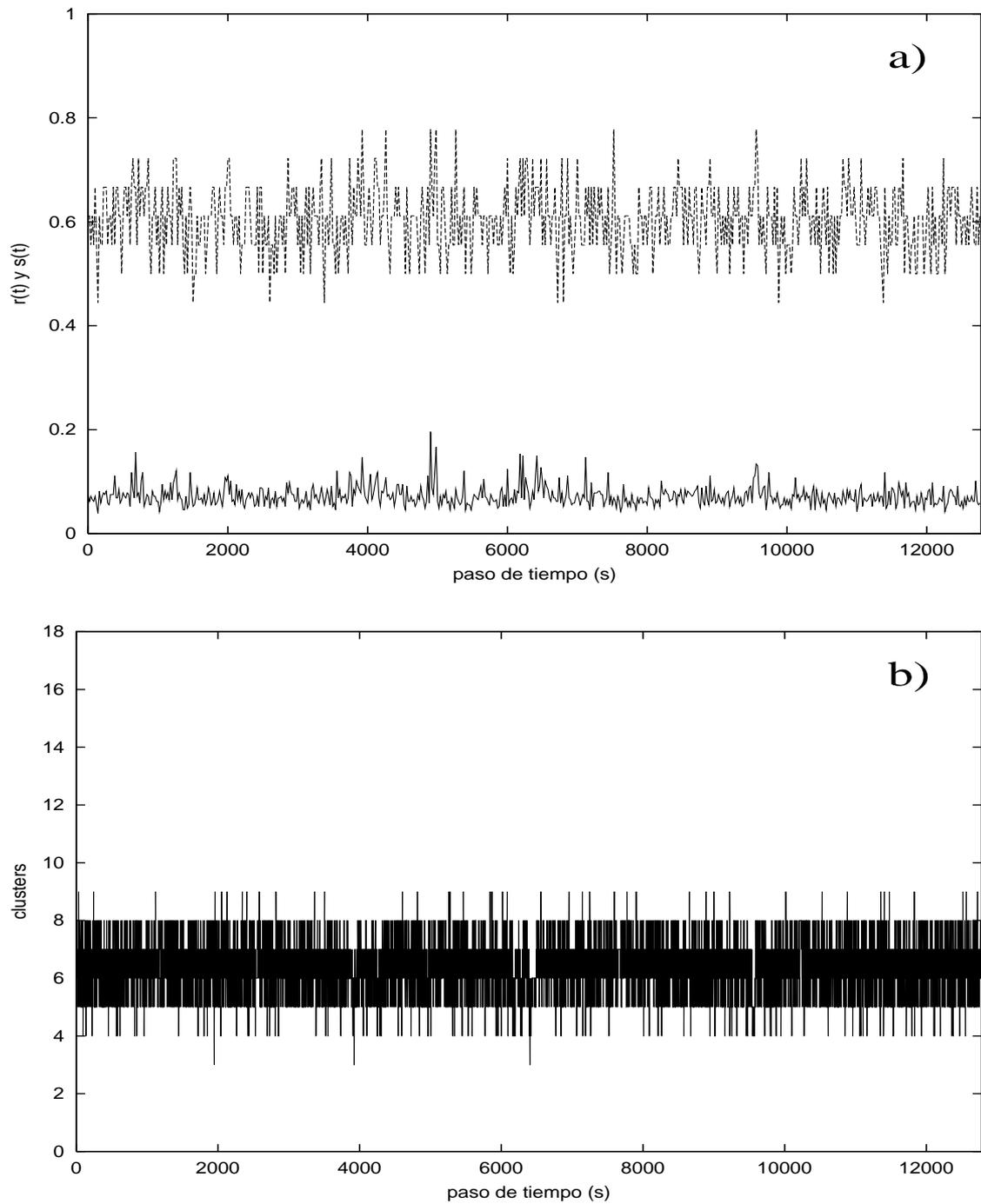


Figura 5.6: *Sujeto sano N° 5. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

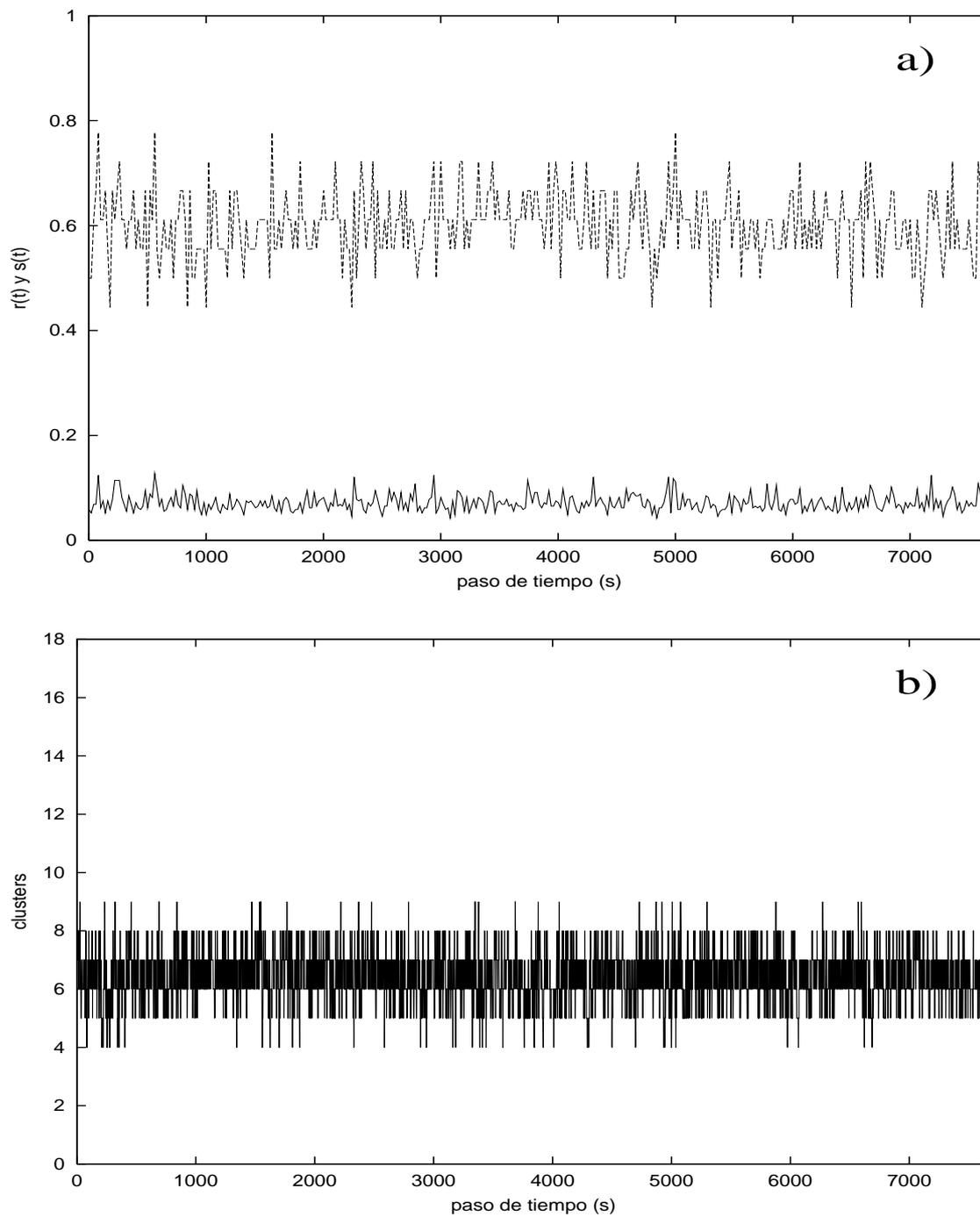


Figura 5.7: *Sujeto sano N° 6. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

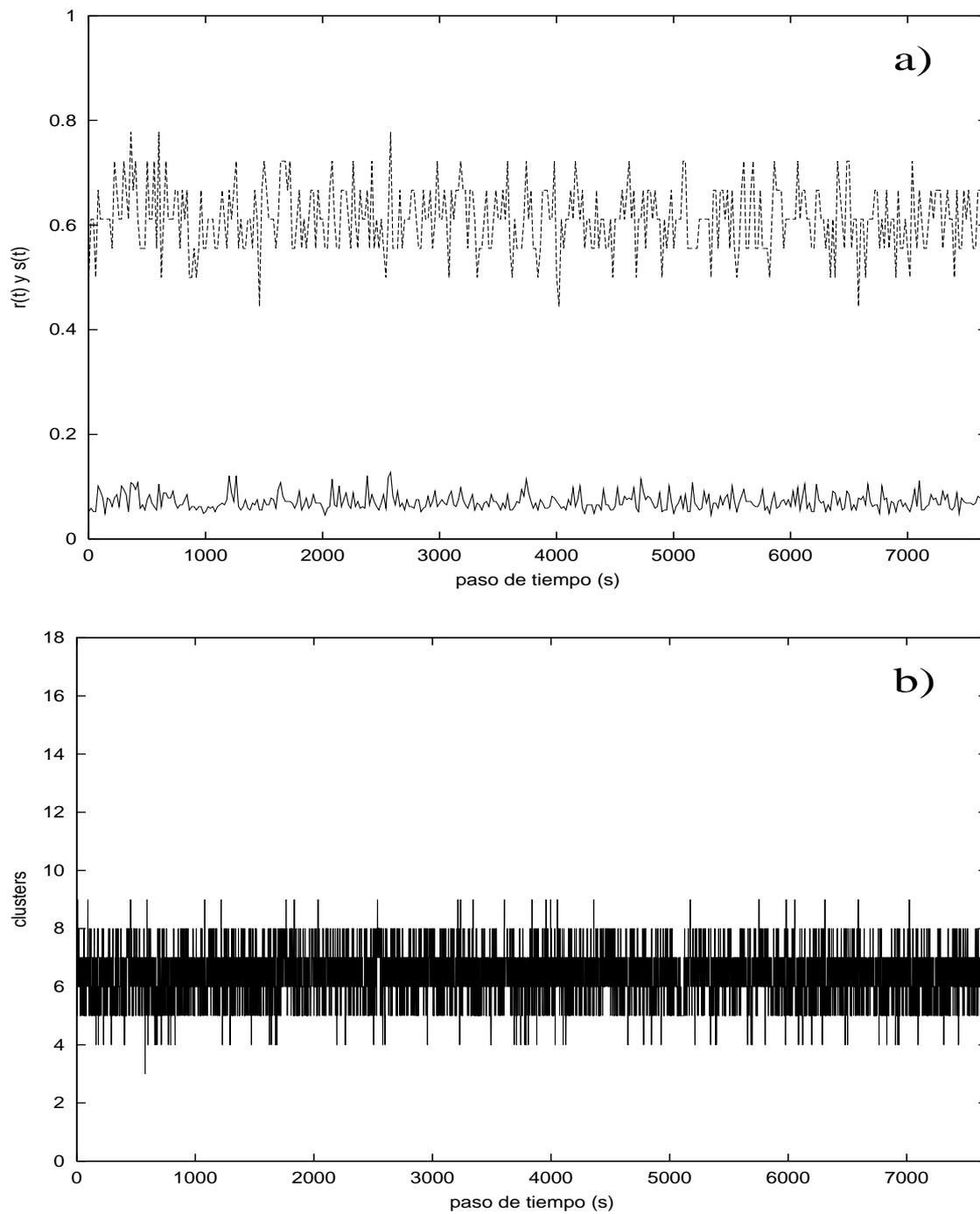


Figura 5.8: *Sujeto sano N° 7. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

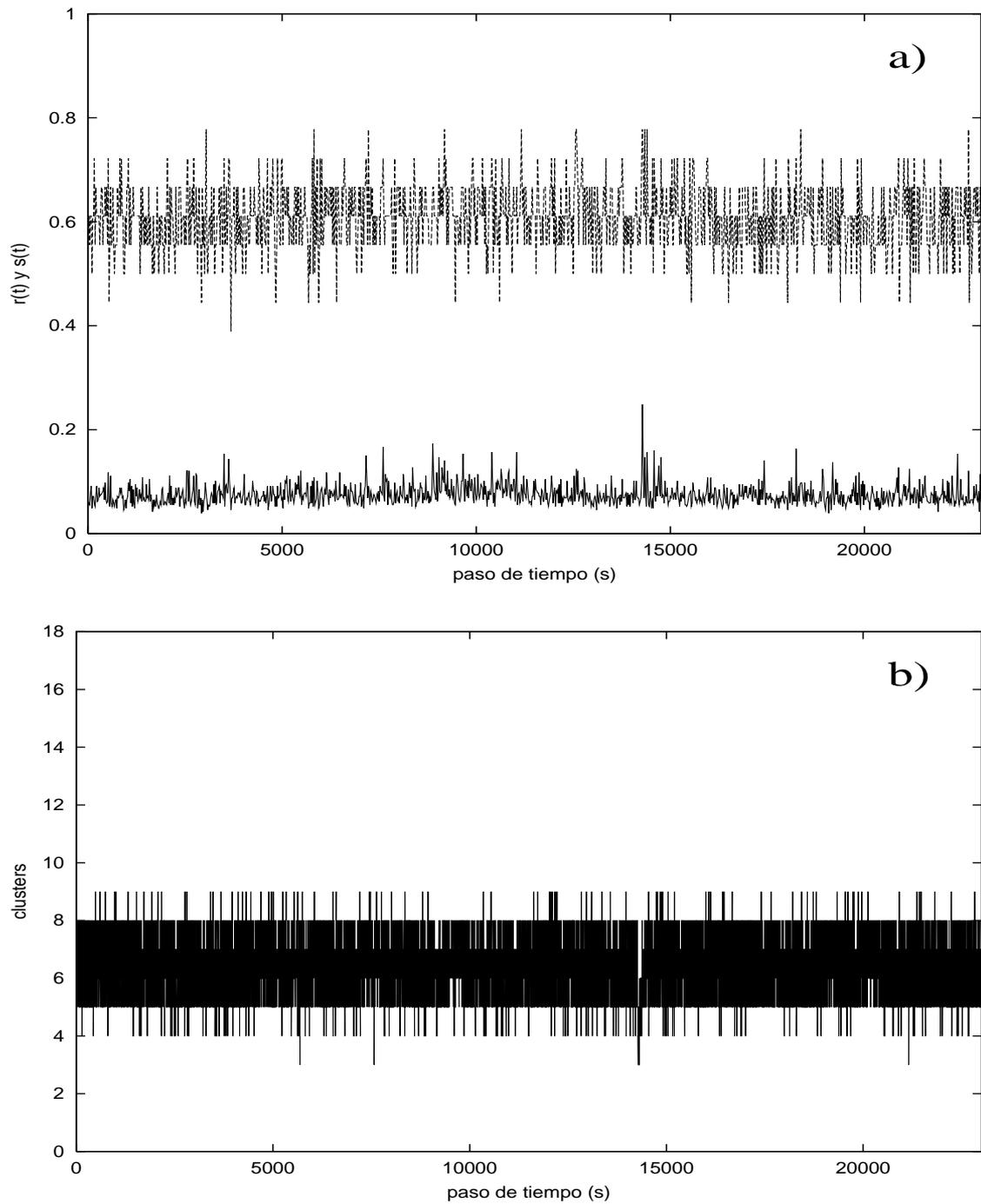


Figura 5.9: *Sujeto sano N° 8. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

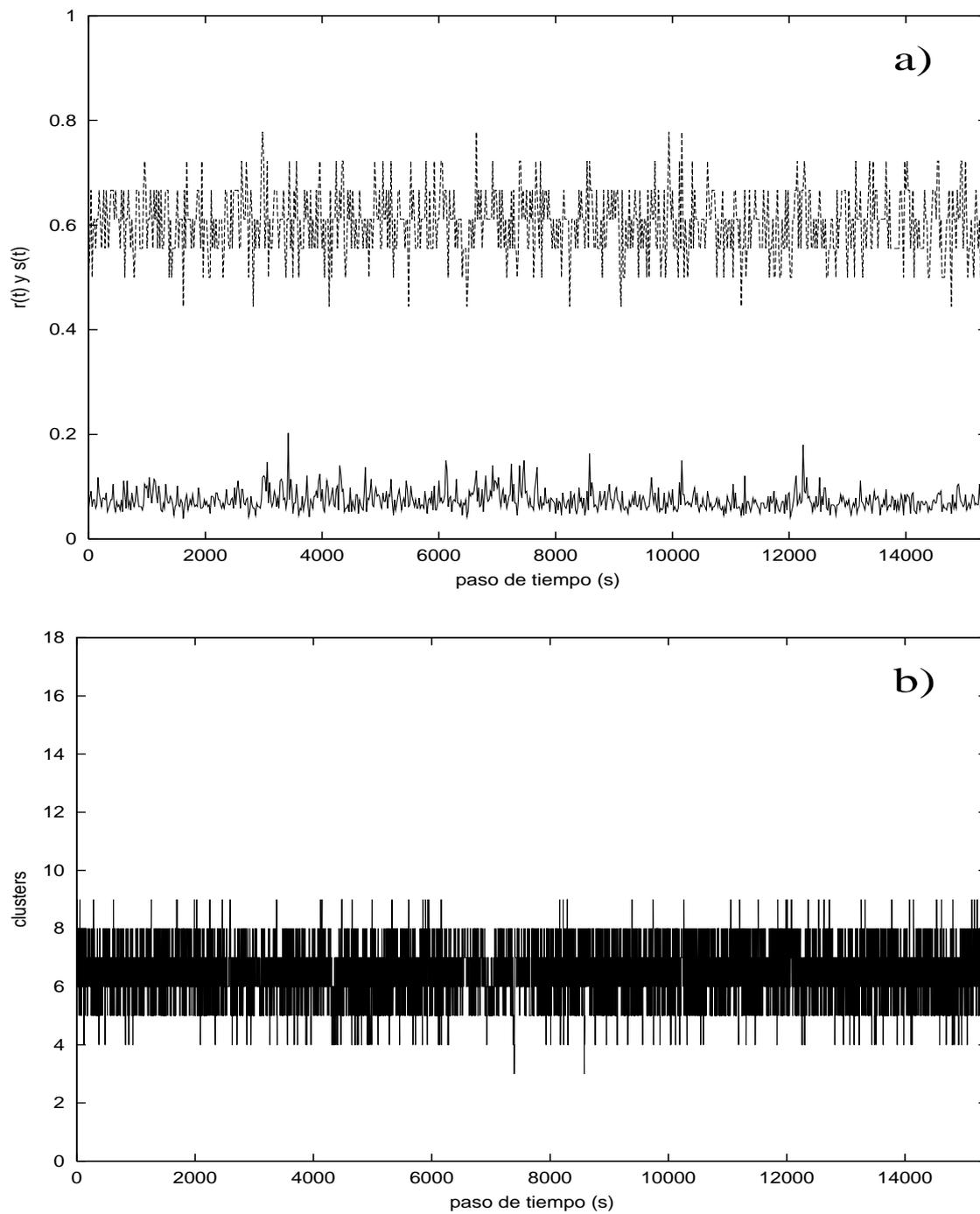


Figura 5.10: *Sujeto sano N° 9. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

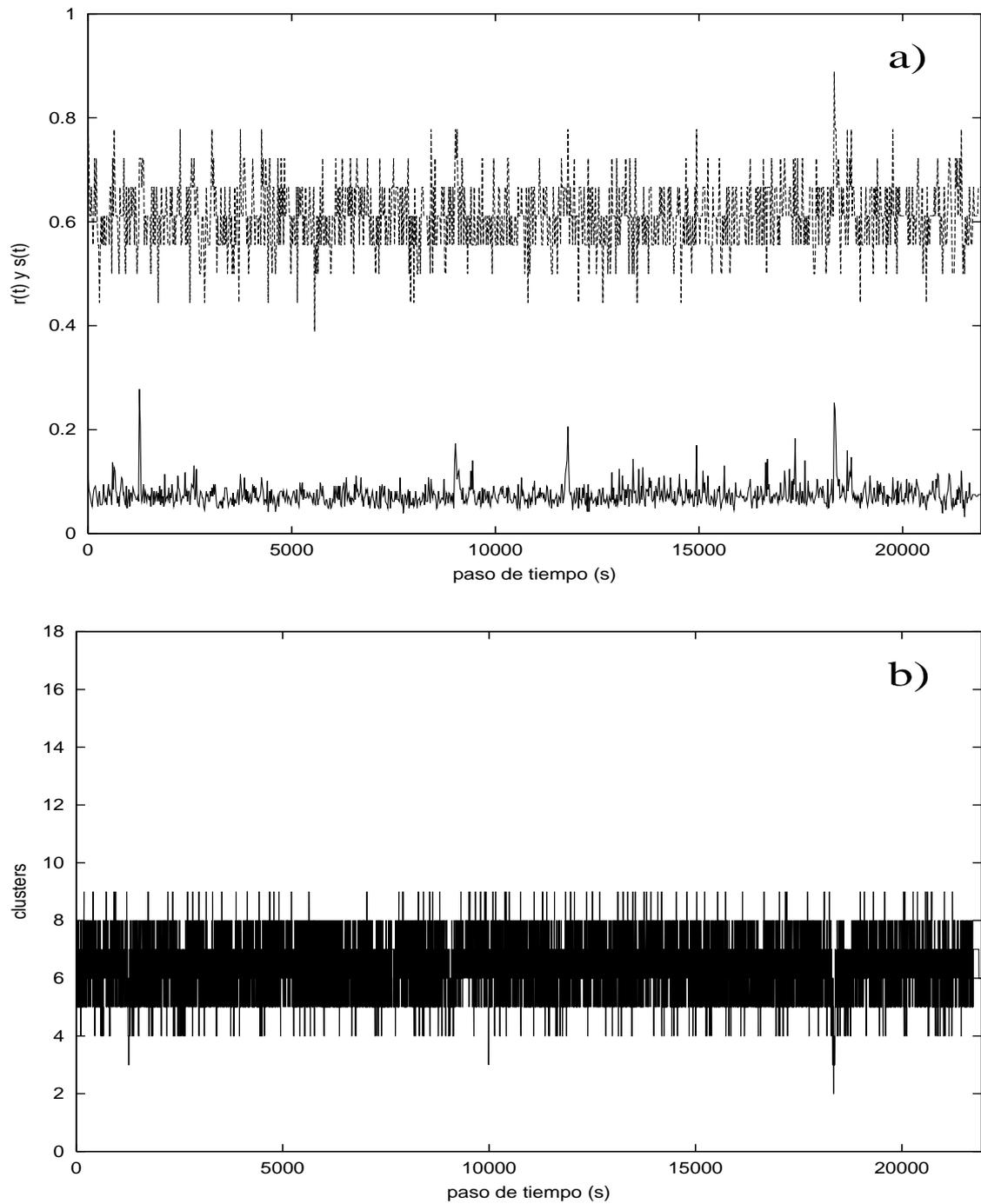


Figura 5.11: *Sujeto sano N° 10. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

sincronizados entre sí, ésto es, que algunos de los impulsos eléctricos registrados por el EEG se encuentran sincronizados pero algunos de ellos no.

El resto de las señales electroencefalográficas que se encuentran en la base de datos de esta tesis, son similares a la señal expuesta en los párrafos anteriores, sin embargo, presentan características particulares poco notables que dependen de la persona en estudio.

En las Figuras 5.3 - 5.11 se presentan los resultados obtenidos de las señales electroencefalográficas del grupo de sujetos sanos, en el Apéndice A se presenta una tabla con los tiempos de muestreo de cada una de las señales utilizadas en este estudio.

5.2 Análisis de señales EEG del grupo de pacientes epilépticos

En el Capítulo 4, se presentó una descripción de la señal EEG de un paciente con patología epiléptica; en este capítulo, se presenta el análisis de los electroencefalogramas con la técnica de dinámica no-lineal usada con el grupo de sujetos sanos. El EEG mostrado en el Capítulo 4, pertenece a un paciente durante una crisis epiléptica, mientras que los 9 restantes son personas a las que se les ha diagnosticado epilepsia, pero no se tiene un registro eléctrico de una crisis.

En la Figura (5.12) se observa la formación de *clusters* con respecto al tiempo.

El menor número de *clusters* formados por la actividad eléctrica cerebral del paciente epiléptico corresponde a dos segundos antes del inicio de la crisis; en este instante, el análisis realizado por el programa diseñado, registró un único *cluster*. Sin embargo, no es el único momento en el que la cantidad de *clusters* disminuye repentinamente; podemos interpretar este hecho mencionando que en distintos instantes de tiempo las señales eléctricas se sincronizan y desincronizan a medida que transcurre el tiempo. El número medio de *clusters* encontrados en el EEG del paciente epiléptico es de 5 *clusters* a lo largo de todo el registro.

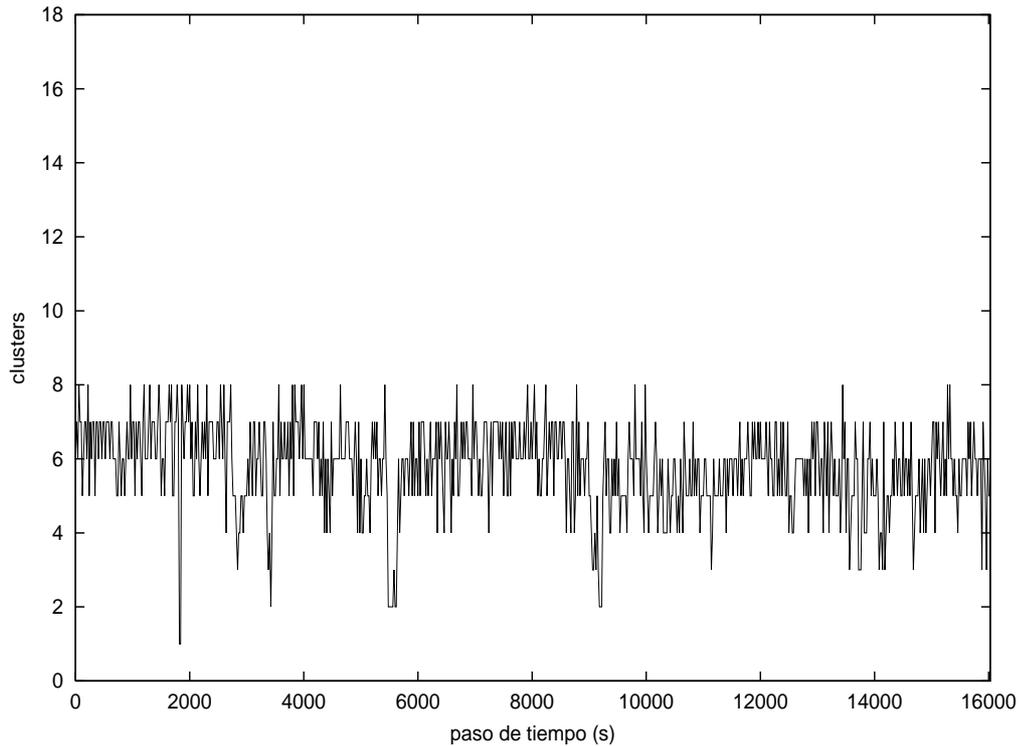


Figura 5.12: *Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral de un paciente epiléptico durante una crisis.*

El comportamiento observado en la Figura (5.12) se ve también reflejado en la evolución de los parámetros de orden $r(t)$ y $s(t)$ (ver Figura (5.13)). En esta figura se puede observar que el parámetro $r(t)$ alcanza su valor máximo, segundos antes al inicio de la crisis, y corresponde a un valor de 0.51, mientras que en el momento de inicio de la crisis se observa un valor de este parámetro igual a 0.39; en diversos momentos de la crisis el valor de $r(t)$ alcanza niveles de sincronización bastante elevados en comparación con las magnitudes de este mismo parámetro en el sujeto normal. Por otro lado, en este mismo gráfico podemos observar la evolución del parámetro de orden $s(t)$, similar al parámetro $r(t)$, este parámetro presenta un aumento de la sincronización de la actividad eléctrica del cerebro instantes antes al momento de inicio de la crisis epiléptica alcanzando hasta un valor de 0.96, sin embargo, en el instante en que el EEG registra el inicio de la crisis, $s(t)$ muestra un aumento de su valor medio que se mantiene durante toda la crisis epiléptica, aparte de este aumento, también presenta algunos incrementos bruscos durante el registro,

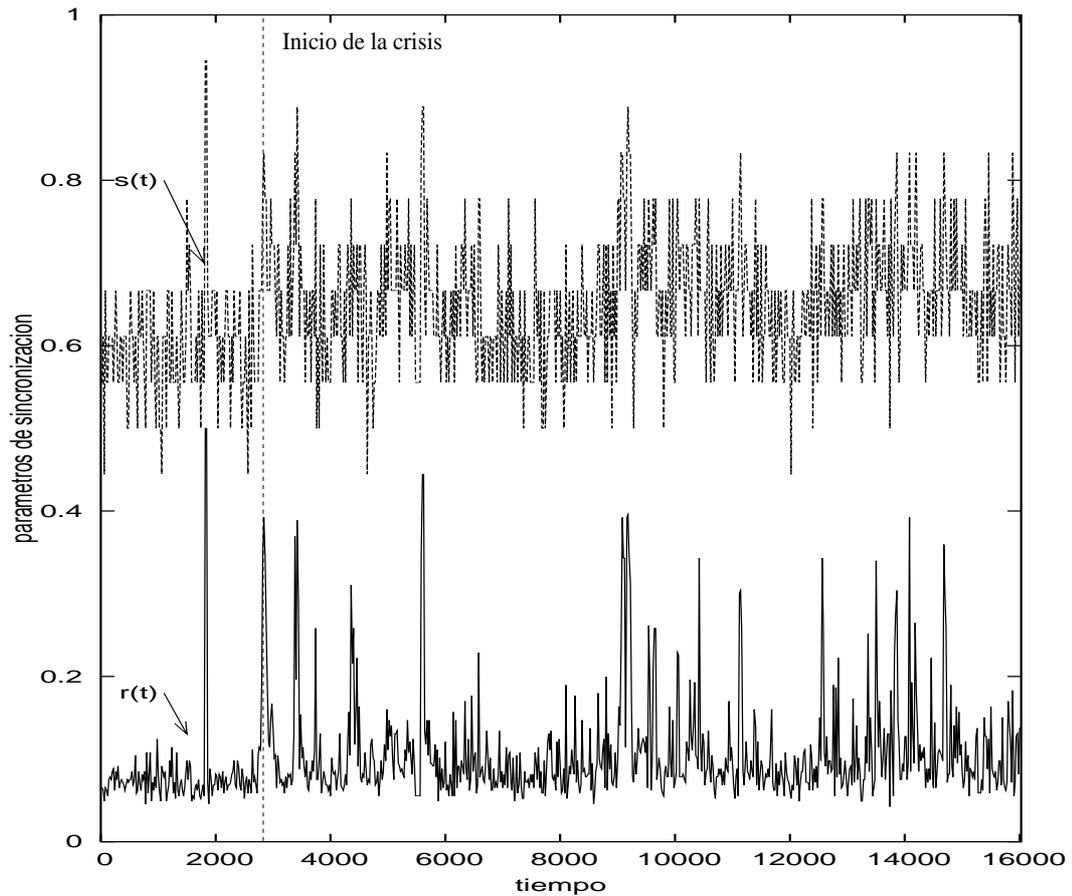


Figura 5.13: *Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo en un paciente patológico durante una crisis epiléptica.*

algunos de estos incrementos corresponden exactamente a aumentos del parámetro $r(t)$; esto es interpretado como un aumento momentáneo de la sincronización de los impulsos eléctricos provenientes de las neuronas y registrados por el EEG.

Cuando el parámetro de sincronización $s(t)$ se aproxima a 1, el nivel de sincronización aumenta, ésto se da en el caso de la crisis epiléptica; si este mismo parámetro de orden alcanzara el valor 1, podría indicar que todas las señales eléctricas emitidas por las neuronas forman pequeños grupos en donde las señales de cada neurona que integra ese grupo es similar a la señal de otra neurona de ese mismo grupo. Sin embargo, la sincronización total se da cuando, tanto $r(t)$ como $s(t)$, alcanzan el máximo valor posible (uno), en este caso, no sólo todas las neuronas

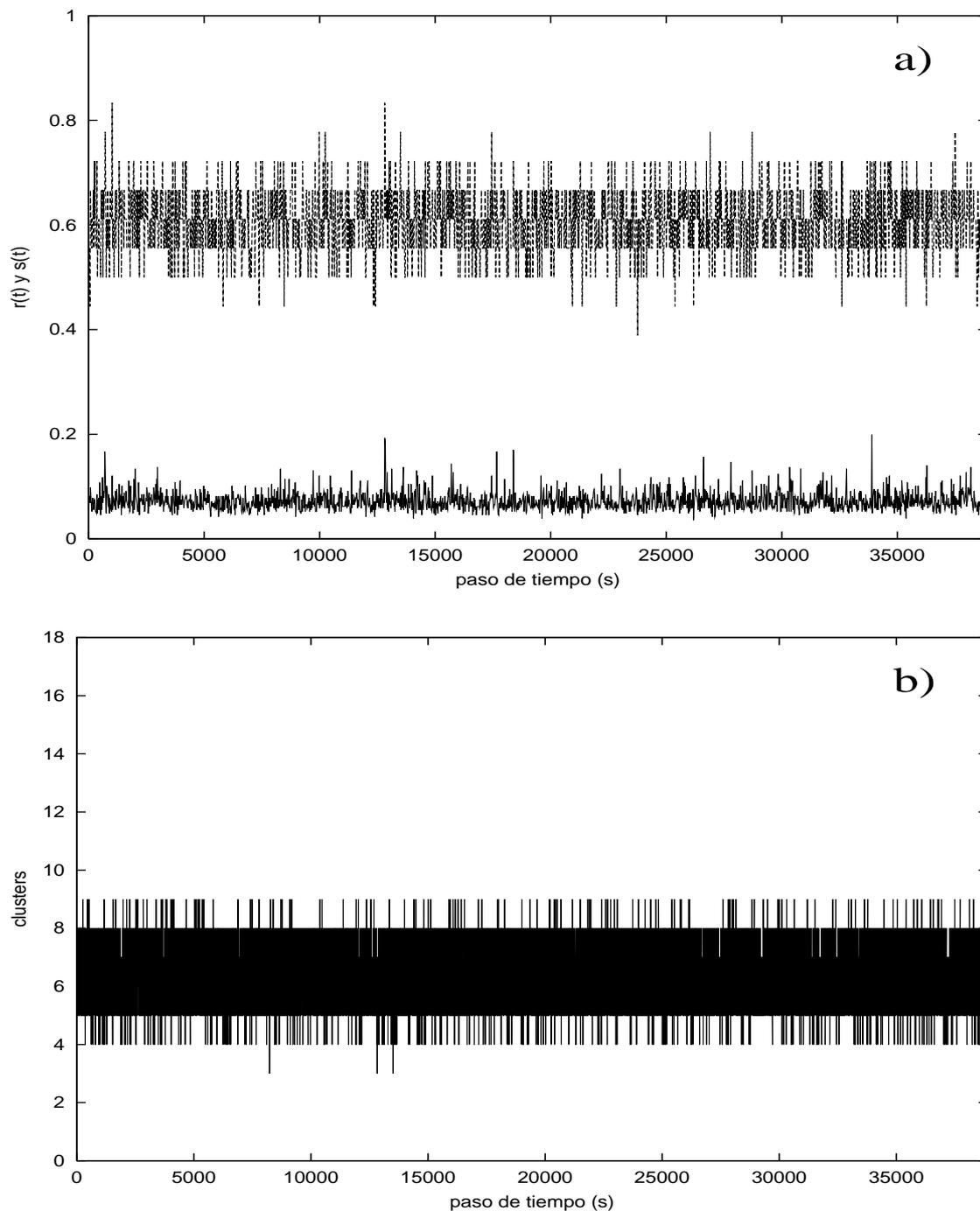


Figura 5.14: *Paciente patológico N° 2. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

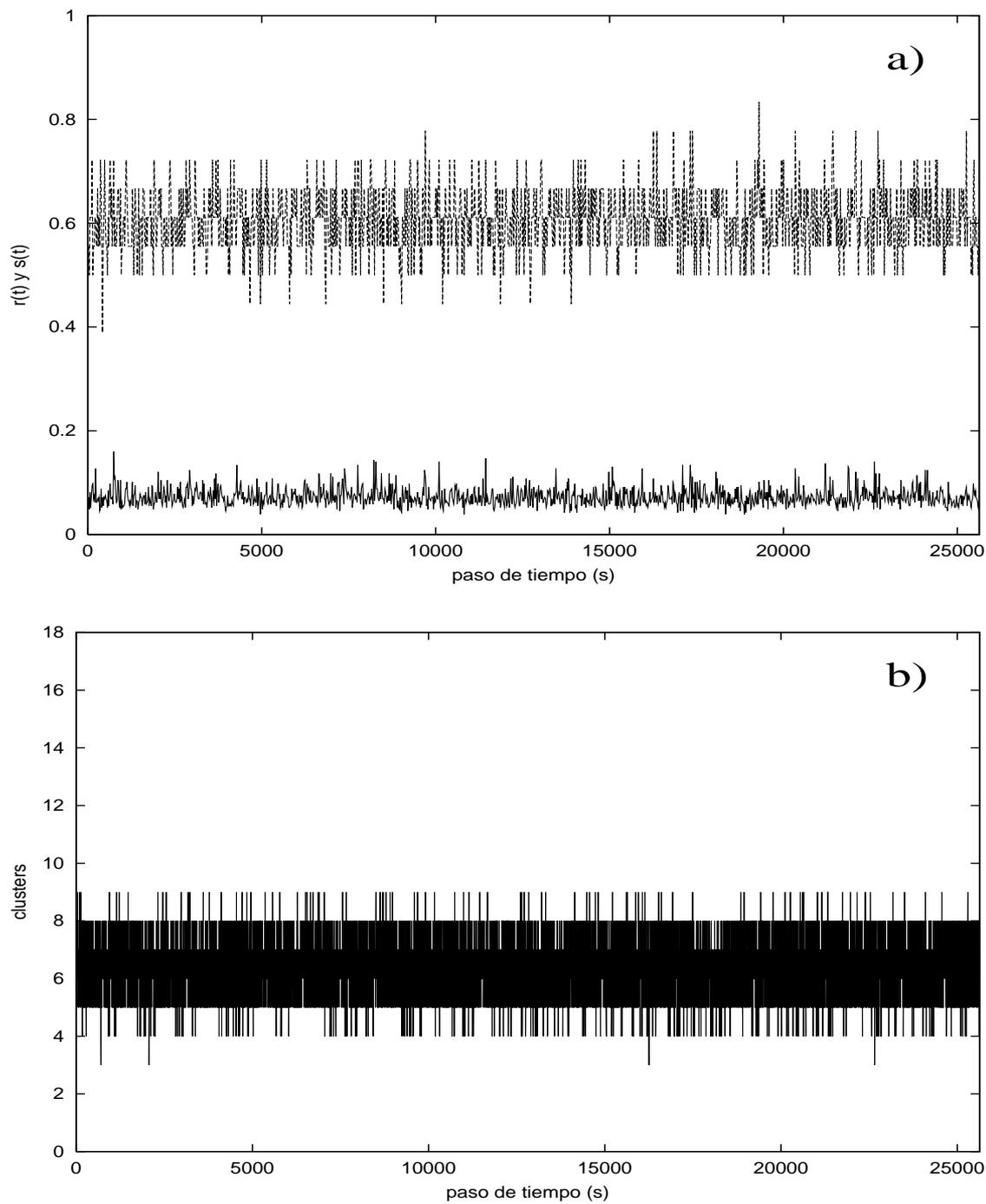


Figura 5.15: *Paciente patológico N° 3. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

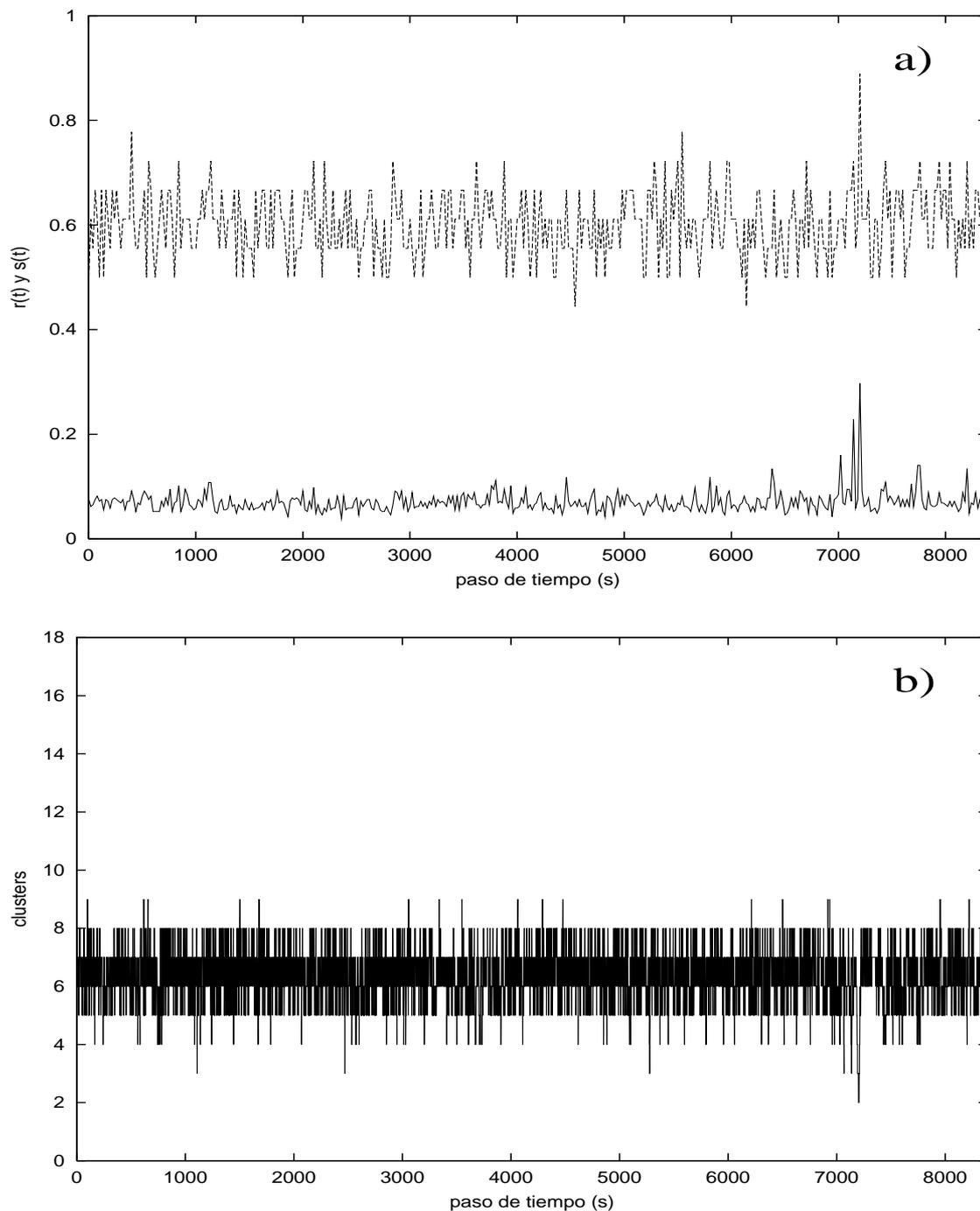


Figura 5.16: *Paciente patológico N° 4. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

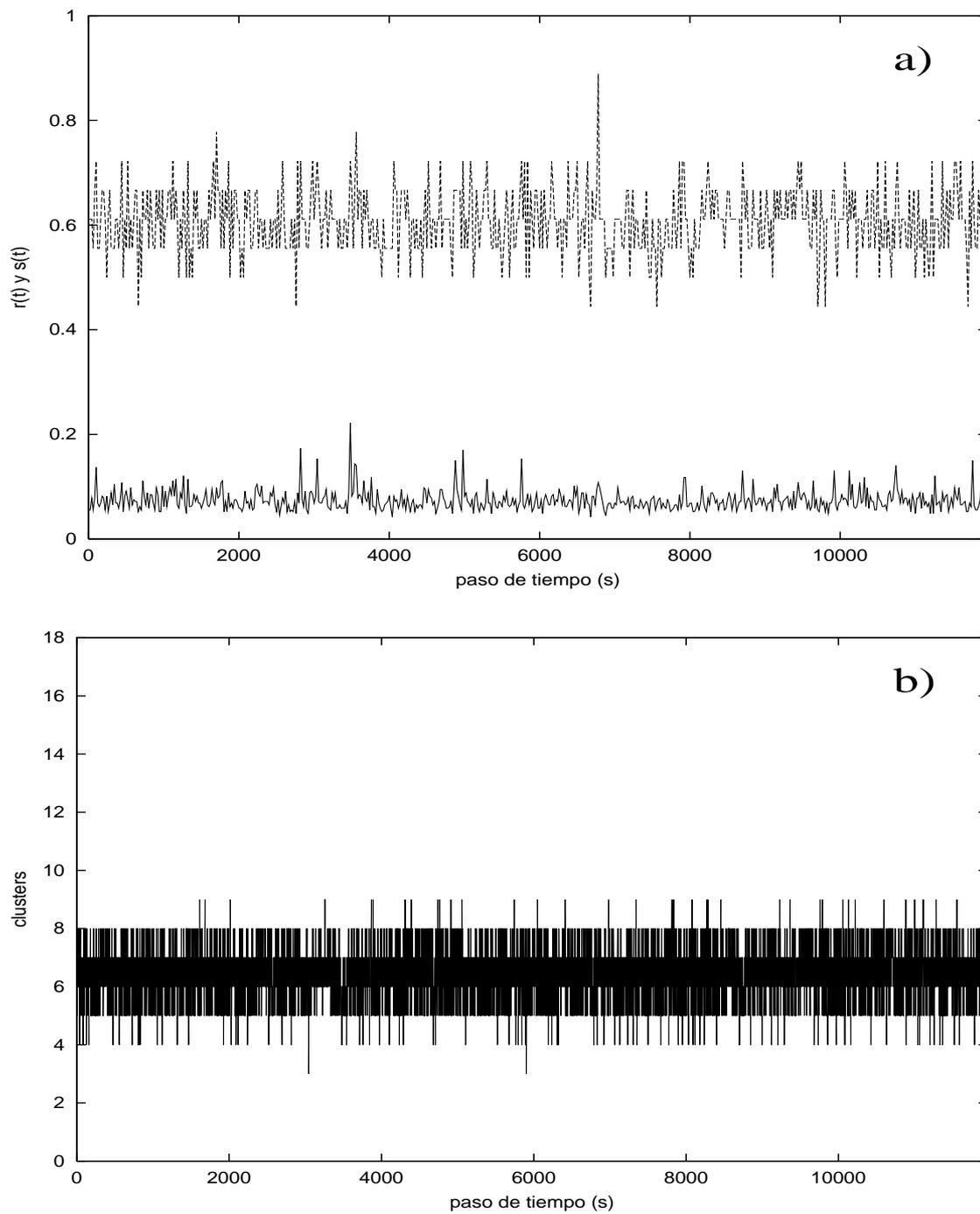


Figura 5.17: *Paciente patológico N° 5. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

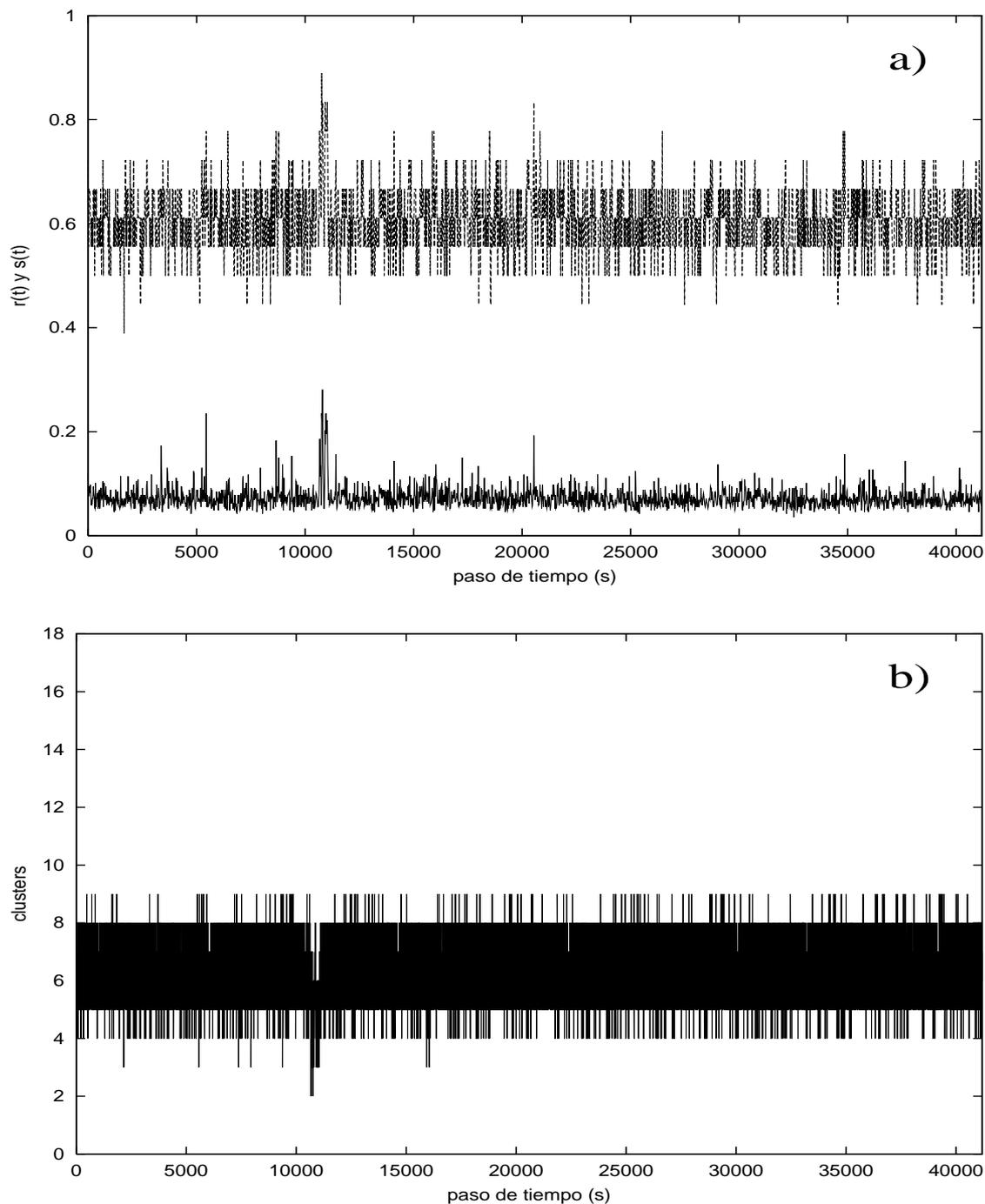


Figura 5.18: *Paciente patológico N° 6. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

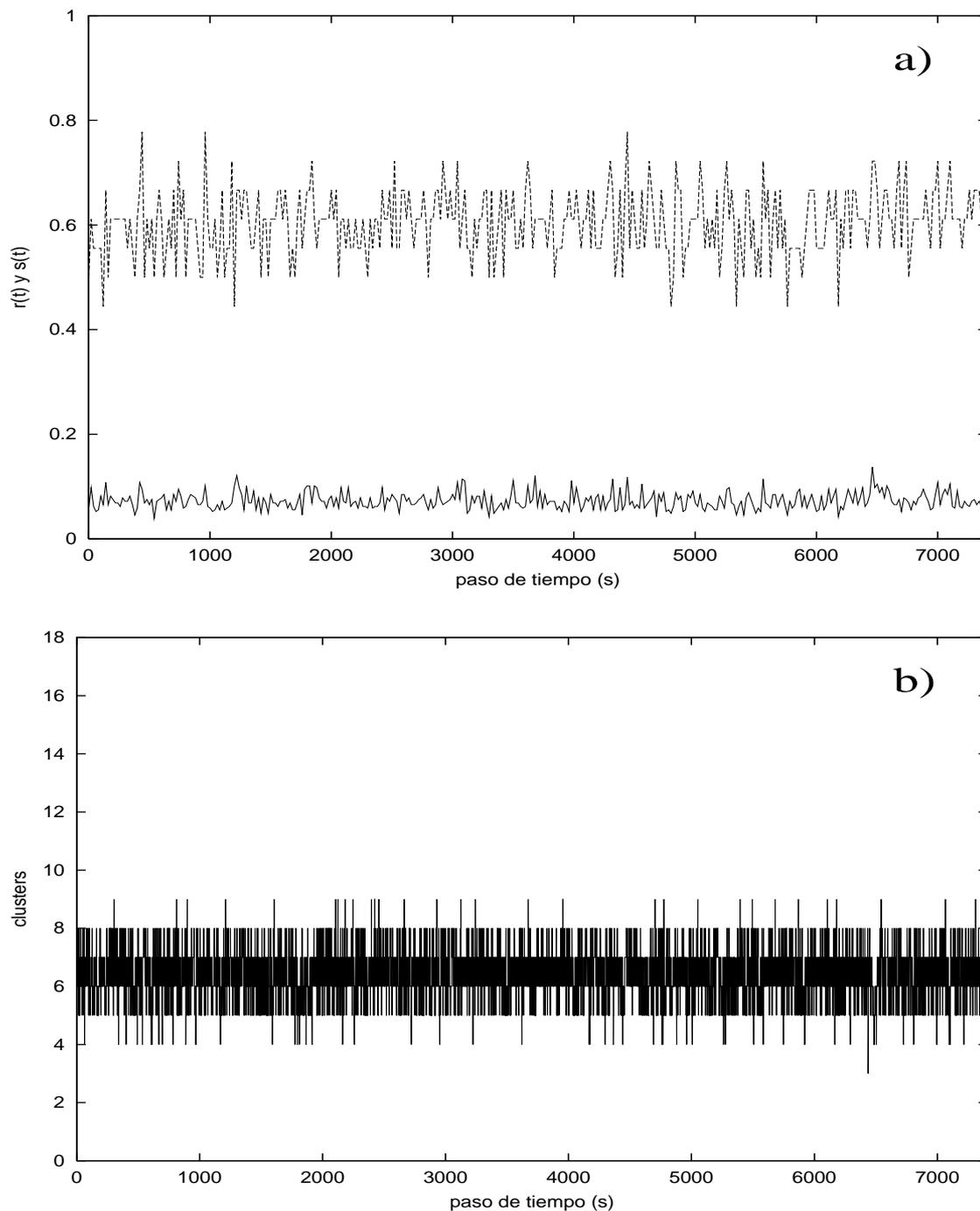


Figura 5.19: *Paciente patológico N° 7. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

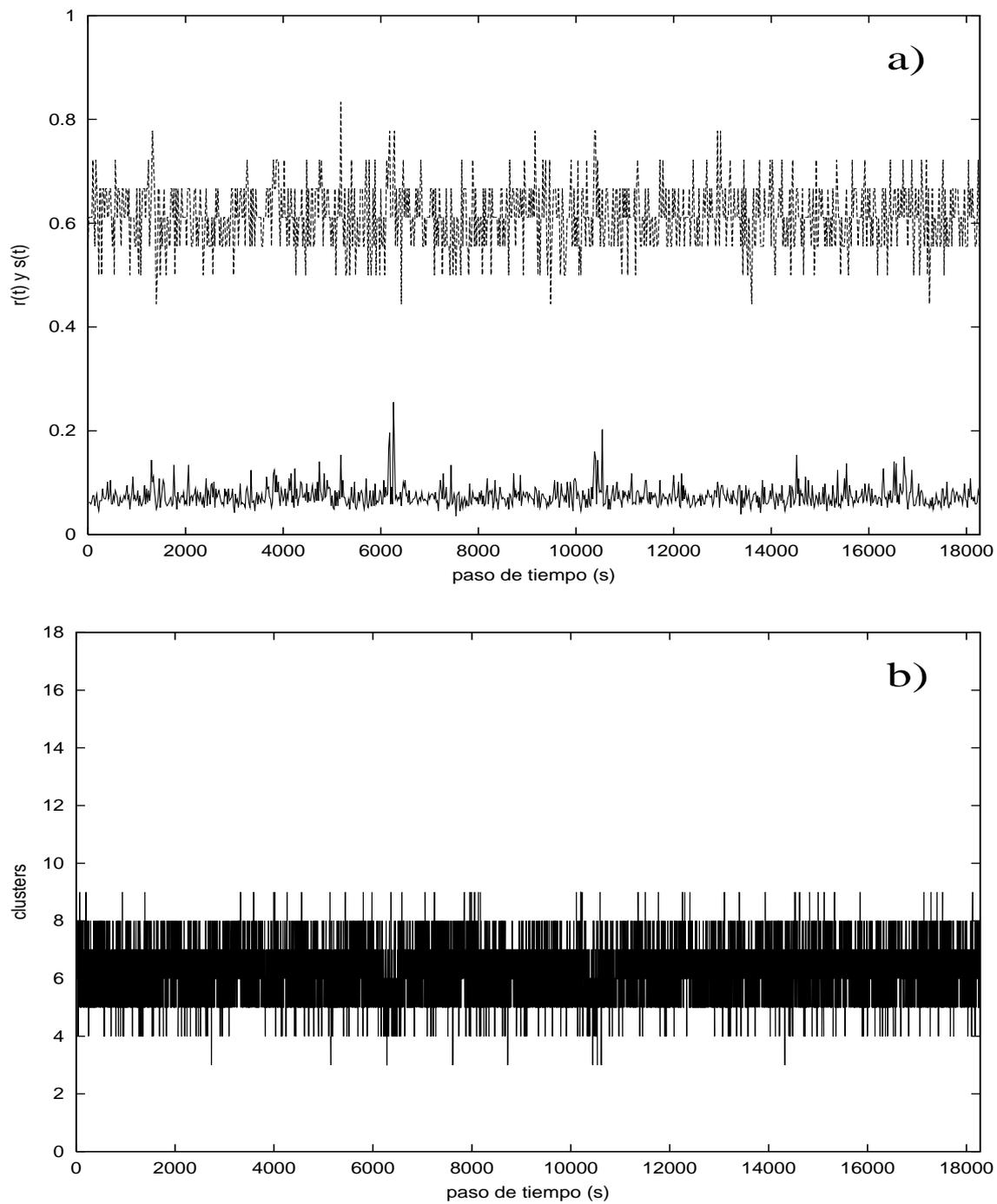


Figura 5.20: *Paciente patológico N° 8. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

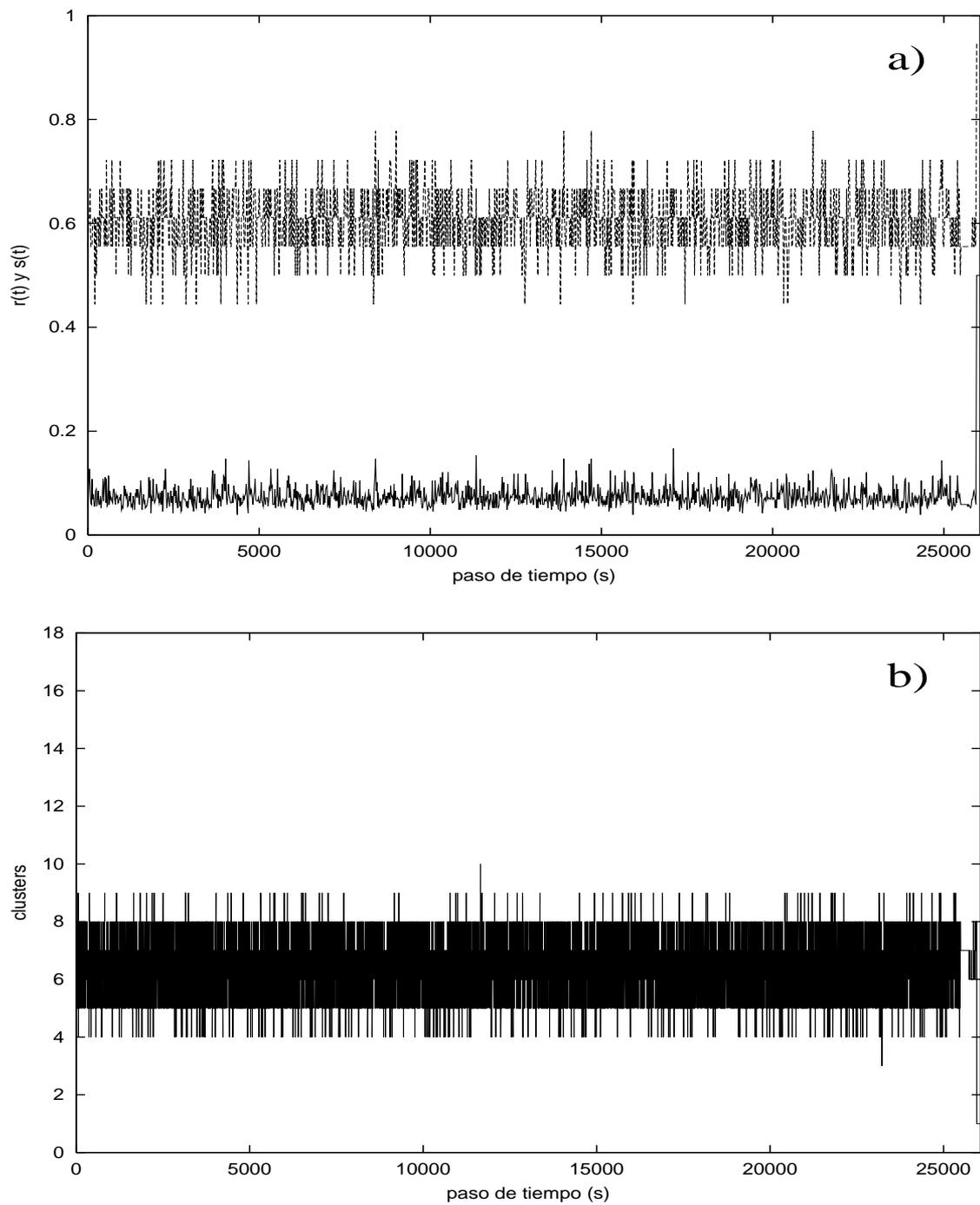


Figura 5.21: *Paciente patológico N° 9. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

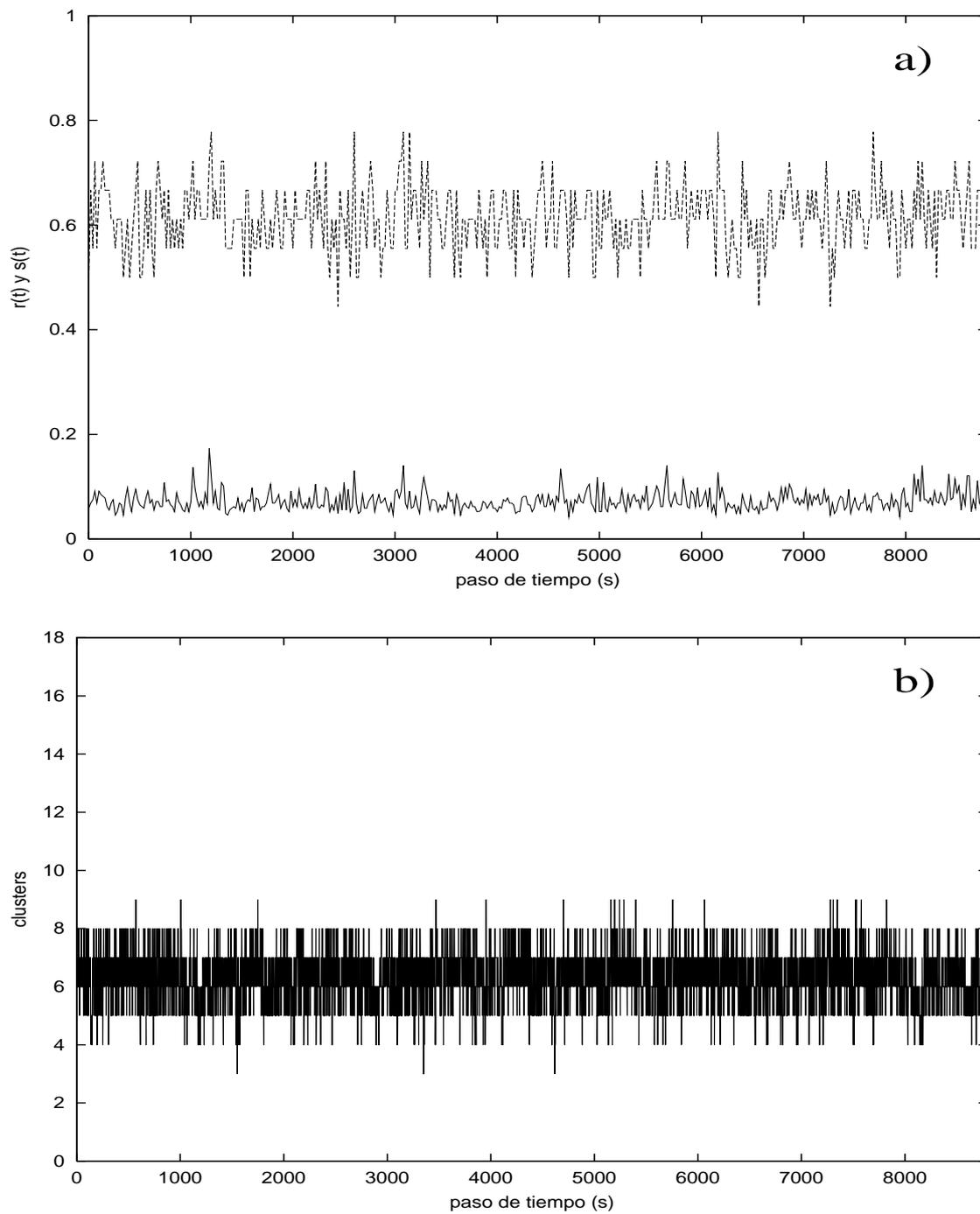


Figura 5.22: *Paciente patológico N° 10. a) Parámetros de sincronización $r(t)$ y $s(t)$ como función del tiempo. b) Cantidad de clusters formados por la actividad eléctrica cerebral.*

estarían formando *clusters*, sino que, todas estarían formando el mismo *cluster*, lo que nos lleva a que las señales eléctricas registradas serían idénticas unas de otras.

Durante el análisis de esta sección se ha notado que la manifestación del aumento de la sincronización de la señal estudiada se da unos instantes antes al inicio de la crisis epiléptica, de hecho para este paciente el primer aumento de la sincronización se da dos segundos antes de la crisis.

La señal EEG analizada en los párrafos anteriores, pertenece a un paciente patológico durante una crisis epiléptica que sucedió de manera espontánea. El resto de las señales electroencefalográficas que se encuentran en la base de datos de esta tesis, son señales EEG de pacientes a los que se les ha diagnosticado epilepsia, pero de los cuales no tenemos su registro EEG durante una crisis.

En las Figuras 5.14 - 5.22 se presentan los resultados obtenidos con el resto de las señales electroencefalográficas de la muestra de pacientes patológicos, en el Apéndice A se puede observar una tabla con los tiempos de muestreo de cada una de las señales utilizadas en este estudio.

5.3 Discusión

Observando las figuras presentadas en las Secciones 5.1 y 5.2, es difícil establecer una diferencia contundente entre los sujetos sanos y los pacientes patológicos, ya que los resultados arrojados por los parámetros $r(t)$ y $s(t)$, así como la cantidad de *clusters* formados por cada sujeto en estudio son muy similares entre sí. Sin embargo, se pudo observar que, los parámetros $r(t)$ y $s(t)$ de los pacientes con epilepsia, aumentaron su valor muy ligeramente con respecto a los del grupo de sujetos sanos. Asimismo, el número de *clusters* encontrados en los pacientes con patología epiléptica disminuyó ligeramente con respecto al número observado en los sujetos sanos. Para mostrar que ciertamente existe diferencia entre los datos electroencefalográficos del sujeto sano, paciente con epilepsia y paciente con epilepsia durante una crisis generalizada, se ha calculado la desviación estándar de las series de tiempo de los parámetros de orden. En la siguiente tabla se muestran los valores de la desviación estándar y valor

medio de los datos EEG.

	Sujeto Sano	Paciente Epiléptico	Paciente Epiléptico con crisis
Sd de $s(t)$	4.32×10^{-3}	3.93×10^{-3}	6.06×10^{-3}
Media de $s(t)$	0.606	0.604	0.647
Sd de $r(t)$	4.04×10^{-4}	2.59×10^{-4}	4.04×10^{-3}
Media de $r(t)$	0.075	0.073	0.104

Tabla 5.1: *Desviación estándar (Sd) y valores medios de las series $r(t)$ y $s(t)$ de un sujeto sano, un paciente con epilepsia y un paciente durante una crisis epiléptica generalizada.*

La desviación estándar de las distintas series $s(t)$ no muestran una diferencia significativa. Por otra parte, en la serie $r(t)$, se tiene que, existe una diferencia de un orden de magnitud entre el sujeto sano y el paciente durante una crisis epiléptica generalizada, mientras que con el paciente epiléptico sin crisis, la desviación estándar es de casi la mitad del valor encontrado para el sujeto sano.

Tomando en cuenta las descripciones realizadas en las Secciones 4.3 y 4.4, se puede realizar una comparación de las medidas de los parámetros de sincronización y la formación de *clusters* de la señal EEG de uno de los sujetos sanos y la señal EEG del paciente epiléptico durante la crisis generalizada. En este caso, podemos diferenciar claramente que en el caso del sujeto sano, se observa una cantidad mínima de 3 *clusters* y un máximo de 7; en el caso del electroencefalograma del paciente epiléptico, durante la crisis, se puede observar un menor número de *clusters* formados, alcanzando un mínimo de 1 y un máximo de 10 *clusters*.

Con respecto a los parámetros de sincronización encontramos que en el sujeto normal, $r(t)$ mantiene valores bajos los cuales son evidentemente superados por los valores de este mismo parámetro en el paciente epiléptico, además, $s(t)$ presenta ciertos picos muy bien definidos en el registro eléctrico cerebral del paciente epiléptico, más específicamente dos segundos antes del inicio de la crisis epiléptica, el cerebro presenta un nivel de sincronización bastante alto con respecto a los valores encontrados en el sujeto sano, en donde la evolución de la serie $s(t)$ es regular y no presenta picos fuera de un cierto rango. También se puede observar que no sólo se

presenta un aumento de la sincronización momentos antes a la crisis, sino que también al inicio de ésta y durante el transcurso de la misma, notando que este aumento de la sincronización no permanece constante durante toda la crisis epiléptica, sino que los niveles de sincronización descienden a niveles normales y ascienden a niveles mayores donde el EEG normal no logra alcanzar.

El hecho de que la sincronización aumenta durante el inicio de la crisis y en ciertos intervalos durante la misma, nos lleva a pensar que el sistema nervioso intenta inducir caos en el cerebro para desplazarlo de un estado de sincronía.

Ahora ni siquiera sabemos si nos rodea un laberinto, un secreto cosmos, o un caos azaroso. Nuestro deber es imaginarnos el hilo y el laberinto. Nunca daremos con el hilo; acaso lo encontramos y lo perdemos en un acto de fé, en una cadencia, en un sueño, en las palabras que se llaman filosofía o en la mera y sencilla felicidad.

Jorge Luis Borges, Los conjurados.

Conclusiones

Los estudios realizados previamente sobre la sincronización de series de tiempo tanto de datos teóricos arrojados por el sistema de ecuaciones de Rössler, como los datos experimentales obtenidos del EEG humano, han considerado que se han llevado a cabo sobre sistemas complejos que involucran no-linealidad.

Gran parte del trabajo en la presente tesis se ha enfocado al estudio de la sincronización de series de tiempo provenientes de sistemas globalmente acoplados, esto es, sistemas con interacciones globales – “*todos interactuando con todos*” – que ocurren en muchas situaciones y en diversos contextos.

Las redes de elementos globalmente acoplados constituyen un modelo mínimo que contiene los ingredientes esenciales que permiten describir la fenomenología de este tipo de sistemas, como es el caso del sistema de Rössler y el Sistema Neuronal; en estos sistemas se pierde el significado de entorno espacial y solamente las propiedades temporales resultan relevantes.

Entre los aportes de este trabajo, se encuentra el hecho que algunos autores [15], han resuelto el sistema de Rössler –estudiado en este trabajo– bajo el esquema de diferencia finita, mientras que en la presente tesis se ha usado el Método de Runge–Kutta de cuarto orden, encontrando resultados similares a los presentados en la

literatura.

La investigación realizada presenta una unión entre lo teórico y lo experimental, debido a que el estudio realizado sobre los osciladores de Rössler requiere un tratamiento teórico de los mismos; en este estudio se ha encontrado que el comportamiento caótico de un sistema no-lineal, de manera fascinante, alcanza a ordenarse o formar dominios dinámicos por medio de la introducción de una señal ruido, acelerando así, la formación de *clusters*. Otro estudio realizado dentro de este ámbito teórico fue la variación de la formación de dominios dinámicos con respecto a la intensidad de acoplamiento de los osciladores y el estudio de los parámetros de orden para medir la sincronización de un sistema acoplado. El estudio sobre los osciladores de Rössler globalmente acoplados, se ha realizado con la intención de comprobar la herramienta numérica de los efectos del ruido sobre sistemas acoplados y los parámetros de orden. En otro orden de ideas, en el aspecto experimental de esta investigación, tenemos el análisis de las series de tiempo dadas por el EEG humano, en el que aplicamos las herramientas usadas para el sistema teórico.

El análisis de la sincronización y formación de *clusters* de las señales electroencefalográficas de sujetos sanos y pacientes epilépticos, evidencia cambios de la actividad cerebral en las señales EEG bajo estudio.

En el estudio realizado de la formación de dominios dinámicos en el cerebro, el análisis del EEG del paciente epiléptico que experimentó una crisis durante la adquisición de la señal, se encontró que instantes antes de dar inicio a la crisis epiléptica las neuronas experimentan una sincronización momentánea. Esta investigación científica no pretende generalizar sobre el comportamiento clínico de la epilepsia ni de otras patologías asociadas al cerebro.

Un aporte importante de este tipo de trabajo es brindar nuevas herramientas de la Físico-Matemática-Computacional que sirvan de apoyo *a los médicos* para un mejor diagnóstico clínico.

El autor se siente orgulloso de presentar a usted esta pequeña contribución que formará parte de la nueva *Neurodinámica*.

La teoría de la complejidad es una teoría aún en fase de crecimiento. Su completo desarrollo requerirá décadas, pero no cabe duda de que es mucho lo que ya se ha logrado. Aunque el camino a recorrer es largo y los retos muy numerosos, de algo sí podemos estar seguros: *el primer asalto a la fortaleza de la complejidad ya ha comenzado.*

Bibliografía

- [1] R. Solé y S. Manrubia. *Orden y Caos en Sistemas Complejos*. Ediciones UPC, Barcelona, España (1996).
- [2] G. J. Sussman y J. Wisdom. *Science* **241**, 433 (1988).
- [3] H. G. Schuster. *Deterministic Chaos: An Introduction*, Physik-Verlag, Weinheim (1988).
- [4] M. Lakshmanan y K. Murali. *Chaos in no-linear Oscillators: Controlling and Synchronization*. World Scientific, Singapore (1996).
- [5] L. Glass y M. Mackey. *Ann. of New York Acad. of Sci.* **35**, 214 (1979).
- [6] M. A. Matías y J. Güémez. *Phys. Lett. A*, **209**, 48 (1995).
- [7] K. S. Halle, C. W. Wu, M. Itho, L. O. Chua. *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, **3**, 469 (1993).
- [8] Lj. Kocarev, K. S. Halle, K. Eckert, L. O. Chua, U. Parlitz. *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, **2**, 709 (1992).
- [9] R. Lozi y L. O. Chua. *Int. J. of Bifurcation and Chaos* **3**, 1319, (1993).
- [10] C. A. Skarda y W. J. Freeman. *Behavioral and Brain Science* **10**, 161 (1987).
- [11] K. R. Delaney, A. Gelperin, M. S. Fee, J. A. Flores, R. Gervais, D. W. Tank y D. Kleinfeld. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **91**, 669 (1995).
- [12] H. Fujisaka y T. Yamada. *Prog. Theor. Phys.* **69**, 32 (1983).
- [13] L. M. Pecora y T. L. Carroll. *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 821 (1990).

- [14] J. F. Heagy, L. M. Pecora y T. L. Carroll. *Phys. Rev. E*, **50**, 1874 (1994).
- [15] D. H. Zanette y A. S. Mikhailov. *Phys. Rev. E*, **62**, 7571 (2000).
- [16] A. S. Mikhailov y A. Yu. Loskutov. *Foundations of Synergetics II* (Springer, Berlin, 1991; 2da Edición Revisada, 1995).
- [17] S. C. Manrubia y A. S. Mikhailov. *Phys. Rev. E*, **60**, 1579 (1999).
- [18] D. H. Zanette y A. S. Mikhailov. *Phys. Rev. E*, **57**, 276 (1998).
- [19] W. Wang, I. Z. Kiss y J. L. Hudson. *Chaos*, **10**, 248 (2000).
- [20] W. Duke y W. S. Pritchard. *Proceedings of the conference on Measuring Chaos in Human Brain*. World Scientific, Singapore (1991).
- [21] P. E. Rapp, T. Bashore, J. Martinerie, A. Albano, I. Zimmerman y A. Mess. *Dynamics of brain electrical activity*. *Brain Topography*, 2:99-118. (1989).
- [22] M. C. Casdagli, L. D. Iasemidis, R. S. Savit, R. L. Glimore, S. N. Roper y J. C. Sacklelares. *Non-linearity in invasive EEG recordings from patients with temporal Lobe Epilepsy*. *Eletroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1, 102, 98. (1997).
- [23] A. Babloyantz. *Chaotic dynamics in brain activity*. *Dynamics of sensory and cognitive processing by the brain*. E. Basar (Eds.), Springer, Berlin (1988).
- [24] Enciclopedia Médica en Español. *Electroencefalograma*. URL: <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003931.htm>
- [25] A. Gimeno-Alava. *Epilepsia: guía práctica*. Madrid: Acción Médica; (1994).
- [26] J. Roger, M. Bureau, Ch. Dravet, F.E. Dreifuss, A. Perret, P. Wolf. *Epileptic Syndromes. In infancy, childhood and adolescence*. London: John Libbey; (1992).
- [27] S. Arroyo. *Guía para la epilepsia*. Grupo de Estudio de la Epilepsia de la Sociedad Española de Neurología. URL: <http://www.epilepsiasen.org/apublica/guiaepile.htm>. (1999).

Apéndice A

Tabla de tiempos de las señales EEG

A.1 Señales del grupo de sujetos sanos

Sujeto de muestra	Tiempo aproximado de muestreo (seg)	Cantidad de datos
Sujeto N° 1	49.66	12714
Sujeto N° 2	109.92	28139
Sujeto N° 3	80.55	20622
Sujeto N° 4	65.36	16733
Sujeto N° 5	49.92	12779
Sujeto N° 6	30.00	7680
Sujeto N° 7	30.00	7680
Sujeto N° 8	89.85	23008
Sujeto N° 9	60.13	15393
Sujeto N° 10	60.00	15360

Tabla A.1: Tiempos de muestreo de las señales EEG de sujetos sanos.

A.2 Señales del grupo de pacientes epilépticos

Paciente de muestra	Tiempo aproximado de muestreo (seg)	Cantidad de datos
Paciente N° 1	62.60	16027
Paciente N° 2	151.91	38890
Paciente N° 3	32.77	8389
Paciente N° 4	100.12	25631
Paciente N° 5	46.70	11956
Paciente N° 6	160.85	41178
Paciente N° 7	28.93	7408
Paciente N° 8	71.39	18275
Paciente N° 9	101.81	26063
Paciente N° 10	34.37	8797

Tabla A.2: Tiempos de muestreo de las señales EEG de pacientes patológicos.

Apéndice B

Glosario para físicos

Coma: Pérdida prolongada y mantenida de la conciencia, de tal forma que es imposible despertar al paciente. Existen distintos niveles de profundidad en relación a la presencia o ausencia de distintos reflejos y de la reactividad ante el dolor. El origen puede tener causas neurológicas, metabólicas u otras.

Convulsión: Contracción violenta e involuntaria de uno o más miembros o músculos del cuerpo.

Electroencefalograma: Gráfico obtenido por el electroencefalógrafo en el que se registran las diferencias de potencial producidas en las células cerebrales.

Epilepsia: Enfermedad neurológica producida por una disfunción en la actividad eléctrica de la corteza cerebral y que se caracteriza por crisis convulsivas con pérdida brusca del conocimiento.

Etiología: Parte de la medicina que tiene por objeto el estudio de las causas de las enfermedades. Causa de una enfermedad.

Fisiología: Ciencia que estudia las funciones de los seres orgánicos.

Neurona: Célula diferenciada perteneciente al sistema nervioso, capaz de propagar el impulso nervioso a otra neurona. Está compuesta por una zona de recepción, las dendritas, y otra de emisión o salida, el axón o neurita: se dice que a partir de cierta edad se acelera el proceso de pérdida de neuronas.

Meningitis: Inflamación de las meninges debida generalmente a una infección.

Neurología: Rama de la medicina que estudia las enfermedades del sistema nervioso.

Patología: Parte de la medicina que estudia las enfermedades; enfermedad, dolencia.

Quiste: Tumor formado por una cavidad rellena de diversas sustancias que se desarrolla en organismos vivos por alteración de los tejidos.

Ruido: Perturbación o señal anómala que se produce en un sistema y que impide que la información llegue con claridad.

Tomografía Axial Computarizada: Técnica de obtención de imágenes por planos o cortes que, dependiendo del equipo empleado, es analógica o digital.

Torunda: Bola de algodón envuelta en gasa esterilizada, con diversos usos en curas y operaciones quirúrgicas.

Tumor: Hinchazón y bulto que se forma anormalmente en alguna parte del cuerpo. Alteración patológica de un órgano o de una parte de él, producida por la proliferación creciente de las células que lo componen.