

## **Capítulo 3. Análisis de Estacionaridad y Detección del Determinismo No Lineal**

### **3.1 Introducción**

En el contexto de los sistemas dinámicos complejos, es conveniente garantizar algunas condiciones que deben presentar los parámetros de análisis, antes de proceder a su estudio grafo-analítico. Estas condiciones se resumen en dos importantes características, que a manera de requisito deben poseer las series temporales de las variables de estudio, que son, primero, verificar que el sistema está en estado estacionario, y segundo, comprobar la no linealidad del conjunto de series temporales.

El análisis de estacionaridad sirve para comprobar que durante la adquisición de las señales, el sistema se mantiene en un estado estacionario definido al no presentar cambios sustanciales en las medias y las varianzas de las variables durante la medición (Floss y Gutiérrez, 1995). Los sistemas abiertos (con intercambio de materia y energía) en estado estacionario, como los sistemas biológicos, se encuentran lejos del equilibrio termodinámico, y las perturbaciones debidas a la interacción con el medio son absorbidas por un proceso autoorganizativo fundamentado en el orden por fluctuaciones (Nicolis y Prigogine 1994).

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 46

La identificación de la no linealidad de las series temporales se obtiene con un método de cálculo estadístico conocido como de la hipótesis nula, para el cual se generan varias series complementarias de datos, que poseen una relación indirecta con los datos originales, basado en una especie de barajeo de fases y amplitudes entre datos. A las series temporales así generadas se les da el nombre genérico de *surrogate data*. Luego se escoge algún índice paramétrico para obtener una discriminación estadística entre los datos originales y los *surrogate data*, y si este discriminador demuestra una diferencia apreciable entre ambas series, significa que la hipótesis nula debe ser rechazada y la serie original cumple con la condición de no linealidad (Theiler et al, 1992).

### **3.2 Análisis de Estacionaridad**

#### **3.2.1 Test de Estacionaridad a las Series Temporales Completas**

Los métodos de análisis lineal y no lineal, requieren de mediciones cuyas condiciones de registro sean estacionarias, y que a su vez garanticen la posibilidad de reproducción de las mediciones bajo condiciones similares a las originales. La condición estacionaria de un sistema físico está determinada por la independencia respecto al tiempo, del proceso de medición. Una manera práctica de poder garantizar esta independencia estacionaria a los registros volumétricos adquiridos se produce al realizar una prueba o test a las señales en estudio, en donde se puedan evaluar los rangos permitidos de la variable, con condiciones de variación acotadas dentro de valores aceptables definidos previamente de manera objetiva (Kantz y Schreiber, 1997; Kaplan, 1999).

El test estacionario resulta ser un requisito para posteriores análisis cualitativos y cuantitativos del sistema, y como tal, ha sido aplicado a todos los registros de la base de datos PRI-HSCSP, indicando como resultado cuales de ellos cumplen con la condición de registros estacionarios, y rechazando los restantes (González et al, 2001).

El método utilizado en este trabajo para realizar el test estacionario, consistió en dividir cada registro temporal en 10 sucesivas segmentaciones de igual duración cada una, según la metodología seguida por otros autores (Hoyer et al, 1997). Posteriormente se grafica cada parámetro asociado a las sucesivas segmentaciones, y se compara estadísticamente con el valor medio de la señal

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 47

utilizada. Una condición ventilatoria *no estacionaria*, se manifiesta en los gráficos al encontrarse alguna de las siguientes características:

- Apreciándose grandes variaciones entre segmentos consecutivos, lo cual indica que existen cambios apreciables en los valores del parámetro para el valor considerado.
- Al presentarse pocas alternancias alrededor del valor medio del registro, lo cual significa que existe un alejamiento de los valores promedios de los segmentos con respecto a la media de todo el registro.

Cambios demasiado acentuados, que además se repitan en diferentes parámetros y sobre el mismo segmento, indican la existencia de una condición ventilatoria no estacionaria, que requiere definir unos *criterios de rechazo* de la señal, que a su vez sean objetivos y medibles. Estos criterios de rechazo deben corresponderse a las condiciones relativas a cada registro experimental, de manera de poder definir un test que permita realizar comparaciones estadísticas entre los parámetros asociados al sistema dinámico en estudio (Kaplan, 1999).

En los registros de volumen ventilatorio y las series temporales generadas a partir de su procesamiento, se aplicó un test estacionario, basado en un algoritmo con tres criterios de rechazo, que permite determinar cuando un registro de patrón ventilatorio presenta suficientes condiciones de *no estacionaridad*, no supera el test y por lo tanto debe ser rechazado. El test estacionario fue aplicado a los siguientes cuatro parámetros:

- Volumen circulante continuo  $V(t)$ ,
- Desviación estándar del volumen circulante continuo  $V(t)$ ,
- Serie temporal de tiempo total  $T_{TOT}$ ,
- Serie temporal de volumen  $V_T$ .

Las cuales consideradas en su conjunto representan de manera suficientemente general las diversas condiciones que pudiera presentar la dinámica fisiológica del SR. Para que la estacionaridad de esta dinámica pueda ser analizada con mayor facilidad, fue necesario normalizar los valores medios de cada una de las señales. El promedio de la señal de volumen circulante continuo  $V(t)$ , fue normalizado a cero (debido a que la señal de volumen oscila cíclicamente con valores positivos y negativos), mientras que el promedio de las otras tres señales

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 48

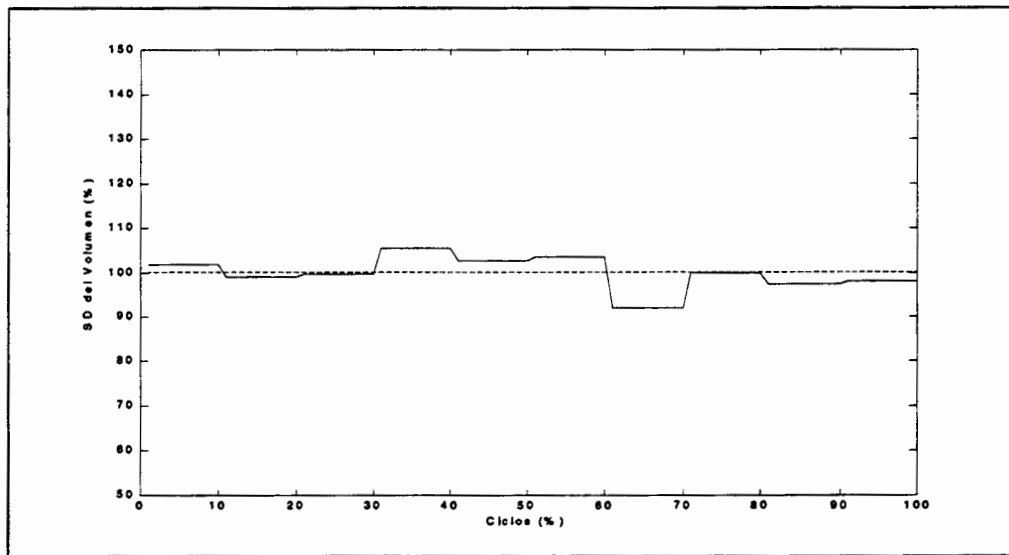
fue normalizado a 100. El procedimiento aplicado a estas cuatro señales normalizadas corresponden al test estacionario del patrón ventilatorio que se describe a continuación:

- Para cada parámetro se determinan los segmentos de señal con variaciones (en valor absoluto) de amplitud mayores a 20% de la señal promediada.
- La variación definida en (a) debe ser anterior o posterior a otro segmento con la misma tendencia (mayor o menor del promedio), para el mismo parámetro.
- En el mismo segmento de señal definido en (a), pero en alguna otra serie temporal diferente a la que presenta variación excesiva de amplitud, debe existir una misma tendencia al alejamiento del valor medio, y presentarse esta tendencia en al menos dos segmentos consecutivos.

Este algoritmo de tres criterios aplicado a los registros del patrón ventilatorio permiten detectar, por un lado, grandes cambios del parámetro en dicho intervalo (y por lo tanto alejamiento de la condición estable), y por otro lado, la ubicación de segmentos consecutivos con una misma tendencia, lo cual significa una pérdida de estacionaridad en la señal total, al no cumplirse la condición de alternancia alrededor del valor medio. Estas tres normas definen de manera concreta la condición de no estacionaridad de un registro obtenido por pletismografía respiratoria por inductancia, similar a los obtenidos en la base de datos PRI-HSCSP.

En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de las variaciones asociadas a la desviación estándar del volumen circulante, con alternancia de los segmentos y cambios que no sobrepasan el 10% del valor medio, lo cual indica que el registro tiene reducida dependencia del tiempo, y su desviación estándar puede ser considerada como de una dinámica con estabilidad ventilatoria.

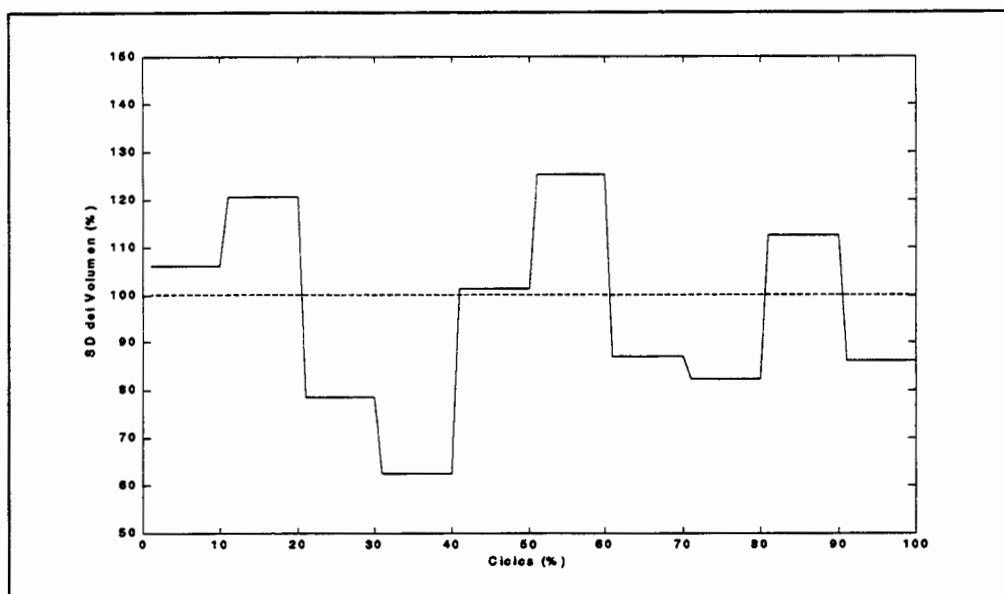
La figura 3.2, muestra el caso contrario, en donde los cambios son más acentuados, presentándose incrementos próximos al 30% y decrementos próximos al 40% del valor medio de la desviación estándar del volumen circulante, lo cual indica que en el segundo, cuarto y sexto segmento existen acusadas variaciones en el registro.



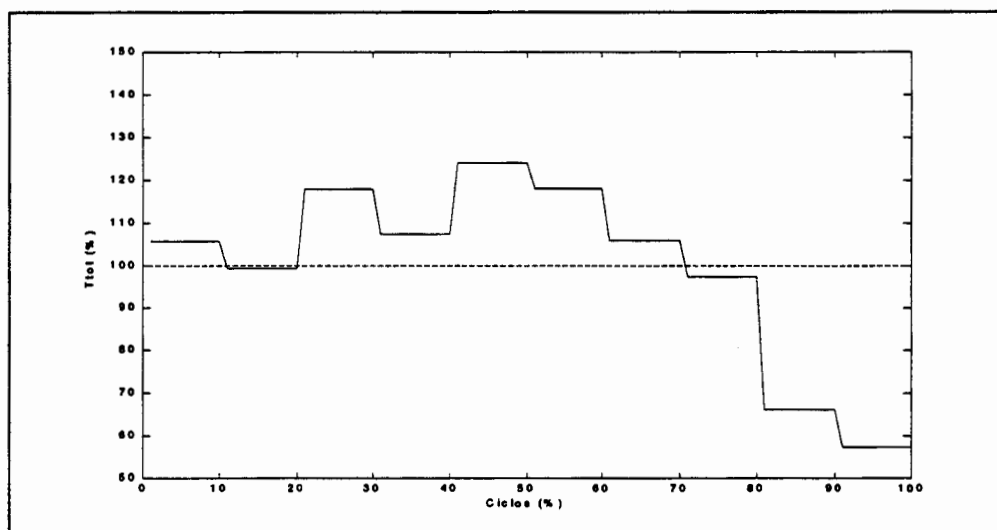
**Figura 3.1** Test estacionario para la desviación estándar de volumen del registro SatSB.

La alternancia de los valores medios de los segmentos consecutivos se cumple solo parcialmente, pues dicha alternancia ocurre sólo en los últimos tres segmentos, mientras que los restantes segmentos no cumplen con la segunda condición excluyente de estacionaridad, que ubica su pérdida en la sucesión de dos segmentos consecutivos, superiores (o inferiores) a la media del registro completo. En la figura 3.3, se muestra un registro de la serie temporal de  $T_{TOT}$ , en donde se puede apreciar con más claridad la pérdida de alternancia de valores medios de los segmentos.

Los registros de formas análogas a los mostrados en las figuras 3.2 y 3.3 corresponden a señales *no estacionarias*, por presentar las limitaciones impuestas por las condiciones de restricción previamente descritas, y por ello no convenientes de ser utilizadas para los estudios de complejidad de sistemas dinámicos.



**Figura 3.2** Test estacionario de la desviación estándar de volumen del registro FcsSB.

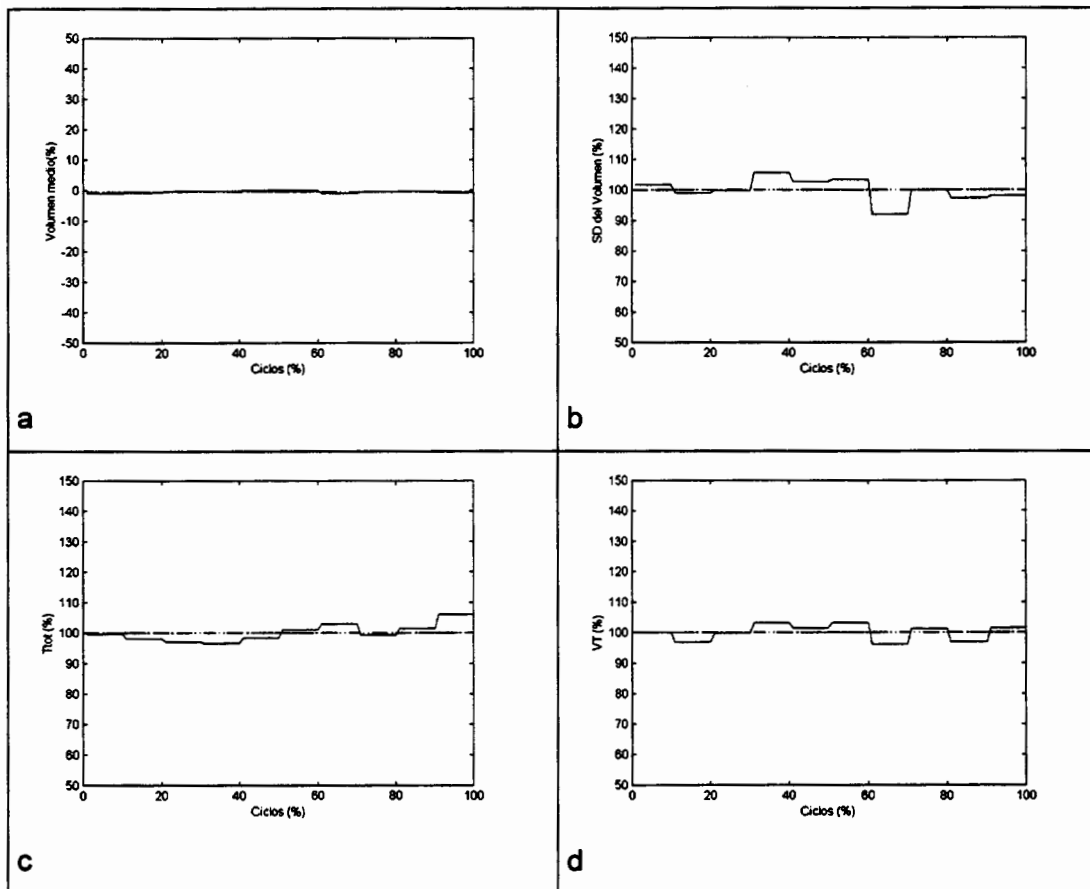


**Figura 3.3** Test estacionario del valor medio de  $T_{TOT}$  del registro JgcSA.

En la figura 3.4 se muestran las cuatro gráficas correspondientes al registro del paciente SatSB, con medidas de presión de soporte bajo, que si cumple con las condiciones de restricción que plantea el test estacionario. En estas figuras se aprecia que ninguno de los diez segmentos en que está dividida cada señal,

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 51

sobrepasa el 20% del valor medio de la señal completa, para ninguna de las cuatro figuras mostradas. Asimismo se puede apreciar la presencia de una alternancia de los valores de cada segmento alrededor del valor medio, sin mostrar un todo su conjunto ningún sesgo importante que indique claramente una tendencia única en la señal. Estos dos factores demuestran una independencia y estacionaridad respecto al tiempo, del registro de volumen ventilatorio pulmonar correspondiente al paciente SatSB.



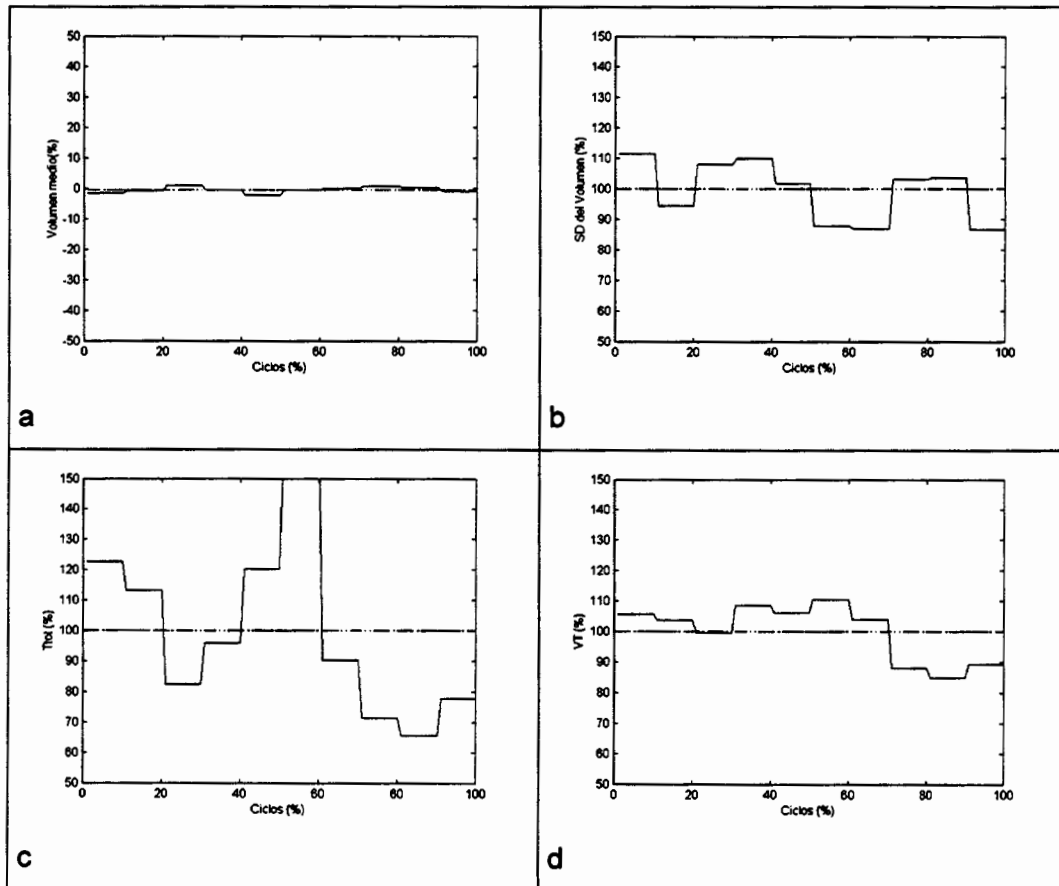
**Figura 3.4** Registro Estacionario SatSB. a. Señal del volumen circulante  $V(t)$ , b. Desviación estándar del volumen circulante, c. Serie temporal de  $T_{TOT}$ , d. Serie temporal de  $V_T$ .

Todas las señales están normalizadas en amplitud y número de ciclos.

El caso contrario, en donde las series temporales del registro se grafican con sus correspondientes segmentaciones, y que luego de aplicar la correspondiente prueba, resulta definido como no estacionario, se muestra en la

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 52

figura 3.5. Allí se puede apreciar que el sexto segmento de la serie temporal de  $T_{TOT}$  (abajo y a la izquierda) llega a variaciones del 50% sobre la media de toda la serie temporal (criterio a). Este segmento es consecutivo a uno que muestra la misma tendencia de sobrepasar la media en la misma figura (criterio b). Los segmentos 4, 5, 6 y 7 de la serie temporal de  $V_T$ , presentan todos valores por encima del valor medio de todo el registro (criterio c). El resultado es que el registro de volumen ventilatorio JbmSA no es estacionario, y por lo tanto no debe ser utilizado en el análisis de complejidad del sistema respiratorio.



**Figura 3.5** Registro No Estacionario JbmSA. a. Señal del volumen circulante  $V(t)$ , b. Desviación estándar del volumen circulante, c. Serie temporal de  $T_{TOT}$ , c. Serie temporal de  $V_T$ .

Todas las señales están normalizadas en amplitud y número de ciclos.

Luego de aplicados los criterios de no estacionaridad descritos anteriormente a toda la base de datos PRI-HSCSP, se obtuvo como resultado que



## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 53

16 de los 40 registros analizados no superan la prueba de estacionaridad. De este grupo de señales analizadas, 10 registros completos, que se corresponden con cinco pacientes, presentaron propiedades de no estacionaridad en las dos condiciones de registro. Los resultados obtenidos para los otros pacientes, indican que la estacionaridad se cumple en al menos uno de los dos registros realizados por paciente. Los resultados totales del test de señales estacionarias desde el punto de vista del patrón ventilatorio se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Resultados del test estacionario aplicado a los registros de la base de datos PRI-HSCSP.

E: Estacionario, NE: No estacionario. PSB: Presión de soporte baja. PSA: Presión de soporte alta.

<i>Paciente</i>	<i>PSB</i>	<i>PSA</i>
<i>Acg</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Adp</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>
<i>Arg</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>
<i>Cpb</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Cpm</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>
<i>Crr</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Ess</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Etb</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>
<i>Fcs</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>
<i>Jbm</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>
<i>Jgc</i>	<i>E</i>	<i>NE</i>
<i>Mgl</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>
<i>Mgm</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Mmx</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Ogc</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Piq</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>
<i>Rfe</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Rpp</i>	<i>E</i>	<i>NE</i>
<i>Sat</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Vcp</i>	<i>E</i>	<i>NE</i>

No obstante este resultado, algunos autores recomiendan realizar, en el caso de registros experimentales de difícil repetición, una técnica de truncamiento que aumenta la probabilidad de considerar como estacionario a un registro inicialmente definido como no estacionario. Esta técnica será explicada a continuación y aplicada a los 16 registros que presentaron no estacionaridad (NE), según la tabla de resultados 3.1.

### 3.2.2 Registros Aproximadamente Estacionarios

Existe un procedimiento sencillo, que permite recuperar un registro que en principio debe ser rechazado en su totalidad, por ser considerado como no estacionario al no superar el test correspondiente. Este procedimiento simplemente recomienda realizar recortes en la longitud total de la señal, para lograr eliminar total o parcialmente la zona del registro no estacionaria. Posteriormente se repite el test estacionario a la nueva señal y se verifica si éste es finalmente superado. En caso positivo, se asume como válida la condición estacionaria del nuevo segmento de registro, y es usual denominar este nuevo registro reducido como aproximadamente estacionario (Hornero et al, 1999). El procedimiento posee la inconveniencia de desechar alguna porción del registro, y por lo tanto, su utilización está limitada, debido a la pérdida de información que conlleva cualquier segmentación al registro original. Aun así, su uso no debe descartarse por completo, especialmente en el caso de poder brindar información complementaria al proceso de análisis complejo del sistema en estudio. Particularmente, de la tabla 3.1 se puede apreciar que seis de los registros rechazados solo lo son para una de las dos condiciones medidas, y resultaría de gran utilidad estudiar y conocer, al menos en parte, como es su comportamiento complejo en la otra condición de soporte ventilatorio, y así poder llevar a cabo un análisis más integral de la condición física del paciente.

El proceso para considerar si un registro segmentado es aproximadamente estacionario consiste en dividir el registro original en dos segmentos de igual longitud, y volver a aplicar el test de estacionaridad a estas dos nuevas mitades. De allí es posible que alguno de los dos nuevos segmentos pueda cumplir con la condición de estacionaridad, rechazándose el segmento que no supera el test. Si ambos segmentos resultan nuevamente no estacionarios, debe ser definitivamente rechazado todo el registro.

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 55

Podría llegar a darse el caso de que ambas señales divididas, presenten condiciones de estacionaridad por cumplirse el procedimiento descrito en el apartado 3.3.1. Esta situación correspondería a una segmentación muy particular en donde la porción no estacionaria se reparte en el extremo común de los nuevos segmentos. Dado que en este caso la región no estacionaria puede ser ubicada con buena precisión, resulta más conveniente realizar una segmentación selectiva que logre aislar la región de la señal para la cual se pierde la estacionaridad, y segmentar de forma tal que la zona anómala sea el límite entre las dos nuevas señales. Este paso previo permite optimizar el proceso de revisión, por la conveniencia de que el test sea aplicado a una sola de las nuevas regiones, precisamente aquella que se presume posee la región estacionaria. Si bien este último procedimiento es factible solamente en aquellas señales en donde se pueda determinar con precisión la zona que presenta mayor variación con respecto a la media, es en la mayoría de los registros en donde esta región no está bien definida, y por lo tanto es preferible utilizar la segmentación simétrica, explicada anteriormente.

**Tabla 3.2** Resultados del test estacionario aplicado a los registros con PSB segmentados que presentaban condición de no estacionaridad.

CE: Cuasiestacionario, NE: No estacionario.

<i>Paciente</i>	<i>Segmento</i>	<i>Condición</i>
<i>AdpSB</i>	<i>Intermedio</i>	<i>CE</i>
<i>ArgSB</i>	<i>2</i>	<i>CE</i>
<i>CpmSB</i>	<i>2</i>	<i>CE</i>
<i>EtbSB</i>	<i>1</i>	<i>CE</i>
<i>FcsSB</i>	<i>1</i>	<i>CE</i>
<i>JbmSB</i>	<i>-</i>	<i>NE</i>
<i>MglSB</i>	<i>-</i>	<i>NE</i>
<i>PiqSB</i>	<i>-</i>	<i>NE</i>

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran los resultados de aplicar a los 16 registros no estacionarios (NE) de la tabla 4.1 los dos procedimientos descritos, el de la segmentación simétrica, y el de la segmentación con eliminación de la región

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 56

con desproporcionados valores promedios de los parámetros, en donde se pudo ubicar con precisión la región estacionaria.

De la tabla 3.2 se observa que ocho de las señales registradas en pacientes con PSB que mostraban no estacionaridad en su registro original, el proceso de segmentación ha contribuido a que 5 de ellas puedan considerarse cuasiestacionarias (CE) mientras las otras tres siguieron presentando segmentos NE. En dos de las cinco señales clasificadas como CE, (EtbSA y FcsSB) el resultado de aplicar el test estacionario fue superado por el primer segmento simétrico, a otras dos (CpmSA y JgcSA) lo cumplió el segundo segmento, y una región intermedia fue la seleccionada a la señal restante (AdpSB).

**Tabla 3.3** Resultados del test estacionario aplicado a los registros con PSA segmentados que presentaban condición de no estacionaridad.

CE: Cuasiestacionario, NE: No estacionario.

<i>Paciente</i>	<i>Segmento</i>	<i>Condición</i>
<i>CpmSA</i>	1	<i>CE</i>
<i>FcsSA</i>	-	<i>NE</i>
<i>JbmSA</i>	-	<i>NE</i>
<i>JgcSA</i>	1	<i>CE</i>
<i>MglSA</i>	2	<i>CE</i>
<i>PiqSA</i>	2	<i>CE</i>
<i>RppSA</i>	<i>Intermedio</i>	<i>CE</i>
<i>VcpSA</i>	1	<i>CE</i>

El resultado de aplicar el test a las ocho señales de pacientes con PSA que originalmente presentaban no estacionaridad, se muestran en la tabla 3.3, y allí se aprecia que han sido seis los registros en donde la técnica de segmentado permitió separar los componentes que presentaban excesivas variaciones respecto a la media, pudiendo considerarse el nuevo registro dividido como cuasiestacionario (CE). En tres de estas señales (CpmSA, JgcSA y VcpSA) solamente el primer segmento de la división simétrica se le pudo considerar CE, en otras dos señales (MglSA y PiqSA) fue el segundo segmento simétrico el seleccionado, y a la señal restante (RppSA) se determinó un segmento intermedio estacionario al ubicarle y

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 57

eliminarle la región no estacionaria. Ninguno de los segmentos en que fueron divididas las señales FcsSA y JbmSA logró ser clasificado como CE, y por tanto, en estas dos señales siguen clasificadas como NE.

Se sabe que en todo registro existe una relación entre la longitud del registro, el estado de estacionaridad del sistema y su grado de complejidad. Para poder modelar y cuantificar la estructura del sistema, son preferibles los registros temporales de larga duración. Pero en estos registros se pueden presentar dos importantes desventajas, una de ellas está condicionada a que el estado estacionario puede llegar a perderse con largos registros, mientras que la otra limitación proviene del hecho de que los recursos invertidos normalmente se incrementan al aumentar el tamaño del registro. En los registros cortos la estacionaridad está menos afectada y los recursos invertidos son menores, pero al reducir una señal mediante segmentaciones existe el riesgo de reducir el registro hasta un tamaño para el cual esta relación longitud-estructura puede verse comprometida, perjudicando el análisis en lugar de ser de utilidad.

Una solución a esta limitación consiste en poder garantizar, mediante algún método analítico, que el sistema en estudio posee una estructura determinada, y en el caso de los sistemas complejos, esta solución consiste en verificar que el sistema registrado contenga las características propias de los sistemas no lineales. Como se explicará en el siguiente apartado, para poder definir correctamente si un sistema es complejo en los términos apropiados para ser estudiado por las técnicas de caos, el test estacionario debe ser reforzado con la aplicación de otro tipo de prueba que garantice la no linealidad del sistema en estudio.

La aplicación de este nuevo test permitirá medir objetivamente, tanto en las señales segmentadas como en los registros originales, si la longitud del registro es suficiente para considerar que el sistema pueda ser estudiado mediante los métodos del análisis de complejidad, los cuales son apropiados para registros cuyos datos sean provenientes de sistemas no lineales, a la vez que se encuentren en un estado estacionario.

### **3.3 Detección del Determinismo No Lineal**

Uno de los aspectos más destacados de la teoría de sistema complejos, consiste en presentar la importancia que poseen las relaciones no lineales entre los parámetros de un sistema, en la emergencia de trayectorias complejas y en la

formación de atractores extraños. Estas manifestaciones de complejidad están excluidas en los sistemas lineales, en donde el resultado global de las interacciones mutuas entre parámetros, esta dado por la suma algebraica del aporte de cada subsistema, como si actuara cada uno individualmente, basado en el principio de superposición.

Resulta pues conveniente, llevar a cabo algún tipo de procedimiento para comprobar si las mediciones del sistema físico en estudio se corresponden efectivamente con un proceso determinístico no lineal al incumplir el principio de superposición, diferenciándolo de los procesos meramente lineales en los cuales este principio si se aplica. El procedimiento debería también ayudar a discriminar entre datos estocásticos y los datos con determinismo no lineal.

Para comprobar la no linealidad en los datos, varios autores han descrito procedimientos en los cuales, mediante convenientes transformaciones, se analizan las series de datos con diversas componentes, y luego son contrastados los datos originales con los transformados, mediante la suposición de linealidad de los datos, para evidenciar con el rechazo de la *hipótesis nula*, la no linealidad de los datos originales. La transformación del conjunto de datos se hace por medio de la técnica conocida como de los *surrogate data*. El proceso consiste fundamentalmente en obtener una nueva serie de datos derivada de la serie original, cuyo espectro de Fourier sea similar al de la serie temporal de los datos iniciales (Kaplan y Glass, 1995; Kantz y Schreiber, 1997; Palus y Hoyer, 1998).

La aplicación de este test ha resultado ser especialmente importante en la detección de la evidencia de no linealidad en series temporales de datos estacionarios. También ha resultado útil al fallar en la detección de estructuras no lineales en sistemas estocásticos lineales, rechazando con este resultado la hipótesis nula de linealidad de los registros. Así mismo este test identifica correctamente no linealidades en reconocidos sistemas caóticos de baja dimensión, incluso cuando están contaminados con ruido dinámico. Ha sido aplicado también en diferentes mediciones físicas como la convección de Rayleigh-Benard en sistema fluidicos, y en la detección de no linealidades en los ciclos que presentan las manchas solares (Theiler et al, 1992). Recientemente el test ha sido utilizado también por diferentes autores como un método conveniente para verificar las condiciones no lineales de registros en mediciones de sistemas biológicos, como los estudios electrocardiográficos (Kaplan, 1999; Carvajal, 1999)

encefalográficos (Hornero et al, 1999) y en registros respiratorios (Hughson et al, 1995, 1996; Brattacharya, 2001).

Existen dos formas de obtener la nueva serie de datos que intentan diferenciar los procesos de señales con imágenes espectrales y valores de media y desviación estándar iguales, pero con diferente configuración interna:

- Intercambiando aleatoriamente las amplitudes de la serie de datos.
- Realizando un intercambio en las fases.

El primero es el más sencillo de implementar, y consiste en realizar un barajeo aleatorio entre datos, de tal forma de romper las interacciones dinámicas temporales que pudieran existir entre la serie de datos, bajo la hipótesis de que el sistema fuera determinístico. Como la intención es precisamente romper una supuesta estructura subyacente del sistema, basándose en demostrar la no sustentación del principio de superposición, la técnica es conocida como la de hipótesis nula. Es decir, la hipótesis inicial supone que el sistema es lineal, y para ello se analizan los datos bajo esta premisa. Finalmente el test para comprobar las condiciones de no linealidad exige que la hipótesis inicial sea rechazada por los resultados obtenidos. Posteriormente se busca una diferencia estadísticamente significativa entre ambas series de datos, tomando como punto de comparación algún parámetro o índice relevante del sistema. Si el valor de este parámetro calculado con la nueva serie es significativamente diferente del obtenido con la serie original, la hipótesis nula se considera rechazada y en consecuencia se comprueba la condición de no linealidad del sistema.

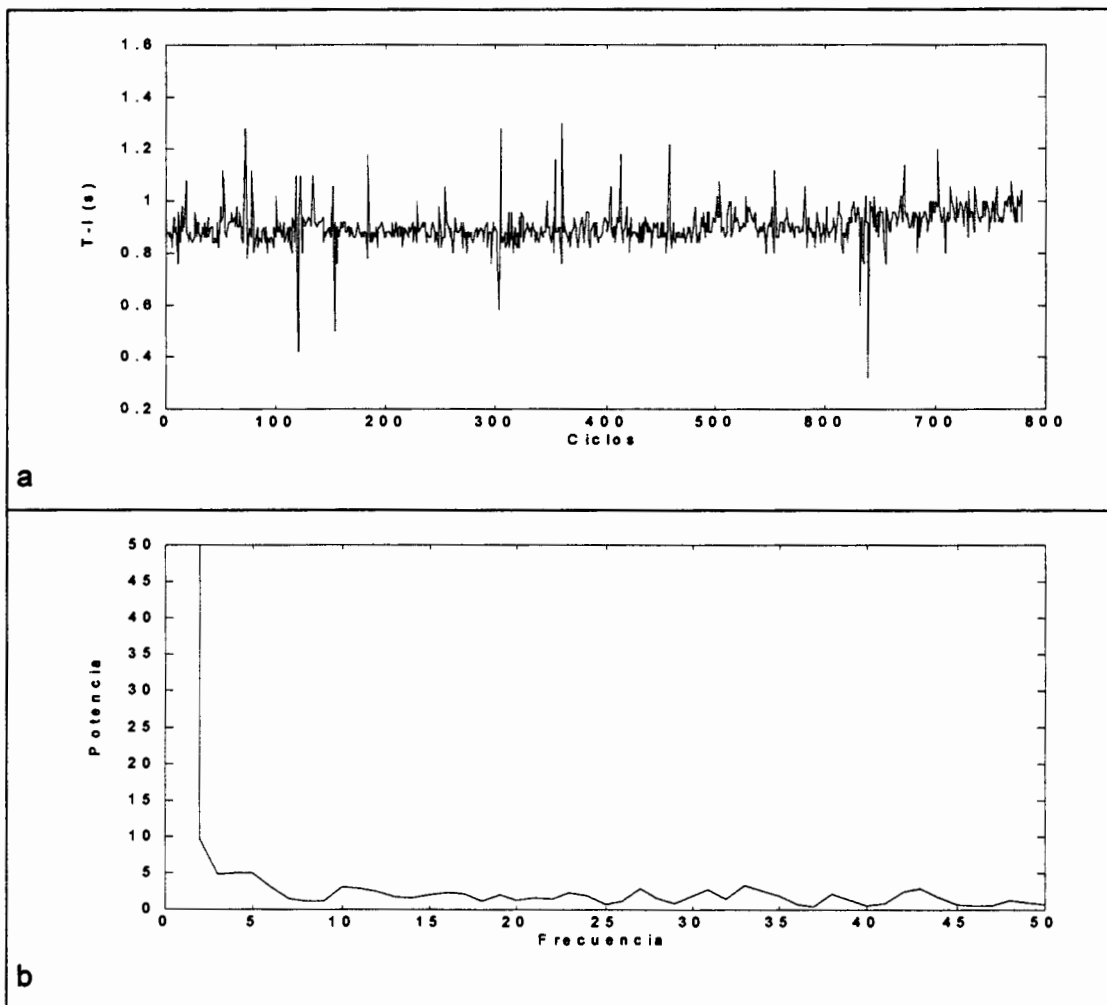
La metodología correspondiente a la segunda técnica es algo más elaborada que la primera, pues además de considerar el proceso dinámico subyacente del sistema, se basa en el intercambio aleatorio de las fases de la transformada de Fourier de la serie temporal, tal como lo describen Thelie et al (1992). El proceso general seguido para obtener esta nueva serie de datos con fases aleatorias es el siguiente:

- Obtener la transformada de Fourier de toda la señal.
- Calcular el espectro de potencia de la transformada de Fourier.
- Generar aleatoriamente unas nuevas fases, de forma que el espectro de potencia sea similar al obtenido en el punto anterior.

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 60

- Obtener una nueva serie temporal con la transformada inversa de Fourier de la secuencia obtenida en el punto 3. Esta última serie corresponde a la serie de Surrogate data o serie de datos con aleatorización de fases.

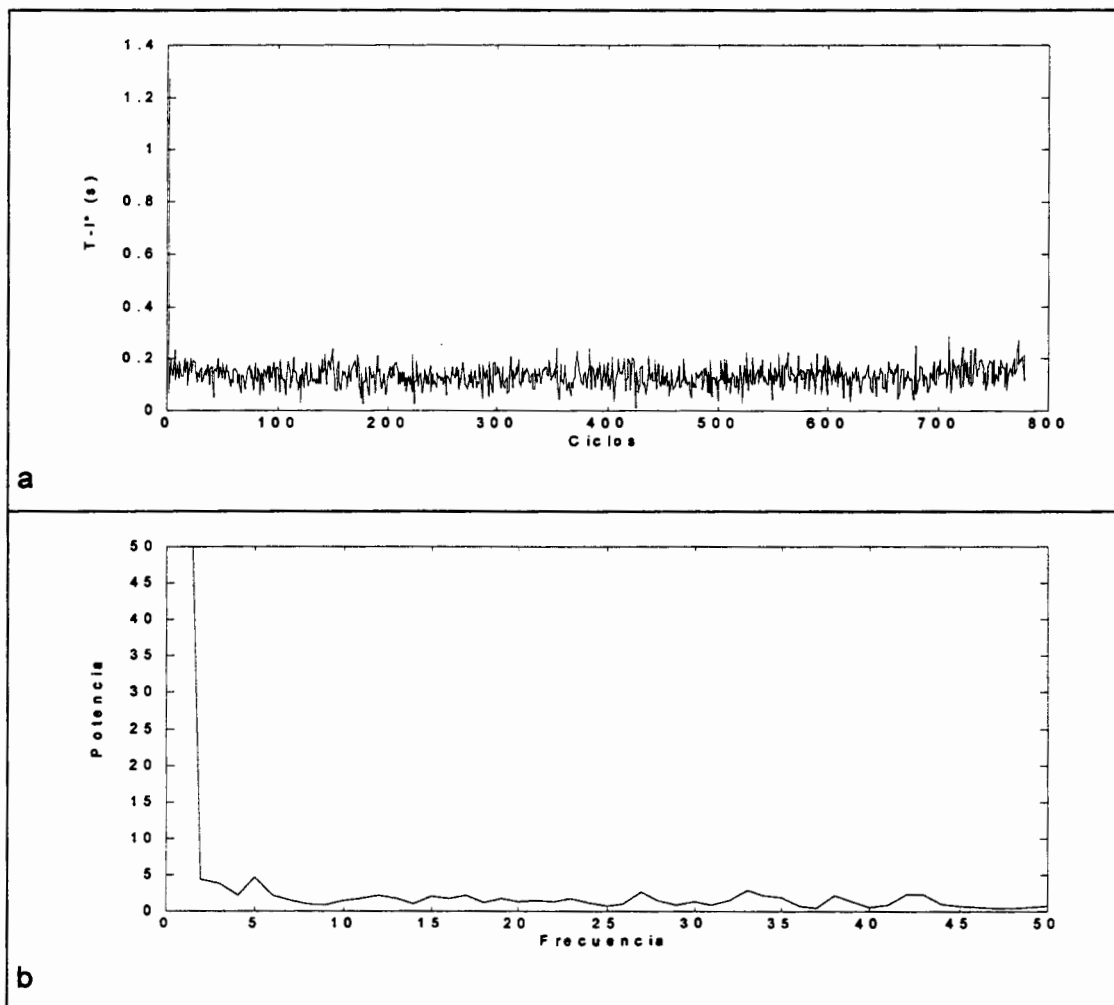
En las figuras 3.6 y 3.7 se aprecia los resultados de aplicar este algoritmo a la serie temporal SatSB de datos de  $T_1$ . En la figura 3.6 se muestran la serie temporal y su espectro de potencia, y en la figura 3.7 aparecen la serie temporal de datos con fase aleatorizada, luego de ser procesada con el algoritmo, y su espectro de potencia. Se puede apreciar de estas figuras que las series temporales poseen espectros de potencia con las mismas características, mientras que las series temporales no son similares.



**Figura 3.6** a. Serie Temporal de  $T_1$  del registro SatSB, b. Espectro de Potencia de la serie  $T_1$ .



En el estudio sobre el comportamiento complejo del sistema respiratorio se siguió el proceso de aleatorización de fases para obtener los surrogate data, codificándolo y aplicándolo en la obtención de las diferencias estadísticas entre las series temporales de  $T_I$  de todos los registros de la base de datos PRI-HSCSP, que previamente pasaron el test de estacionaridad, como medida de estimación de su condición de no linealidad.



**Figura 3.7** a. Serie Temporal de valores surrogate data de  $T_I^*$  del registro SatSB, b. Espectro de Potencia de la serie temporal  $T_I^*$ .

El parámetro de comparación estadística utilizado fue el valor de la Entropía Aproximada (EnAp), el cual es un índice apropiado para medir estos cambios que permiten obtener información compleja del sistema a partir de series temporales con reducido número de datos. Las entropías aproximadas han sido calculadas

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 62

por medio de probabilidades condicionadas, según el método de Pincus y Goldberger (1994), el cual será explicado y aplicado a los registros del patrón ventilatorio en el capítulo 5. A cada surrogate data nuevo se le denomina una realización de la serie temporal. Para los análisis con las entropías aproximadas, se hicieron diez realizaciones diferentes, de las siguientes ocho señales: Una serie Aleatoria, unos datos del Mapa Logístico  $X_{i+t} = R.X_i (1 + X_i)$ , y las seis series temporales del patrón ventilatorio de los dos registros del paciente Sat, como una muestra representativa de las señales de la base de datos PRI-HSCSP.

En la tabla 3.4 se muestran los resultados de las EnAp de las ocho señales analizadas, los valores medios y la desviación estándar (SD) de las 10 realizaciones de las EnAP, y el valor de la significación estadística (p), obtenida luego se aplicar la prueba t de student a los resultados de las EnAp.

**Tabla 3.4** Resultados de las Entropías Aproximadas (EnAp) de las señales originales, EnAp de los *surrogate data*, y significación estadística p calculada por la prueba t.

<i>Señal Analizada</i>	<i>EnAp</i>	<i>EnAp_Surr. Media ± SD</i>	<i>p</i>
<i>Aleatoria</i>	1.44	1.46 ± 0.03	0.045
<i>Mapa Logístico</i>	0.45	1.66 ± 0.01	<0.001
<i>SatSB – T<sub>I</sub></i>	1.35	1.46 ± 0.03	<0.001
<i>SatSA – T<sub>I</sub></i>	1.25	1.30 ± 0.04	0.006
<i>SatSB – T<sub>TOT</sub></i>	1.28	1.45 ± 0.02	<0.001
<i>SatSA – T<sub>TOT</sub></i>	0.83	1.25 ± 0.03	<0.001
<i>SatSB – V<sub>T</sub></i>	1.31	1.49 ± 0.02	<0.001
<i>SatSA – V<sub>T</sub></i>	1.24	1.32 ± 0.03	<0.001

De los resultados mostrados en la tabla 3.4, se obtiene que los valores del discriminador estadístico utilizado (EnAp), son bastante cercanos para las señales aleatorias y los surrogate data, no pudiendo mostrarse una diferencia apreciable entre ambos conjuntos de datos, por lo cual se debe considerar aprobada la hipótesis nula y aceptar que poseen estos primeros datos no provienen de un sistema no lineal. Los resultados son sustancialmente diferentes para la serie de datos del mapa logístico, pues dada la pequeña probabilidad que existe en que los datos originales y el promedio de las 10 realizaciones provengan de fuentes

similares, la hipótesis nula resulta rechazada y, tal como era de esperarse, la serie estudiada posee características de no linealidad.

En el caso de las seis series temporales de los registros SatSB y SatSA, los resultados son análogos a los presentados por el mapa logístico, su significación estadística entre los datos originales y los surrogate data es muy baja ( $p < 0.01$ ), lo cual rechaza la hipótesis nula asumida inicialmente, y estas series temporales se consideran que poseen características de no linealidad.

### **3.4 Resultados**

Los resultados generales de la técnica de segmentación para obtener señales con estacionaridad aproximada, demuestran una validez útil para recuperar parte de los registros que originalmente no cumplen con el test de estacionaridad, aunque el proceso sea algo más complicado que una simple reducción en la longitud del registro, pues el estado estacionario debe ser convenientemente verificado antes de decidir su cumplimiento. Los resultados generales se muestran en la tabla 3.5, en donde aparecen resaltados los once nuevos registros segmentados válidos, cinco para PSB y los otros seis en PSA.

En definitiva, de las 40 señales del patrón respiratorio de la base de datos PRI-HSCSP procesadas, treinta y cinco resultaron estacionarias o cuasiestacionarias, y cinco de ellas se rechazaron por no cumplir la prueba de estacionaridad. Las señales cuasiestacionarias se obtuvieron mediante convenientes segmentaciones que eliminan trozos de la señal en donde se aprecian cambios importantes en los valores de media y desviación estándar de algunos de los parámetros considerados que definen el patrón ventilatorio.

El test de no linealidad por su parte, fue implementado según el método de los surrogate data, y para su desarrollo se requirió la suposición de la hipótesis nula, la cual una vez comprobada su invalidez, permitió verificar mediante un discriminador estadístico apropiado (la Entropía Aproximada), que los datos de las series temporales no son generados por un sistema lineal, sino que su dinámica está más asociada a los sistemas complejos no lineales, de los cuales el mapa logístico es un ejemplo.

**Tabla 3.5** Resultados del test estacionario aplicado a los registros de la base de datos PRI-HSCSP.

<i>Paciente</i>	<i>PSB</i>	<i>PSA</i>
<i>Acg</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Adp</i>	<i>CE</i>	<i>E</i>
<i>Arg</i>	<i>CE</i>	<i>E</i>
<i>Cpb</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Cpm</i>	<i>CE</i>	<i>CE</i>
<i>Crr</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Ess</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Etb</i>	<i>CE</i>	<i>E</i>
<i>Fcs</i>	<i>CE</i>	<i>NE</i>
<i>Jbm</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>
<i>Jgc</i>	<i>E</i>	<i>CE</i>
<i>Mgl</i>	<i>NE</i>	<i>CE</i>
<i>Mgm</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Mmx</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Ogc</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Piq</i>	<i>NE</i>	<i>CE</i>
<i>Rfe</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Rpp</i>	<i>E</i>	<i>CE</i>
<i>Sat</i>	<i>E</i>	<i>E</i>
<i>Vcp</i>	<i>E</i>	<i>CE</i>

E: Estacionario, CE: Cuasiestacionario, NE: No estacionario.

PSB: Presión de soporte baja. PSA: Presión de soporte alta.

### 3.5 Conclusiones

Un sistema aislado y en equilibrio termodinámico puede ser modelado mediante la dinámica no lineal de un sistema en estado estacionario, en donde las fluctuaciones que generan las perturbaciones externas son siempre amortiguadas y no llegan a ser catastróficas, en el sentido de producir cambios apreciables en su

estructura dinámica, entendidos como transiciones de fase. En los organismos vivos, sin embargo, en donde los modelos con dinámica no lineal son necesarios, se debe recurrir a la termodinámica de los sistemas abiertos, que además están alejados del equilibrio, en donde las perturbaciones externas no son amortiguadas de la misma forma que en los sistemas lineales, y pueden hacer que el sistema pierda estabilidad, o incluso modifique su respuesta con fluctuaciones propias, aunque siga permaneciendo en un estado estacionario, presentando características propias de un proceso autoorganizado.

En este capítulo se ha descrito, desarrollado y aplicado un algoritmo que permite verificar la condición de estacionariedad de las señales que constituyen el patrón ventilatorio humano, como requisito para poder utilizar estas señales con las técnicas del análisis de complejidad. Algunas de las señales que inicialmente dejaban de cumplir con el test de estacionariedad, fueron procesadas de nuevo, después de ser segmentadas convenientemente, y si en esta segunda oportunidad pasaban el test, pudieron finalmente ser consideradas como aproximadamente estacionarias o cuasiestacionarias. Este proceso permitió recuperar algunos registros para los cuales el estado no estacionario se presentaba en alguna de las dos condiciones de medición del paciente, situación ésta que podría restar importancia a los resultados posteriores. En definitiva, de los 40 registros analizados (dos para cada uno de los 20 pacientes), 24 de estos registros resultaron estacionarios, 11 aproximadamente estacionarios y los cinco registros restantes fueron finalmente rechazados, según se muestra en la tabla 3.6.

Una segunda condición necesaria para el procesamiento complejo de las señales, fue la comprobación de la no linealidad de los datos, para lo cual se implementó un algoritmo que fue aplicado a modo de test no lineal a una muestra de las señales de la base de datos PRI-HSCSP. La metodología desarrollada consistió en programar el método de aleatorización de las fases de la transformada de Fourier de la serie temporal de  $T_1$ , (método también denominado de los surrogate data) obteniéndose resultados que indican una diferencia significativa entre los valores del parámetro de Entropía Aproximada cuando se aplica a la serie original y al promedio de las diez realizaciones de los surrogate data de cada serie analizada. La discriminación estadísticamente significativa de la entropía aproximada entre las series originales y las modificadas (Tabla 3.4), permite en definitiva rechazar la hipótesis inicial de asumir los datos como lineales y se

## ANÁLISIS ESTACIONARIO Y DETECCIÓN DEL DETERMINISMO NO LINEAL 66

concluye que los registros del patrón ventilatorio se identifican con los sistemas no lineales. El que los resultados entre el promedio de las diez realizaciones de los surrogate data y las señales originales sean diferentes permite inferir que el proceso dinámico en estos registros no cumple con el principio de superposición, y por lo tanto los registros se consideran provenientes de un proceso no lineal.

La comprobación de los dos tests aquí desarrollados, el de estacionaridad de las señales y el de no linealidad, constituyen las condiciones de análisis necesarias y suficientes para llevar a cabo los estudios de complejidad (cualitativos y cuantitativos) de las series temporales de datos provenientes de sistemas fisiológicos, basados en los principios de la termodinámica de los procesos biológicos, que serán desarrollados en los siguientes capítulos.