

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament d'Enginyeria Electrònica

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL
RITMO CARDÍACO MEDIANTE
TÉCNICAS ESTADÍSTICAS,
ESPECTRALES Y NO LINEALES**

Autor: Miguel Ángel García González
Director: Ramon Pallàs Areny

Febrero de 1998

CAPÍTULO 7: APLICACIÓN A REGISTROS AMBULATORIOS DE 24 HORAS

“La verdadera medida del hombre no es cómo se comporta en momentos de confort y conveniencia sino cuando se enfrenta a tiempos de controversia y cambio”
Martin Luther King Jr.

7 Aplicación a registros ambulatorios de 24 horas

Los registros analizados en el anterior capítulo tenían dos características comunes: el tiempo de medida no era excesivamente largo y la medida se realizaba en *condiciones controladas*. Se intentaba modificar o excitar de cierta manera conocida un sistema fisiológico y se realizaba la medida de la variabilidad del ritmo cardíaco para evaluar la influencia de dicho sistema. Raramente los resultados obtenidos en el anterior capítulo coincidirían con situaciones fisiológicas normales.

El objetivo de este capítulo es caracterizar y cuantificar la variabilidad del ritmo cardíaco a partir de registros obtenidos en sujetos sanos con una duración total de un día. El tiempo de medida abarca, pues, todo un ciclo de la actividad cotidiana del sujeto a medir. La medida mediante técnicas ambulatorias aporta la ventaja de presentar registros en situaciones fisiológicas normales aunque, por otro lado, se desconoce la variación de los diferentes sistemas fisiológicos a lo largo del tiempo. La larga duración de los registros aporta una gran cantidad de información que da un gran conocimiento sobre el estado del sujeto pero que hace que el procesado de la señal sea harto más lento y que la cuantificación del registro no sea tan inmediata como en registros de corta duración (en los cuales dicha cuantificación se reducía a un conjunto pequeño de números). Por otro lado, en el caso de medida mediante técnicas ambulatorias, el número de fenómenos a observar es mucho más elevado mientras que en medidas de corta duración el investigador está interesado por un único fenómeno. Estaremos interesados, sobre todo, en la variación de los diferentes índices que caracterizan la variabilidad del ritmo cardíaco a lo largo del tiempo. Más concretamente, observaremos las diferencias entre los períodos de vigilia y de sueño.

Se presentarán en primer lugar los resultados correspondientes al análisis estadístico, a continuación se cuantificarán los registros mediante análisis espectral, después se mostrarán los resultados para el análisis de no linealidad mediante biespectro y finalmente se cuantificará la complejidad de la señal mediante el exponente de Hurst.

Se han analizado un total de 6 registros correspondientes a 6 sujetos diferentes (33,2 años - 9,7 años). En todos ellos, y para evaluar la variación de los diferentes índices, se ha caracterizado la variabilidad del ritmo cardíaco en períodos de cinco minutos y, cuando era aplicable, en el período total de 24 horas y durante el período de sueño y vigilia. La cuantificación realizada en períodos de cinco minutos permite la visualización de los llamados *ritmos circadianos* (véase [Furlan et al, 1990], por ejemplo) que son el caballo de batalla de una nueva disciplina en el campo de la medicina y biología llamada **cronobiología**. Aunque la mayoría de investigaciones en cronobiología se centran en los índices estadísticos (especialmente el valor medio de la serie RR) y raramente en los índices espectrales (fundamentalmente en el índice LF/HF) hemos extendido el conjunto de índices incluyendo la cuantificación del biespectro (con un índice que se presentará en el apartado 7.3) y la estimación del exponente de Hurst.

7.1 Análisis de registros ambulatorios mediante métodos estadísticos

El objetivo del presente apartado es triple:

- Presentar los ritmos circadianos correspondientes a los índices SD, pNN50, MIRR, MADRR y al ritmo medio de los RR (\overline{RR}).
- Realizar una cuantificación total del registro mediante los índices descritos en el apartado 2.1.2 y otros originales.
- Comprobar la correlación entre los índices SD y MIRR y entre pNN50 y MADRR.

Para el primer objetivo se cuantificó el registro, como ya se ha comentado, dividiéndolo en segmentos consecutivos de cinco minutos de duración. El empleo de esta duración no es arbitrario sino que responde al estándar utilizado en aplicaciones médicas. Así, con la serie de índices SD que se obtiene, se puede calcular el índice $SDNN_{index}$, por ejemplo, que es empleado en el segundo objetivo. Al mismo tiempo, la serie de índices obtenida se emplea para comprobar la correlación entre índices.

En la figura 7.1 se muestra el ritmo circadiano correspondiente a \overline{RR} que es el índice base para la cuantificación posterior de la variabilidad del ritmo cardíaco. Las zonas sombreadas corresponden al período nocturno, mientras el sujeto estaba durmiendo. Un primer vistazo a las distintas gráficas permite observar que durante el estado de vigilia el ritmo cardíaco es mucho mayor que mientras el sujeto está durmiendo. Por otro lado, la transición de ritmo alto a bajo varía mucho entre sujeto y sujeto, siendo rápida en aquellos que tardan poco en dormirse según se ha podido averiguar tras encuestar a los sujetos medidos. Se observa además que el nivel medio diurno y nocturno de \overline{RR} varía mucho entre sujetos.

En la figura 7.2 se muestra el ritmo circadiano correspondiente a la desviación estándar de los RR (SD). Se observa que durante períodos nocturnos este índice es mayor que en estado de vigilia. Dichas conclusiones están en concordancia con estudios realizados en situación de estrés en las cuales el sujeto presenta una reducción del índice SD. Como durante los estados de vigilia el sujeto está más influenciado por el sistema nervioso central, es normal que el índice SD sea más reducido. Por otro lado, obsérvese que hay sujetos con un índice SD global mayor que otros: especialmente los sujetos 1 y 4 mientras que el sujeto 6 es el que presenta el menor valor del índice SD.

En la figura 7.3 se muestra el ritmo circadiano correspondiente al margen intercuartil de los RR (MIRR). Se comentó en el capítulo 2 que este índice presenta una alta correlación con el índice SD en ausencia de artefactos. Como los registros analizados tienen una baja presencia de artefactos es de esperar que ambos índices proporcionen la misma información (suponiendo que la distribución de los RR sea semejante a una gaussiana). Una rápida comparación de gráficas muestra que en todos los sujetos la evolución de ambos índices (SD y MIRR) es semejante aunque diverjan las estimaciones en ciertos puntos. Una posible explicación es que la hipótesis de gaussianidad no sea cierta en dichos registros lo cual provoca que la relación entre SD y MIRR deje de ser lineal. Para comprobar esto se ha realizado el test de Kolmogorov-Smirnov [Bendat and Piersol, 1986] para testear cual es la probabilidad de que la señal

sea gaussiana cuando rechazamos dicha hipótesis. En la tabla 7.1 se muestran los resultados para el parámetro α que cuantifica dicha probabilidad.

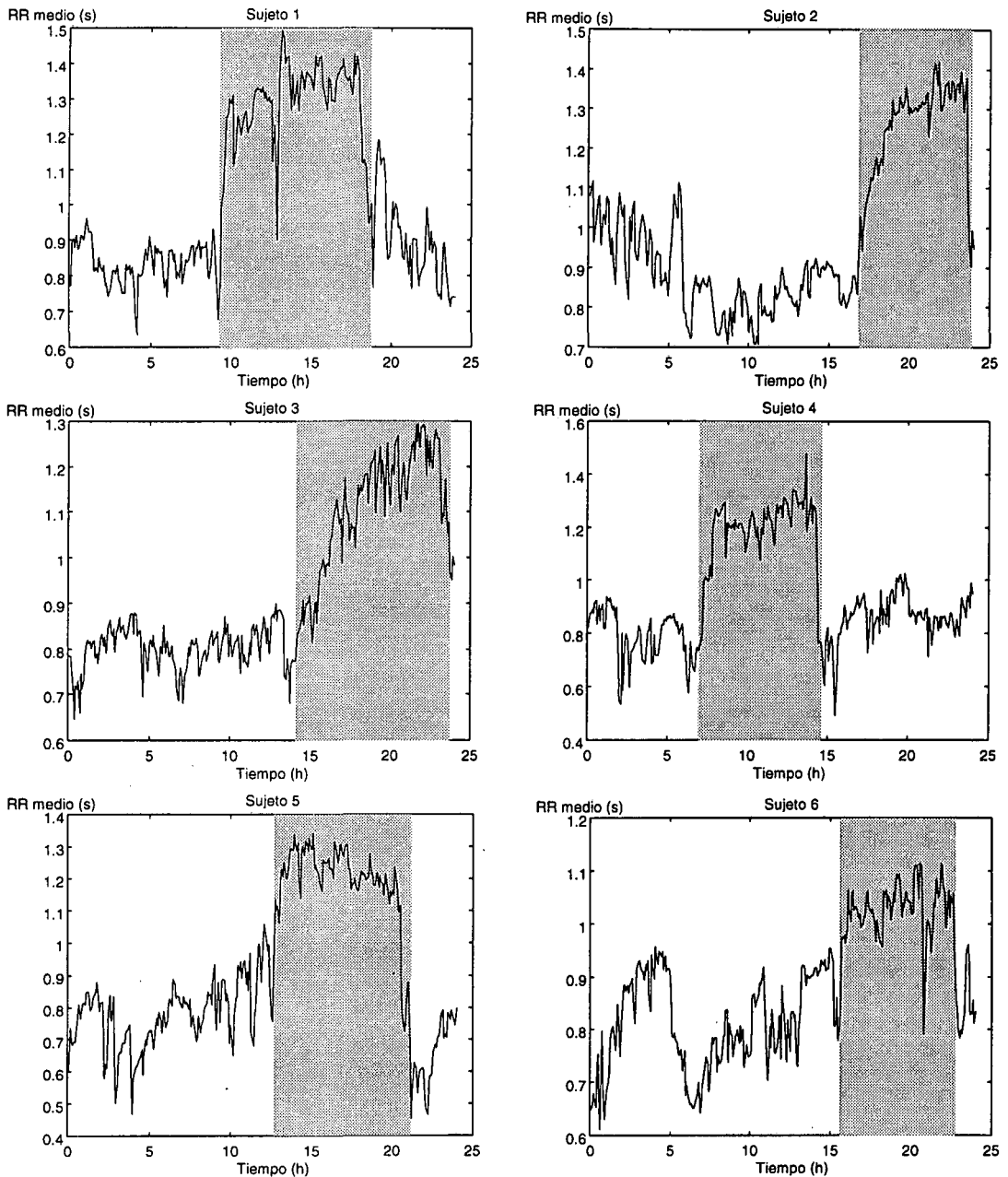


Figura 7.1 Ritmo circadiano de la media de los RR. La zona sombreada en gris corresponde a los períodos nocturnos.

Sujeto	1	2	3	4	5	6
α media	0,29	0,32	0,22	0,20	0,24	0,35

Tabla 7.1 Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov sobre los registros ambulatorios. Se ha obtenido la media del parámetro α a lo largo del registro dividiéndolo en segmentos de cinco minutos. α representa la probabilidad que la señal sea gaussiana suponiéndola no gaussiana.

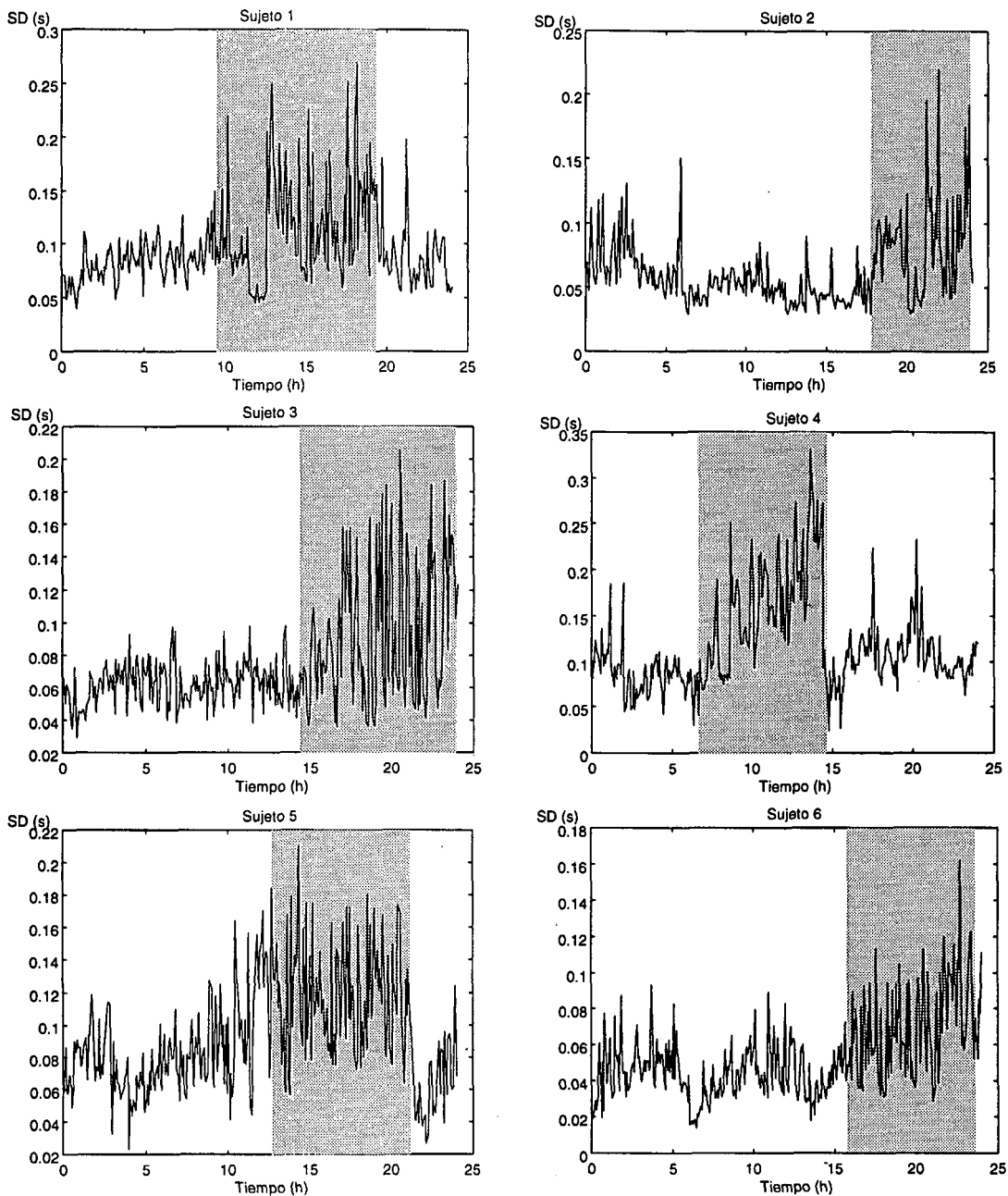


Figura 7.2 Ritmos circadianos correspondientes al índice SD. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

Tal y como se desprende de la tabla 7.1, las señales ambulatorias pueden considerarse prácticamente como no gaussianas. Resulta sorprendente, pues, que los índices SD y MIRR muestren prácticamente la misma información tal y como se muestra en la tabla 7.3 donde se muestra la correlación entre ambos índices que para el peor caso (sujeto 3) es de 0,74.

En la figura 7.4 se muestra el ritmo circadiano correspondiente al índice pNN50. Recuerdese que dicho índice cuantifica el nivel de excitación vagal (cambios bruscos) existente en la serie RR. Se debe destacar que éste índice es muy alto en los períodos nocturnos mientras que desciende a niveles muy bajos durante el período de vigilia. Este hecho ya ha sido documentado por varios investigadores [Ewing et al, 1984]. Obsérvese que el sujeto 4 es el que posee mayor excitación vagal mientras que el sujeto 2 es el que

la posee menor. Curiosamente éste sujeto es el de mayor edad (52 años). Varios investigadores [Smith et al., 1981] han puesto de relieve el hecho que el nivel de excitación vagal remite con la edad en concordancia con los resultados.

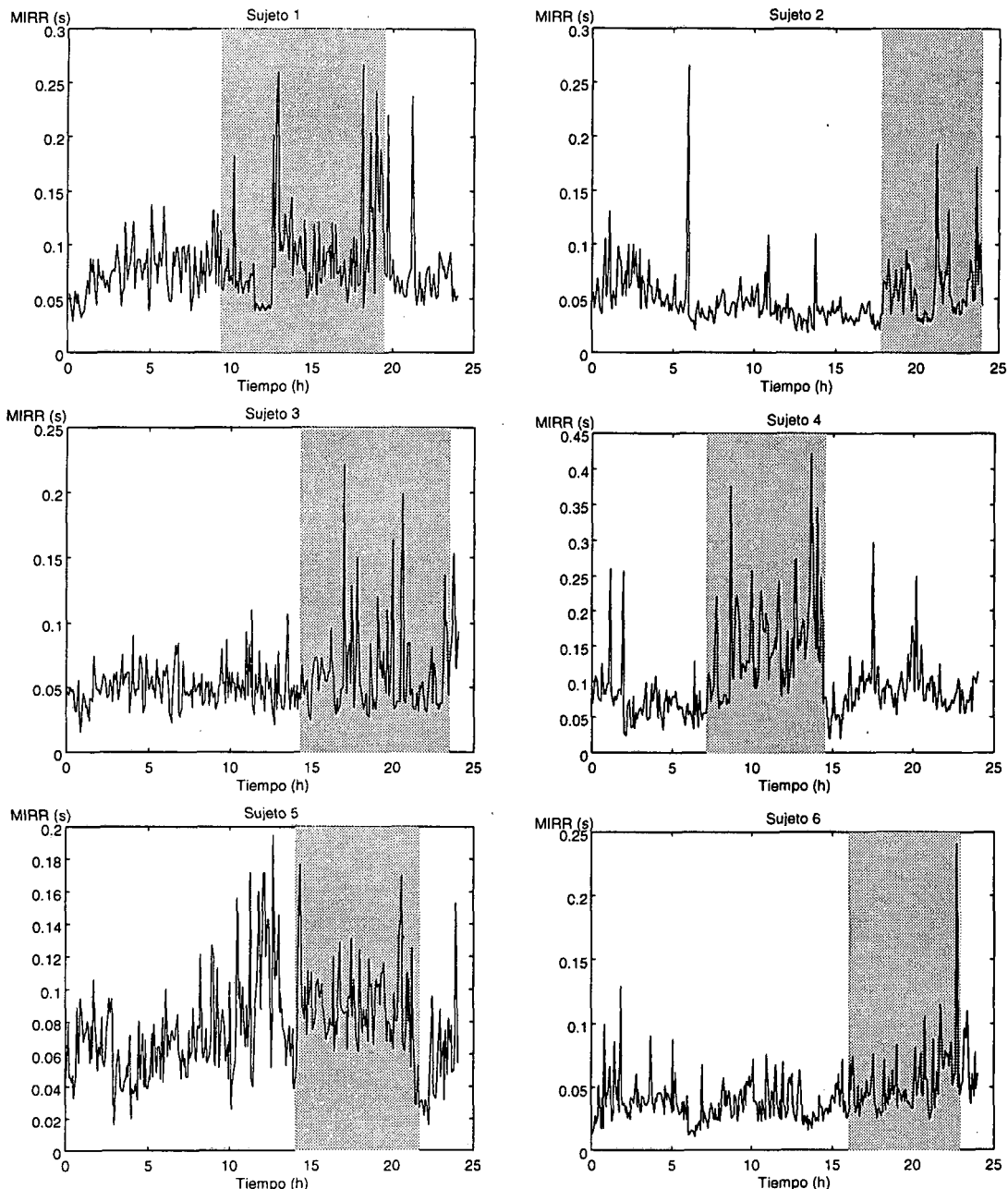


Figura 7.3 Ritmos circadianos correspondientes al índice MIRR. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

En la figura 7.5 se muestran los resultados para el índice MDARR. Recuérdese que dicho índice tiene una alta correlación con el pNN50 (obsérvese la tabla 7.3) y que no sufría los problemas de saturación asociados a un nivel de cambio brusco bajo (como se ha observado en las medidas realizadas en cerdos) o alto. Un ejemplo de excitación vagal exagerada se contempla en el sujeto 4. Comparando las gráficas se observa que el índice pNN50 tiene una variación entre el 60% y el 93% durante el período nocturno. No obstante, el índice MDARR posee una variabilidad mucho mayor, llegándose hasta un máximo de casi 250 ms.

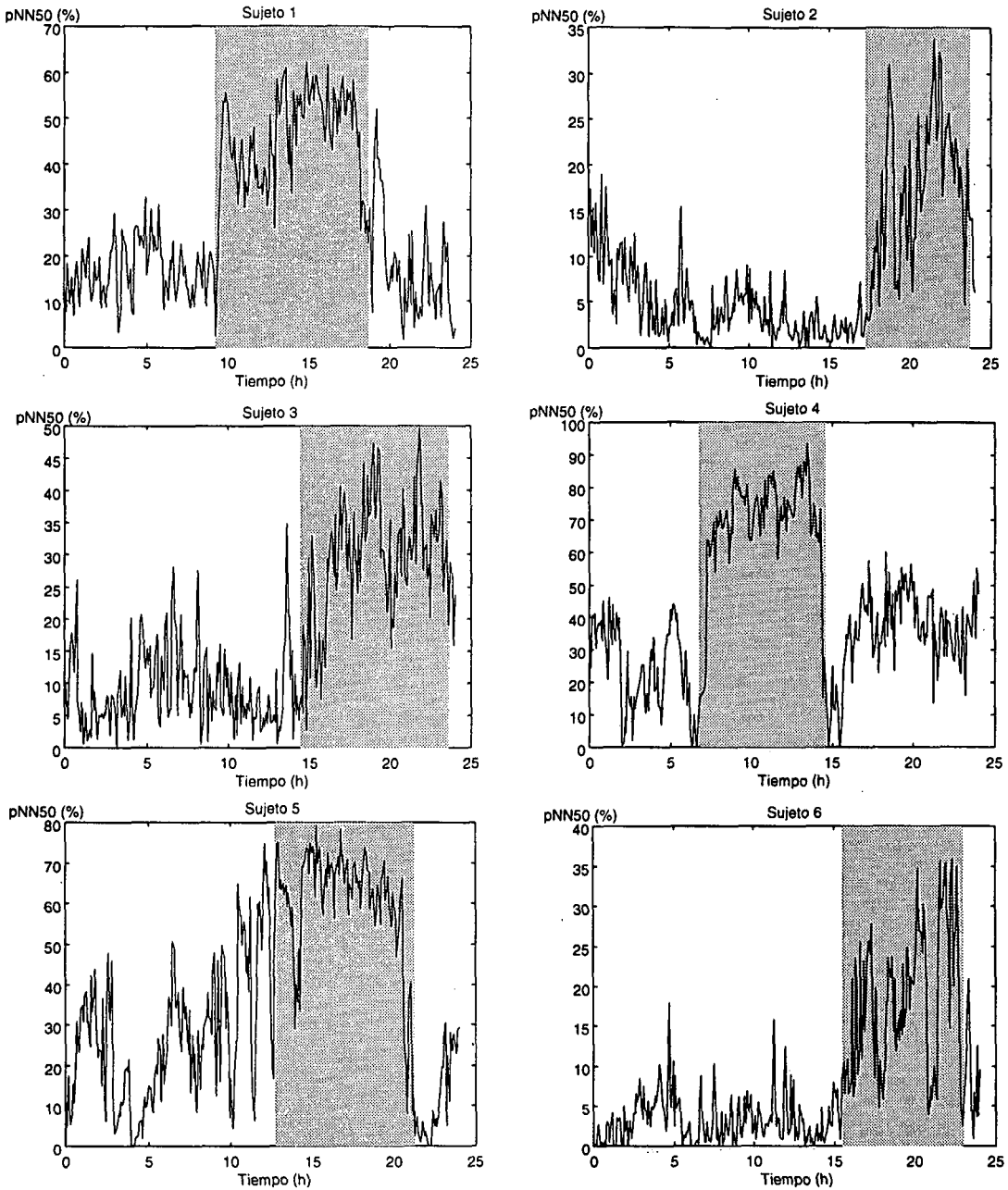


Figura 7.4 Ritmos circadianos correspondientes al índice pNN50. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

Este fenómeno de saturación se ejemplifica claramente representado el índice pNN50 respecto al índice MDARR tal y como se muestra en la figura 7.6. No obstante, la correlación entre ambos índices es excelente (el peor caso resulta ser el sujeto 6 con una correlación de 0,88).

Como resumen de los ritmos circadianos podemos decir que claramente se observa una diferencia entre los períodos nocturnos y diurnos para cada uno de los sujetos caracterizado por **un menor ritmo cardíaco, mayor variabilidad total de la señal y mayor excitación vagal durante los períodos de sueño**. La excitación vagal es claramente observable tanto en el valor medio de los RR (el sistema vagal reduce el ritmo cardíaco) como en la amplitud de las variaciones rápidas que ocurren en la serie RR.

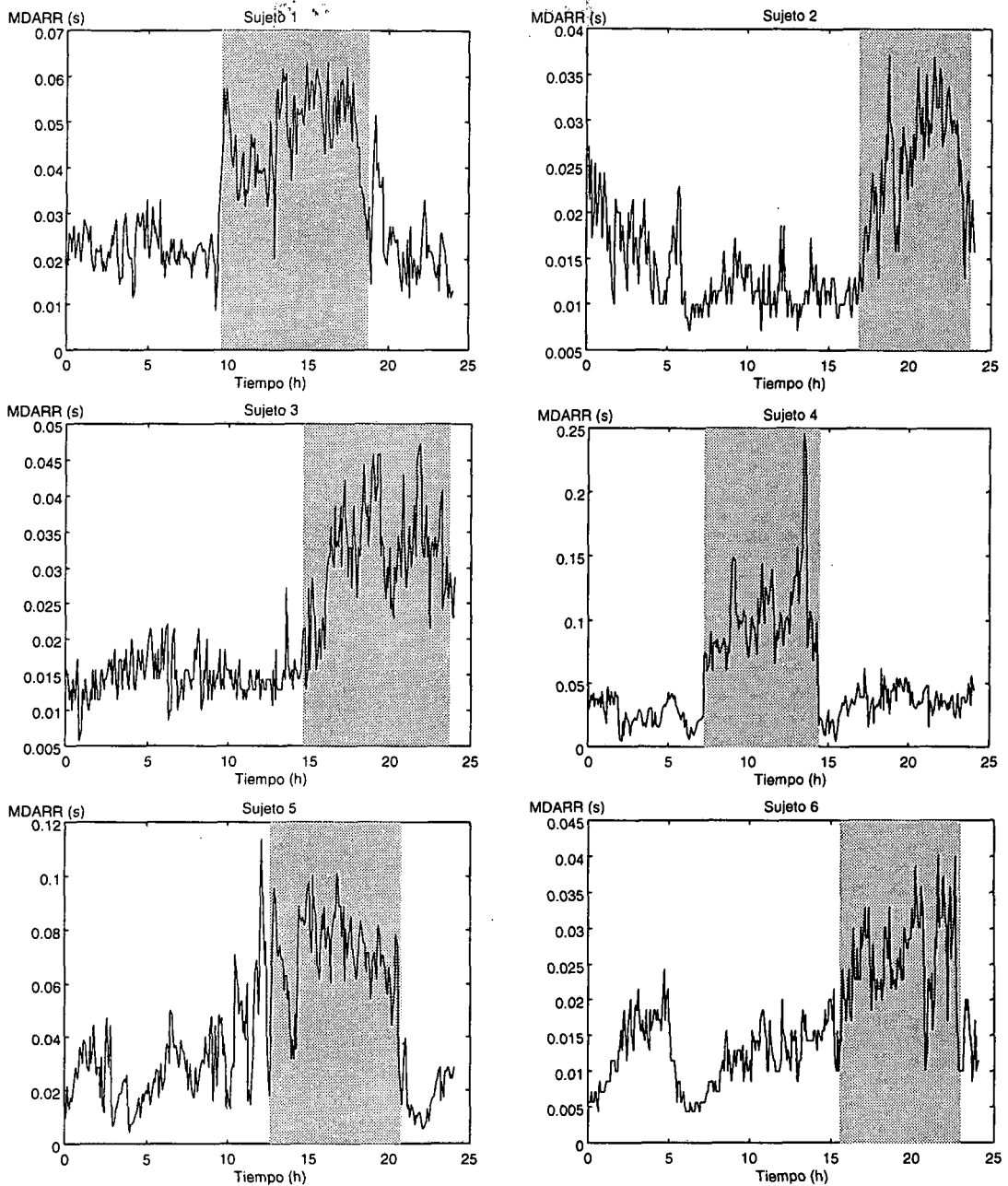


Figura 7.5 Ritmos circadianos correspondientes al índice MDARR. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

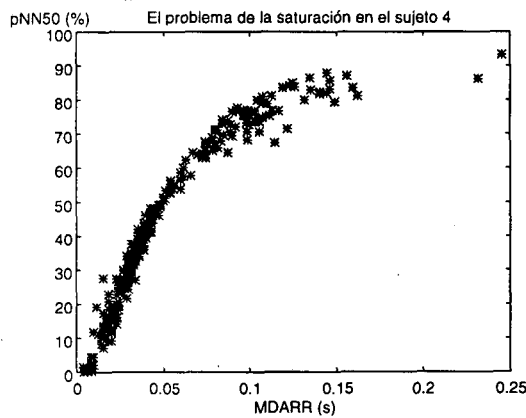


Figura 7.6 Ejemplo del problema de saturación del índice pNN50.

En la tabla 7.2 se muestran diferentes índices estadísticos que cuantifican globalmente cada uno de los registros empleados. Son los siguientes:

- \overline{RR} : valor medio de los RR
- SDNN: Desviación estándar de todos los intervalos RR analizados.
- SDNN_{index}: Media de las desviaciones estándar calculadas en segmentos de cinco minutos de duración.
- SDANN: Desviación estándar de la media de los intervalos RR calculada en segmentos de cinco minutos de duración.
- MIRRNN: Margen intercuartil de todos los intervalos RR analizados.
- MIRR_{index}: Media de los márgenes intercuartiles calculados en segmentos de cinco minutos de duración.
- HRV_{index}: Relación entre el número de RR y la frecuencia modal.
- pNN50: Porcentaje de latidos en los cuales las diferencias absolutas de la serie RR excede 50 ms.
- r-MSSD: Desviación estándar de las diferencias absolutas de la serie RR.
- MDARR: Mediana de las diferencias absolutas de los RR.
- Diferencia noche-día: diferencia entre la media de los RR en el período nocturno y en el período diurno.

La posible significación clínica de las mayoría de estos índices se ha descrito en el apartado 2.1 y la tabla 2.4. Recuérdese que se habían propuesto unos valores dicotómicos para la diagnosis o prognosis empleando algunos de estos índices. Comparando la tabla 7.2 con la tabla 2.2 se observa que el nivel de variabilidad asociado a estos sujetos está muy por encima del valor crítico.

La tabla 7.2 muestra los datos de interés médico. Es la tabla de la cual se parte para realizar un diagnóstico. A esta tabla hemos incorporado algunos índices propios como son el MIRRNN, MIRR_{index} y el MDARR que, en la práctica, son mejoras de índices ya empleados. No obstante, la única información sobre ritmos circadianos que aparece en la tabla 7.2 es la diferencia noche-día que sólo refleja el ritmo circadiano asociado al valor medio de los RR. Es por esto que creemos que las gráficas presentadas aportan mayor información sobre los procesos que ocurren en la actividad diaria del sujeto.

Sujeto	\bar{RR} (s)	SDNN (s)	SDNN _{ind} (s)	SDANN (s)	MIFRNN (s)	MIFR _{ind} (s)	HRV _{ind}	pNN50 (%)	r-MSSD (s)	MDARR (s)	Dif. Noche-día (s)
1	0,975	0,243	0,097	0,235	0,170	0,081	40,7	25,2	0,031	0,026	0,483
2	0,954	0,199	0,062	0,202	0,143	0,050	30,5	6,92	0,018	0,014	0,446
3	0,899	0,182	0,075	0,176	0,103	0,055	26,8	15,6	0,033	0,017	0,378
4	0,904	0,226	0,118	0,201	0,157	0,103	38,7	38,4	0,081	0,034	0,412
5	0,847	0,246	0,093	0,240	0,167	0,075	41,0	31,4	0,054	0,027	0,499
6	0,860	0,137	0,054	0,125	0,136	0,044	35,7	7,36	0,023	0,013	0,233

Tabla 7.2 Cuantificación de los registros ambulatorios empleando métodos estadísticos.

Sujeto	Correlación entre SD y MIFR	Correlación entre pNN50 y MDARR
1	0,83	0,98
2	0,81	0,93
3	0,74	0,94
4	0,92	0,92
5	0,85	0,97
6	0,85	0,88

Tabla 7.3 Correlación entre índices estadísticos

7.2 Aplicación a registros ambulatorios mediante métodos espectrales

Tal y como se comentó en el capítulo 3, los métodos espectrales tienen la virtud de mostrar la interacción de los diferentes sistemas fisiológicos con el ritmo cardíaco. Dentro de este apartado se van a aplicar al análisis de registros ambulatorios para poder discernir la posible existencia de ritmos circadianos que modifiquen el espectro de la variabilidad del ritmo cardíaco.

Para la cuantificación de la señal mediante métodos espectrales se ha optado por emplear cuatro índices: el balance entre la potencia de baja y alta frecuencia (LF/HF), el porcentaje de potencia en la banda de muy baja frecuencia (PVLf%), en la banda de baja frecuencia (PLF%) y en la banda de alta frecuencia (PHF%). La definición de bandas es la propuesta en el apartado 3.1.1. Para la extracción de dichos índices se ha fragmentado cada uno de los registros en segmentos de cinco minutos en los cuales se ha calculado cada uno de los índices.

En la figura 7.7 se representan los ritmos circadianos del índice LF/HF correspondientes a los seis sujetos. Recuérdese que este índice es una estimación del balance simpático/parasimpático. Claramente se observa que el índice LF/HF es menor en períodos nocturnos que en períodos diurnos. Se debe apreciar también la gran dispersión de valores de dicho índice entre sujetos. Mientras que los sujetos 4 y 5 tienen un índice LF/HF medio especialmente bajo, los sujetos 1 y 2 lo tienen alto, especialmente durante el período diurno. En la tabla 7.4 se muestran los valores medios de este índice.

En la figura 7.8 se muestran los ritmos circadianos del índice PVLf%. Recuérdese que este índice refleja la influencia de osciladores lentos en la variabilidad del ritmo cardíaco (termorregulación, sistema renina-angiotensina, etc.). En media, es menor el índice PVLf% durante la noche que durante el día (hecho perfectamente observable en el sujeto 4). No obstante, el ritmo circadiano no es tan pronunciado como en el caso del índice LF/HF. En todos los sujetos este índice acostumbra a tener aproximadamente valores medios similares (varía entre el 28,9% para el sujeto 4 y el 45,8% para el sujeto 6) aunque fluctúa rápidamente a lo largo del registro. En la tabla 7.4 se muestran los valores medios de este índice.

En la figura 7.9 se muestran los ritmos circadianos del índice PLF%. Si en el caso del índice PVLf% era difícil encontrar una pauta general, en el caso de este índice aún lo es más. Únicamente realizando el promediado de los índices se observa un ligero descenso. Recuérdese que este índice se asocia principalmente a la actividad simpática y a la regulación del sistema vasomotor. Por lo tanto, parece que durante la noche no ocurre una modificación importante en esta banda. La variación entre sujetos es menor que en el caso del índice PVLf% (ahora varía entre un 41,3% para el sujeto 5 y un 54,7% para los sujetos 1 y 2) fluctuando también rápidamente a lo largo del registro. La tabla 7.5 muestra los valores medios de este índice.

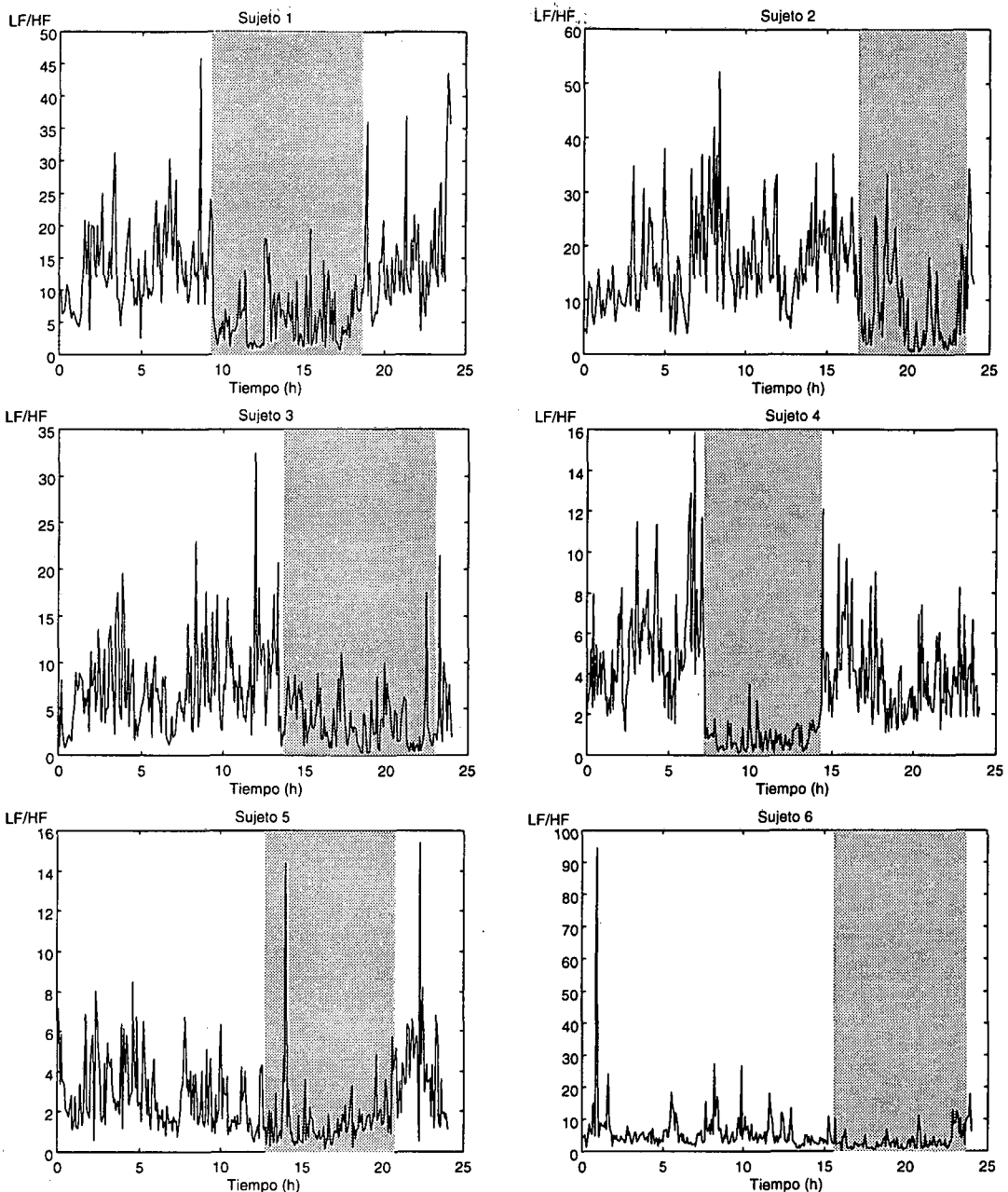


Figura 7.7 Ritmo circadiano del índice LF/HF. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

En la figura 7.10 se muestran los resultados para el índice PHF%. Recuérdese que el índice PHF% proporciona información sobre la modulación del sistema vagal (componente respiratoria fundamentalmente) sobre la variabilidad del ritmo cardíaco. De lo dicho para los ritmos circadianos de los índices LF/HF y PLF% se desprende claramente que durante la noche, el índice PHF% es mucho más elevado que durante el día. Es decir: **durante el período nocturno, la descarga vagal es mucho mayor que durante el período diurno**. Este índice posee además gran variabilidad entre sujetos (varía entre el 7,38% para el sujeto 2 y el 26,0% para el sujeto 4). Obsérvese que es precisamente para el sujeto 2 para quien el índice es mínimo, al igual que era el que poseía el índice pNN50 menor, confirmando este hecho la reducción de la excitación vagal a medida que la persona va envejeciendo [Smith et al., 1981].

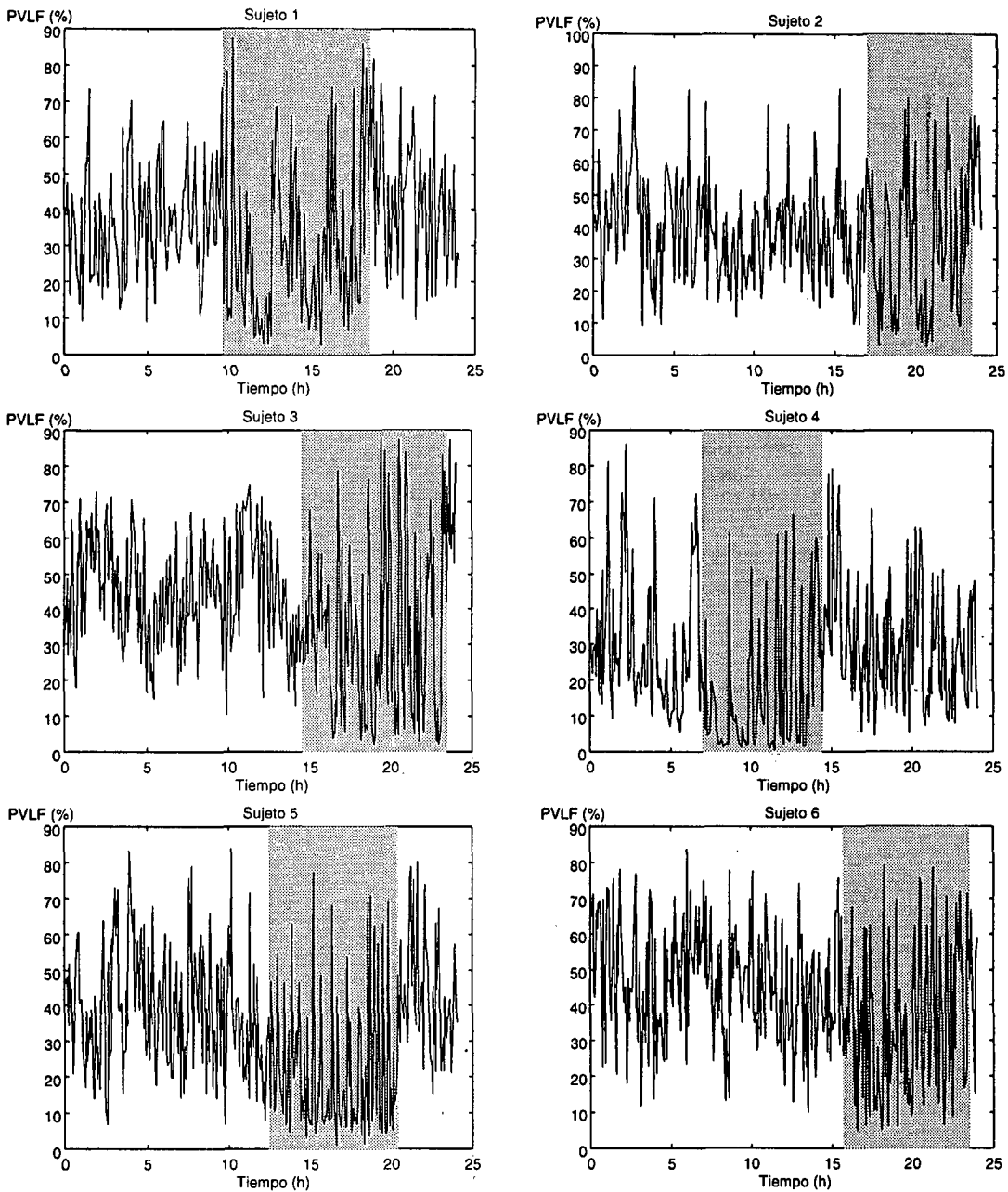


Figura 7.8 Ritmo circadiano del índice PVLf%. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

De lo anteriormente dicho sobre el índice PLF% y PHF% se desprende la siguiente observación: **la reducción en el ritmo cardíaco asociado al período nocturno es debida únicamente a un aumento de la excitación vagal.** La actividad simpática (el índice PLF%) se reduce imperceptiblemente en los períodos nocturnos.

Finalmente, en la tabla 7.4 se muestra el análisis estadístico de la variación de los índice espectrales. Para los cuatro índice (LF/HF, PVLf%, PLF% y PHF%) se muestra su media \pm desviación estándar a lo largo de todo el registro así como durante los períodos diurno y nocturno. De esta forma quedan patentes las diferencias entre sujetos (punto muy interesante para el médico interesado en la dicotomización de sujetos) y la presencia de ritmo circadianos debido a las diferencias entre día y noche.

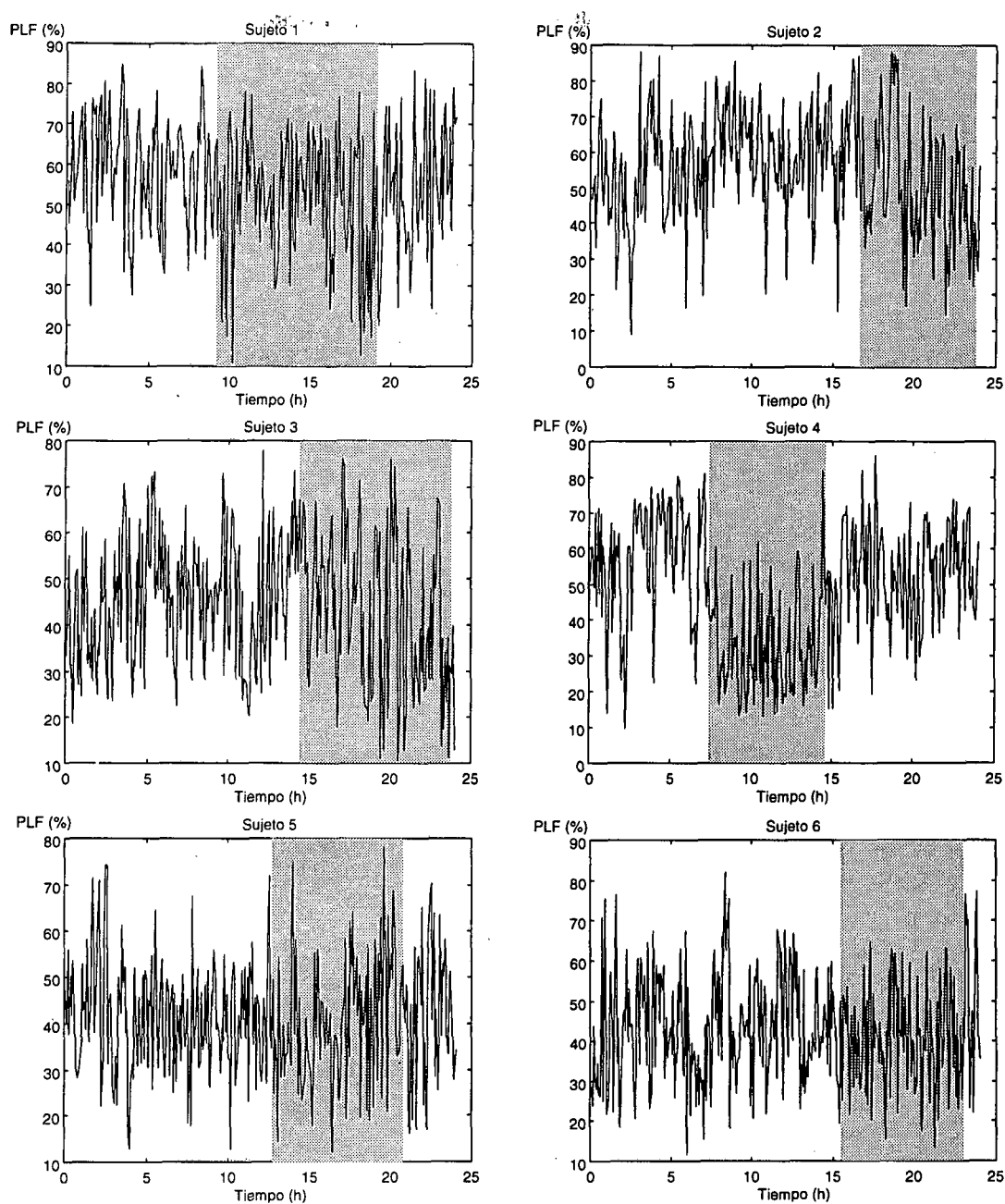


Figura 7.9 Ritmo circadiano del índice PLF%. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

Obsérvese en la tabla 7.4 que la mayor contribución a la potencia del espectro de la variabilidad del ritmo cardíaco corresponde a la banda LF que genera, aproximadamente, la mitad de dicha potencia. La segunda contribución es la correspondiente a la banda VLF mientras que la banda HF suele ser la que menos influye en la variabilidad del ritmo cardíaco. Esto puede resultar un contrasentido si se compara con los resultados obtenidos en los anteriores capítulos. No obstante recuérdese que las medidas realizadas en registros de corta duración se realizaban en situaciones controladas en las cuales el movimiento del sujeto y su adaptación a las condiciones ambientales no afectaban. En registros ambulatorios, en cambio, el sujeto realiza esfuerzo físico, se ve sometido a cambios de temperatura y posturales que provocan el aumento de la contribución de las bandas VLF y LF. Por otro lado, no respira periódicamente lo

cual incrementa aún más la potencia de ambas bandas si se compara con la banda HF.

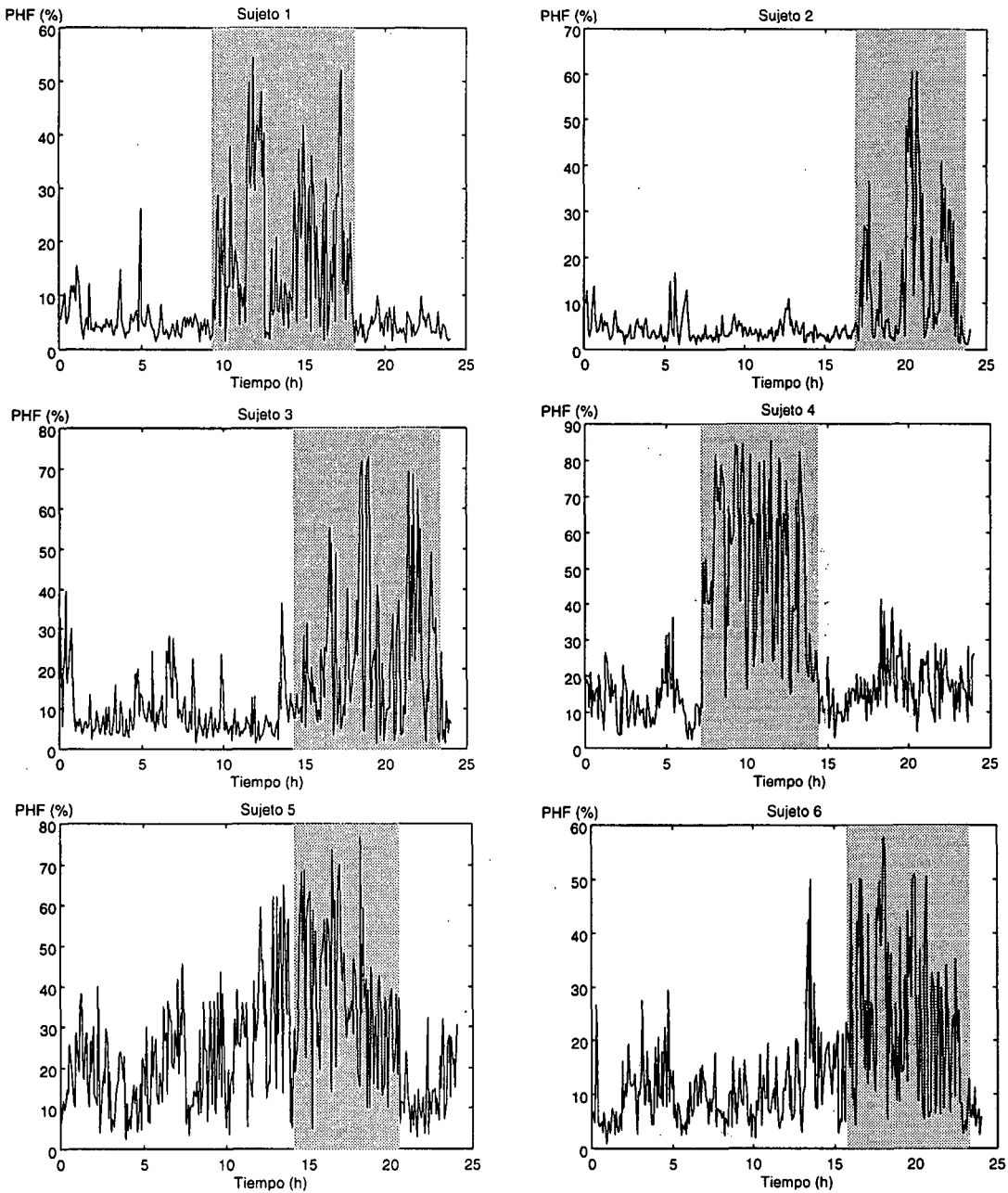


Figura 7.10 Ritmo circadiano del índice PHF%. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

Por lo tanto, del análisis espectral de la variabilidad del ritmo cardíaco en registros ambulatorios se concluye que:

- Durante el período nocturno, la variabilidad del ritmo cardíaco está dominada por la excitación vagal que es la que provoca que el ritmo cardíaco sea inferior.
- La banda LF es la que presenta mayor potencia, en media, a lo largo de las 24 horas, seguida de la banda VLF. La adaptabilidad del sujeto a las actividades cotidianas puede explicar que ésta última banda sea más dominante que la banda HF.

Índice	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Sujeto 5	Sujeto 6
LF/HF (total)	10,8 ± 7,70	14,4 ± 9,03	5,87 ± 4,53	3,37 ± 2,66	2,55 ± 2,00	5,10 ± 6,44
LF/HF (día)	13,4 ± 7,10	16,7 ± 8,40	7,37 ± 4,77	4,16 ± 2,16	3,24 ± 2,02	6,05 ± 7,55
LF/HF (noche)	5,61 ± 4,75	7,64 ± 7,52	3,34 ± 3,37	0,77 ± 0,58	1,42 ± 1,67	2,32 ± 1,78
PVLF% (total)	35,3 ± 19,2	37,9 ± 18,3	41,0 ± 20,3	26,1 ± 19,2	33,3 ± 19,9	42,5 ± 18,7
PVLF% (día)	38,9 ± 17,5	39,0 ± 15,9	45,7 ± 15,2	28,9 ± 16,9	41,1 ± 17,2	45,8 ± 16,1
PVLF% (noche)	28,5 ± 20,7	31,6 ± 21,8	32,1 ± 25,9	14,5 ± 18,6	20,8 ± 17,9	32,4 ± 21,2
PLF% (total)	54,7 ± 15,7	54,7 ± 16,5	44,6 ± 15,1	48,0 ± 17,9	41,3 ± 13,0	42,8 ± 13,9
PLF% (día)	55,9 ± 16,3	56,7 ± 15,3	45,2 ± 13,4	55,0 ± 14,7	41,5 ± 12,7	43,5 ± 13,8
PLF% (noche)	53,2 ± 14,7	51,4 ± 18,2	42,6 ± 17,5	31,6 ± 13,1	38,7 ± 12,7	41,4 ± 13,3
PHF% (total)	10,0 ± 11,0	7,38 ± 9,90	14,4 ± 14,2	26,0 ± 21,3	25,4 ± 16,5	14,7 ± 11,9
PHF% (día)	5,21 ± 3,41	4,24 ± 2,55	9,13 ± 7,03	16,0 ± 7,30	17,5 ± 10,0	10,7 ± 6,89
PHF% (noche)	18,3 ± 13,7	17,0 ± 16,0	25,3 ± 19,5	53,9 ± 21,0	40,6 ± 18,1	26,1 ± 15,1

Tabla 7.4 Resultado del análisis estadístico de los índices espectrales.

7.3 Análisis de registros ambulatorios mediante biespectro

El análisis de registros mediante el empleo del biespectro proporciona información sobre los procesos no lineales que afectan a la generación de la señal. Esta información puede ser empleada para la cuantificación de registros ambulatorios de 24 horas. El propósito de este apartado es investigar la posible presencia de ciclos circadianos en la no linealidad de la serie RR.

Un paso previo a la cuantificación es la designación de un índice que cuantifique la no linealidad de la señal. Recuérdese que si la señal consiste en un único tono a una determinada frecuencia, el biespectro de la señal es un pico situado en (f_1, f_1) siendo f_1 la frecuencia de la señal. Si en cambio aparecen espúrios y armónicos de la señal, el biespectro presenta picos en distintos puntos del plano (f, f) . Proponemos como indicador de no linealidad el siguiente índice:

$$INL = \frac{\int_{f_1=0}^{f_1=f_s/2} \int_{f_2=0}^{f_2=f_s/2} B(f_1, f_2) df_1 df_2}{\int_{f_1=0}^{f_1=f_s/2} f_1 df_1 \int_{f_2=0}^{f_2=f_s/2} f_2 df_2} \tag{7.1}$$

donde $B(f_1, f_2)$ es la bicoherencia de la señal a analizar (véase el apartado 5.2.1) y f_s es la frecuencia de muestreo. A efectos prácticos, hemos empleado el siguiente índice para señales discretas:

$$INL = \frac{\sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L B(k, l)}{L^2} \tag{7.2}$$

L es la longitud de la señal analizada. Obsérvese que para este segundo índice, si la señal es un tono puro tendremos que $INL=1/L^2$, mientras que si la bicoherencia es constante a lo largo de todo el plano (ruido blanco) se tendrá que $INL=1$.

Para el análisis de registros RR ambulatorios se ha empleado una ventana deslizante de 256 muestras en las cuales se ha evaluado el biespectro, se ha normalizado el resultado para obtener la bicoherencia y finalmente se ha realizado la cuantificación mediante la expresión (7.2). En la figura 7.11 se muestran los ritmos circadianos del índice INL para los seis sujetos analizados. Se observa que el índice de no linealidad (INL) es claramente mayor en períodos nocturnos que durante períodos diurnos. Esto está en correspondencia con los resultados presentados en 5.2.3.

En la tabla 7.5 se muestra el análisis estadístico del índice INL para los diferentes sujetos. Obsérvese que el índice, en media, varía entre 1,29 para el sujeto 2 y 3,52 para el sujeto 4. Por otro lado, el índice en media es superior durante la noche que durante el día indicando una mayor no linealidad de la señal durante el período nocturno. Por lo tanto, cabe concluir que **durante los períodos nocturnos, la no linealidad de la señal RR es mayor.**

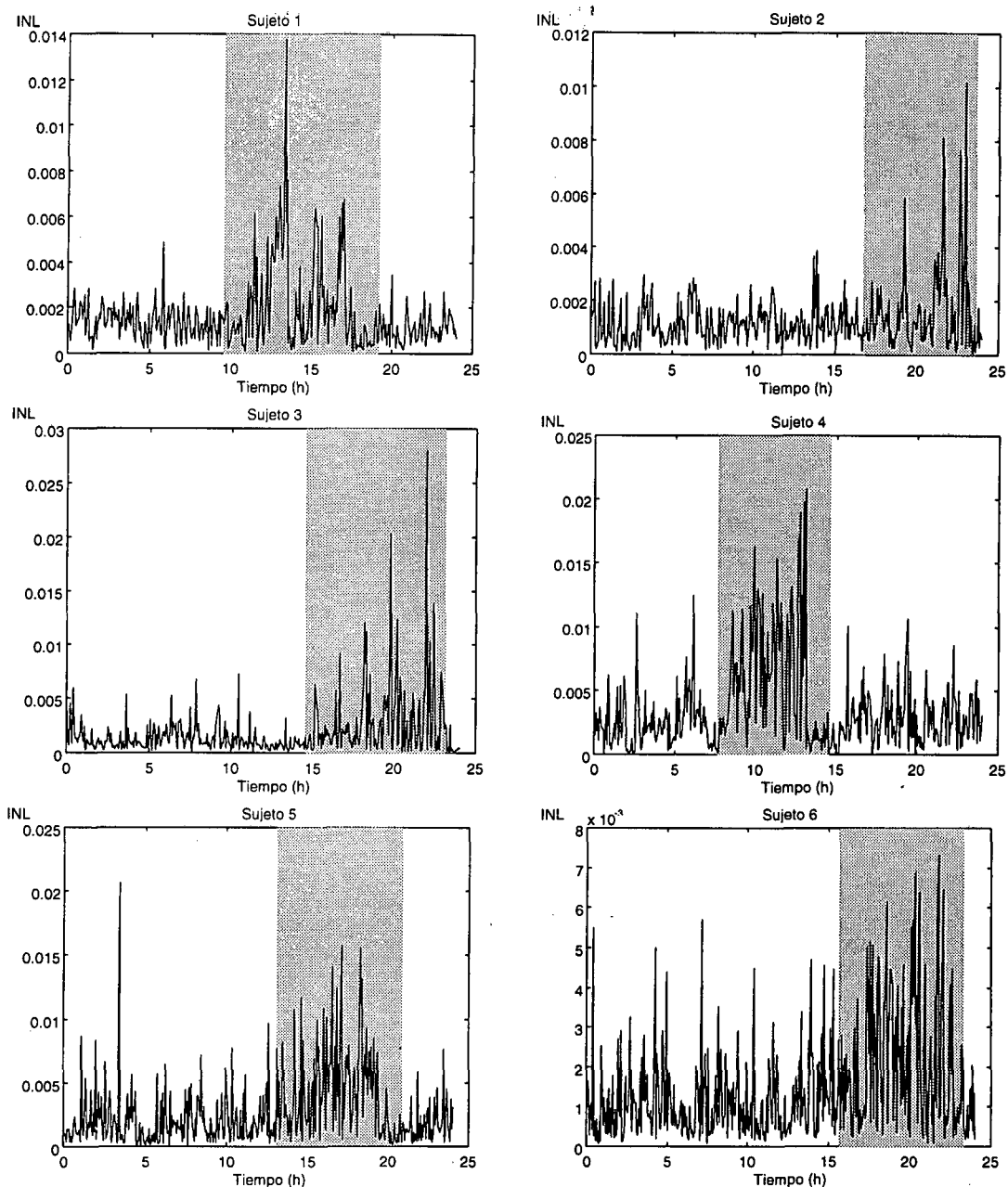


Figura 7.11 Ritmos circadianos del índice INL. La zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

Sujeto	INL ($\times 1000$)	INL día ($\times 1000$)	INL noche ($\times 1000$)
1	$1,63 \pm 1,57$	$1,22 \pm 0,73$	$2,80 \pm 2,38$
2	$1,29 \pm 1,17$	$1,14 \pm 0,72$	$2,05 \pm 2,22$
3	$1,92 \pm 2,66$	$1,32 \pm 1,16$	$3,28 \pm 4,32$
4	$3,52 \pm 3,52$	$2,55 \pm 2,01$	$7,30 \pm 4,85$
5	$2,68 \pm 2,81$	$1,88 \pm 1,97$	$5,32 \pm 3,79$
6	$1,44 \pm 1,39$	$1,10 \pm 0,96$	$2,58 \pm 1,94$

Tabla 7.5 Análisis estadístico del índice INL.

7.4 Análisis de la complejidad de registros ambulatorios

Como último paso de caracterización de la señal RR ambulatoria se propone a continuación el empleo del exponente de Hurst que cuantifica el grado de complejidad de la señal. Recuérdese que cuanto más se aproxima este índice a la unidad menor es la complejidad de la señal.

Se ha utilizado el método dispersivo para la estimación del exponente de Hurst (véase página 5.18) empleando ventanas deslizantes de 1024 muestras con un decalado de 256 muestras. De esta forma se ha investigado la presencia de ritmos circadianos de la complejidad en la variabilidad del ritmo cardíaco. La figura 7.12 muestra los resultados obtenidos en los seis sujetos analizados.

Obsérvese que, de nuevo, hay una tendencia clara en los seis sujetos: el exponente de Hurst suele ser menor durante períodos nocturnos que durante períodos diurnos. Esto implica que **la complejidad de la señal es más alta durante períodos nocturnos**. Esto ya había sido comentado en el capítulo 5 para un conjunto de sujetos menor.

Sujeto	H	H día	H noche
1	0,83 ± 0,07	0,84 ± 0,06	0,79 ± 0,08
2	0,84 ± 0,07	0,85 ± 0,06	0,78 ± 0,09
3	0,84 ± 0,06	0,85 ± 0,04	0,83 ± 0,07
4	0,80 ± 0,11	0,82 ± 0,09	0,71 ± 0,14
5	0,84 ± 0,08	0,86 ± 0,06	0,77 ± 0,09
6	0,86 ± 0,07	0,89 ± 0,05	0,83 ± 0,07

Tabla 7.6 Análisis estadístico del exponente de Hurst.

En la tabla 7.6 se muestra el análisis estadístico del exponente de Hurst. Todos los sujetos presentan un exponente de Hurst muy semejante en media (varía entre 0,80 para el sujeto 4 y 0,86 para el sujeto 6). En todos ellos, el exponente de Hurst es, en media, menor durante la noche que durante el día, indicando una mayor complejidad de la señal durante el período nocturno. Queda confirmado, por lo tanto, que **los períodos de mayor complejidad de la señal suceden cuando el sujeto está durmiendo**.

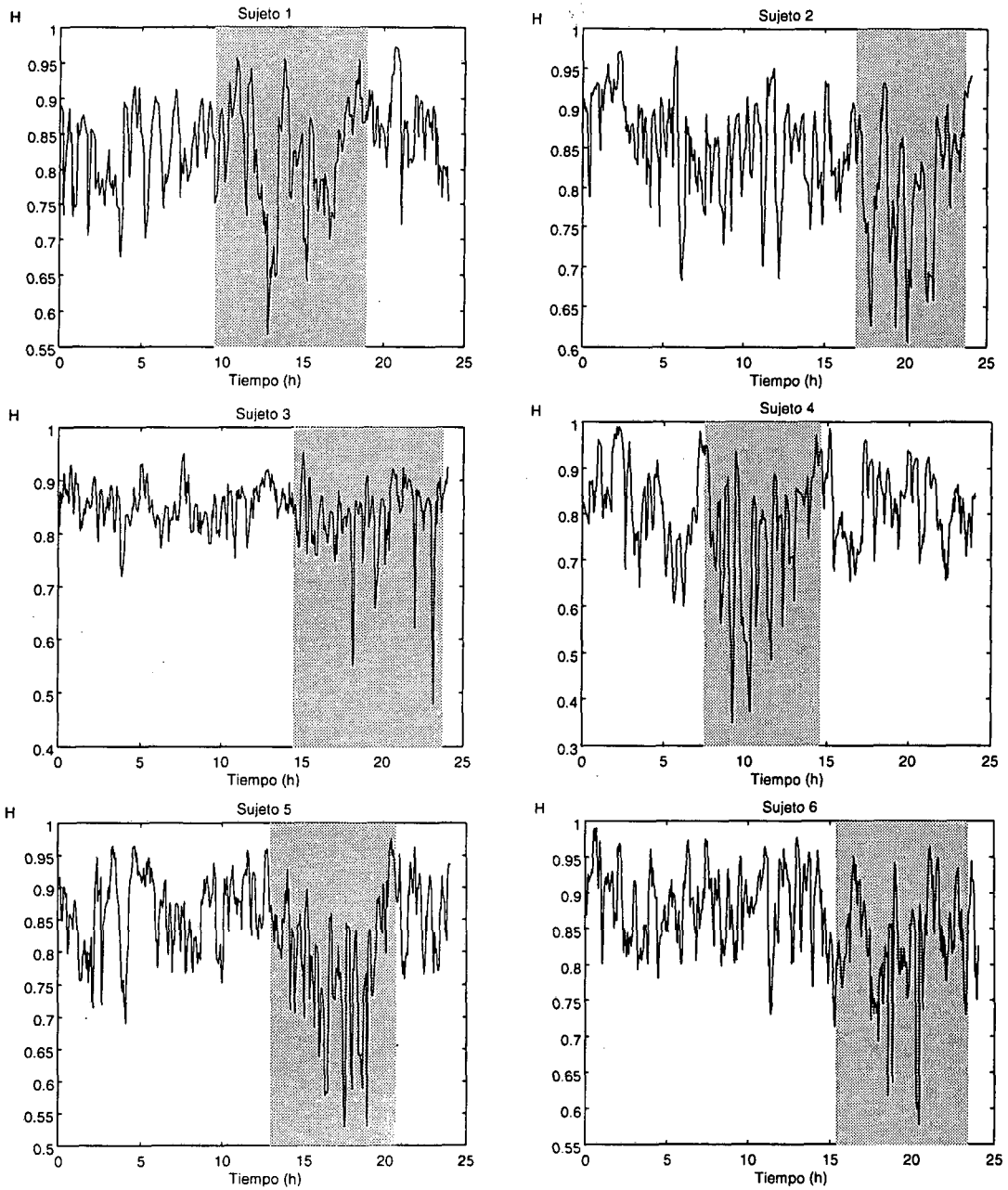


Figura 7.12 Ritmos circadianos del exponente de Hurst. Las zonas sombreadas corresponden a los períodos nocturnos.

7.5 Conclusiones sobre al análisis de registros ambulatorios

El objetivo de este capítulo ha sido investigar la presencia de variaciones comunes a lo largo de un día entero en sujetos sanos. Se ha cuantificado la señal en distintos dominios y se ha llegado a las siguientes conclusiones obtenidas a partir de observaciones:

- **Se obtiene un menor ritmo cardíaco, una mayor variabilidad total de la señal y mayor excitación vagal durante los períodos nocturnos que durante los diurnos.**
- **La reducción en el ritmo cardíaco asociada al período nocturno es debida principalmente a un aumento de la excitación vagal y no a un descenso de la excitación simpática.**
- **La banda LF es la dominante, en media, en registros ambulatorios.**
- **La señal RR es más no lineal y presenta mayor complejidad durante los períodos nocturnos.**

Parece ser, por tanto, que existe una clara correlación entre la excitación vagal, la no linealidad de la señal y la complejidad de ésta.