



Laboratorio 5 - Señales y Sistemas

Integrantes: Christian Méndez Acosta
Israel Arias Panez
Curso: Análisis de Datos
Sección A-1
Profesor: Max Chacón Pacheco
Ayudante: Gustavo Hurtado A.

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
2. Marco Teórico	2
2.1. Correlación	2
2.2. Correlación cruzada de señales	2
2.3. Convolución	2
2.4. Periodograma	3
2.5. Transformada Pwelch	3
2.6. Función de transferencia	3
3. Resultados	4
3.1. Series temporales para normocapnia y hipercapnia	4
3.2. Correlación cruzada	4
3.3. Autocorrelación	8
3.4. Periodogramas	10
3.5. Función de transferencia	12
3.6. Aplicación de escalón inverso	12
4. Análisis de los resultados	14
4.1. Correlación cruzada	16
4.2. Función de transferencia	17
4.3. Reacción del sistema	18
5. Conclusiones	19
Bibliografía	21

1. Introducción

Las señales o series de tiempo pueden contener múltiples tipos de información contenida en ellas, lo que permite su uso en muchas aplicaciones, la compañía DEWESoft menciona alguna de ellas: Predicción del clima, modelado y análisis económico, procesamiento de imágenes/gráficos, aplicaciones médicas, estudios sísmicos, entre otras (DEWESoft, 2022).

En esta experiencia de laboratorio se realizará un análisis de señales ligado al ámbito de la medicina, para esto se dispone de dos señales, una correspondiente a un paciente con normocapnia y la otra señal correspondiente a un paciente con hipercapnia. La hipercapnia es la condición vinculada a demasiado dióxido de carbono (CO_2) en el torrente sanguíneo (Healthline, 2017). La normocapnia es la condición donde se tiene una cantidad normal de dióxido de carbono (CO_2) en el torrente sanguíneo (Foex and Prys-Roberts, 1975).

El objetivo principal de esta experiencia de laboratorio es el lograr diferenciar mediante el análisis de las señales el cuándo los pacientes se encuentren en estado de hipercapnia o normocapnia. Ambas señales poseen la medida de la presión arterial media (PAM) y la velocidad de flujo sanguíneo cerebral (VFSC). Para lograr el objetivo principal se plantean como objetivos secundarios: realizar un análisis de correlación cruzada entre ambas señales, modelar mediante función de transferencia la relación entre PAM-VFSC y mediante la aplicación de escalón inverso para identificar si los niveles de VFSC retornan a los valores considerados como normales.

Para la realización del análisis y aplicación de métodos se realizará mediante el software R, utilizando librerías para el procesamiento de señales como lo son MTS y Signal, entre otros. El informe presenta la siguiente estructura: la presente introducción en donde se contextualizó el tema y el objetivo a lograr, un marco teórico en el cual se presentaran conceptos importantes a considerar para el entendimiento de la experiencia, una sección de resultados en donde se presentaran los resultados conseguidos de la aplicación de los distintos métodos de análisis de señales mencionados en los objetivos secundarios, la sección de análisis de resultados donde se analizaran los resultados conseguidos, buscando dar explicación a los fenómenos observados dentro del contexto, para finalmente recapitular lo realizado junto a los hallazgos más significativos en la sección de conclusión.

2. Marco Teórico

2.1. Correlación

La correlación es un tipo de asociación entre dos variables numéricas, en la cual se puede obtener información de una variable a partir de la otra. La correlación permite medir el signo y magnitud de la tendencia (creciente o decreciente) entre dos variables. Si el signo es positivo corresponde a una relación directa o positiva, si el signo es negativo corresponde a una relación indirecta o negativa, si el signo es nulo indica que no existe tendencia entre las variables. La magnitud indica la fuerza de la relación, y toma valores entre -1 a 1. Cuanto más cercano sea el valor a los extremos del intervalo (1 o -1) más fuerte será la tendencia de las variables, o será menor la dispersión que existe en los puntos alrededor de dicha tendencia. Cuanto más cerca del cero esté el coeficiente de correlación, más débil será la tendencia, es decir, habrá más dispersión en la nube de puntos. (Máxima Formación, 2020) La correlación con un enfoque a series de tiempo se presenta en el concepto de correlación cruzada de señales.

2.2. Correlación cruzada de señales

La correlación cruzada es una medida de similitud de dos series en función del desplazamiento de una con respecto a la otra. Se usa comúnmente para buscar una señal larga para una característica conocida más corta. (Hmong, 2012) La secuencia de correlación cruzada se define por la siguiente expresión (Chacón, 2015):

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l) \quad (1)$$

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n+l)y(n) \quad (2)$$

2.3. Convolución

La convolución es una operación matemática que combina dos señales y genera una tercera señal. Suponiendo que tenemos dos funciones, $f(t)$ y $g(t)$, la convolución es una integral que representa la magnitud en que se superpone una función g a medida que se

desplaza sobre la función f . (MathWorks, sfa)

$$(f * g)(t) \approx \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)dr \quad (3)$$

2.4. Periodograma

El periodograma es una estimación no paramétrica de la densidad espectral de potencia (PSD) de un proceso aleatorio y estacionario en sentido amplio. El periodograma es la transformada de Fourier de la estimación sesgada de la secuencia de autocorrelación. (MathWorks, sfb)

2.5. Transformada Pwelch

Es un enfoque para la estimación de la densidad espectral. Se utiliza para estimar la potencia de una señal a diferentes frecuencias. El método se basa en el concepto de utilizar estimaciones de espectro de periodograma, que son el resultado de convertir una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. El método de Welch es una mejora del método estándar de estimación del espectro de periodograma y del método de Bartlett, ya que reduce el ruido en los espectros de potencia estimados a cambio de reducir la resolución de frecuencia. Debido al ruido causado por datos imperfectos y finitos, a menudo se desea la reducción de ruido del método de Welch. (Hmong, sf)

2.6. Función de transferencia

La Función de Transferencia $H(s)$ es el cociente formado por $Y(s)$, la Transformada de Laplace de la salida de un sistema LTI (Causal, Lineal e Invariante en el tiempo), dividida entre $X(s)$, la Transformada de Laplace de la entrada a dicho sistema, cuando las condiciones iniciales son iguales a cero en el tiempo $t=0$. (Universidad Nacional de Tucuman, 2015)

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (4)$$

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los archivos entregados: TJ000.txt para normocapnia y TJ001.txt para hipercapnia. Ambos archivos contienen información referente a los niveles de presión arterial media (PAM), niveles de CO₂ y velocidad del flujo sanguíneo cerebral (VFSC).

3.1. Series temporales para normocapnia y hipercapnia

En las Figuras 1, 2 y 3, se puede apreciar las series temporales para normocapnia con PAM, VSFC y CO₂ respectivamente. Las series temporales fueron obtenidas a través de una frecuencia de muestreo de 5Hz.

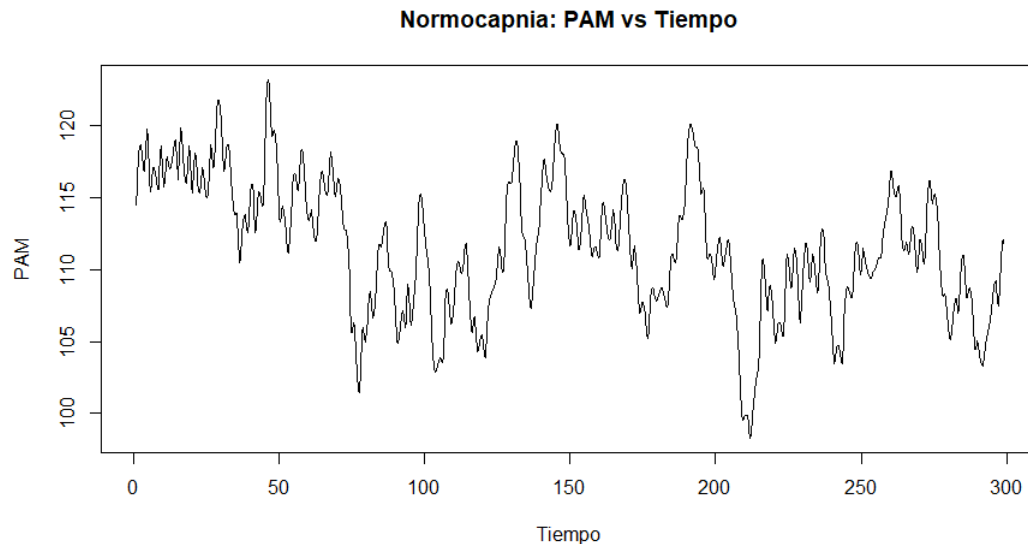


Figura 1: Serie Temporal - PAM sujeto con normocapnia

En las Figuras 4, 5 y 6, se puede apreciar las series temporales para hipercapnia con PAM, VSFC y CO₂ respectivamente. Las series temporales fueron obtenidas a través de una frecuencia de muestreo 5Hz.

3.2. Correlación cruzada

A continuación, se presenta la correlación entre las series temporales de presión arterial media (PAM) y velocidad de flujo sanguíneo cerebral (VFSC) utilizando lag máximo

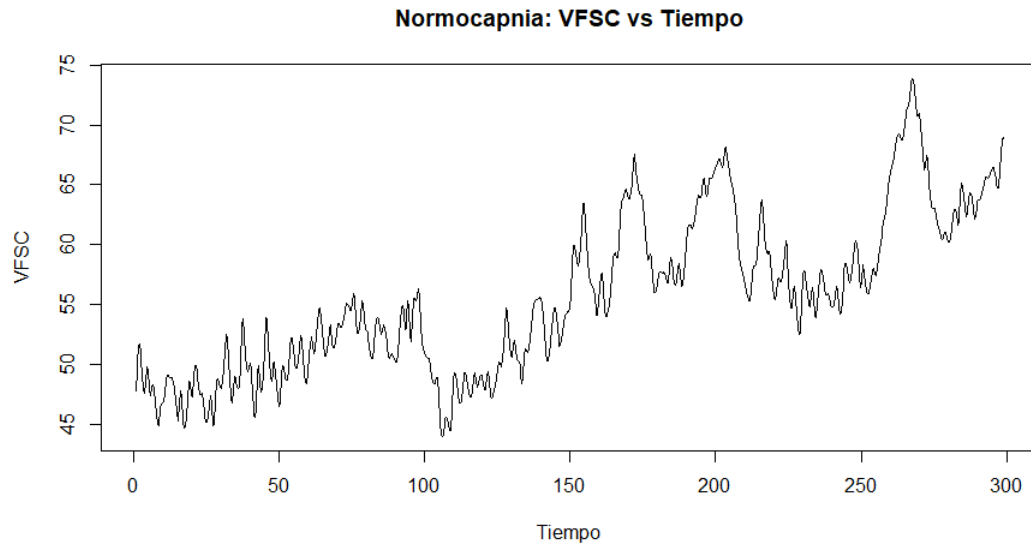


Figura 2: Serie Temporal - VFSC sujeto con normocapnia

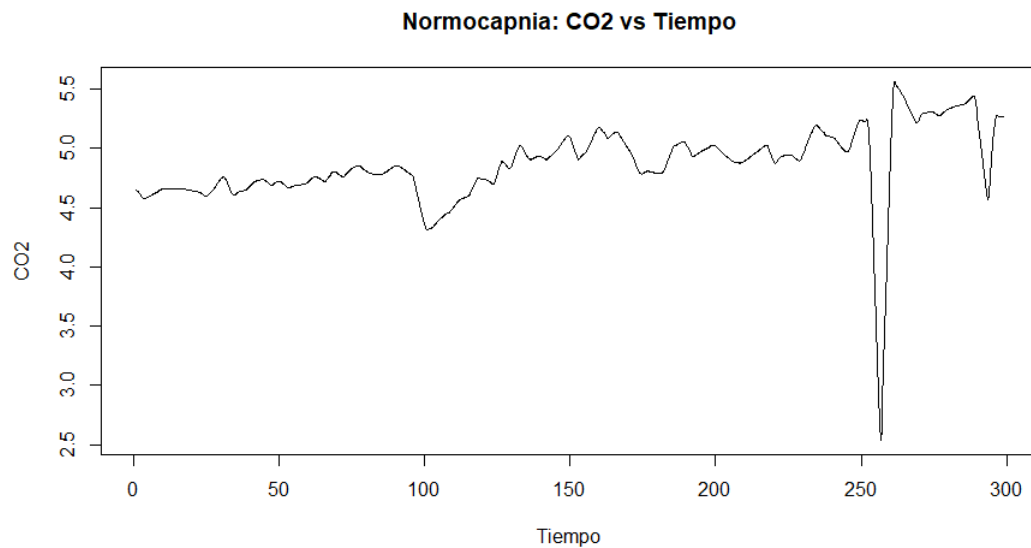


Figura 3: Serie Temporal - CO2 sujeto con normocapnia

de 1000 y 2000. Cabe destacar que el lag indica que tanto se desplaza la serie, el signo del lag indica que serie es desplazada, además a medida que aumenta el lag el número de posibles coincidencias disminuye ya que las series de tiempo dejan de superponerse. El valor de lag que posea un mayor correlación es el que ajusta de mejor forma las series de tiempo, esto quiere decir que, si se tuviera datos por horas con un lag de 12, la diferencia de tiempo entre

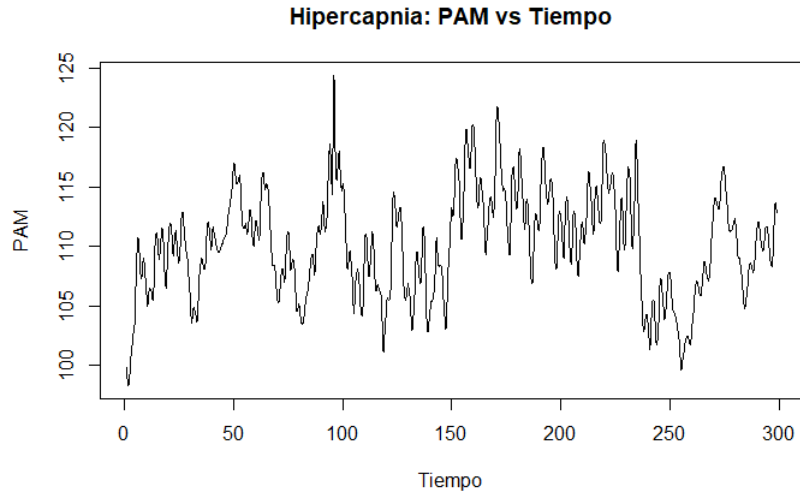


Figura 4: Serie Temporal - PAM sujeto con hipercapnia

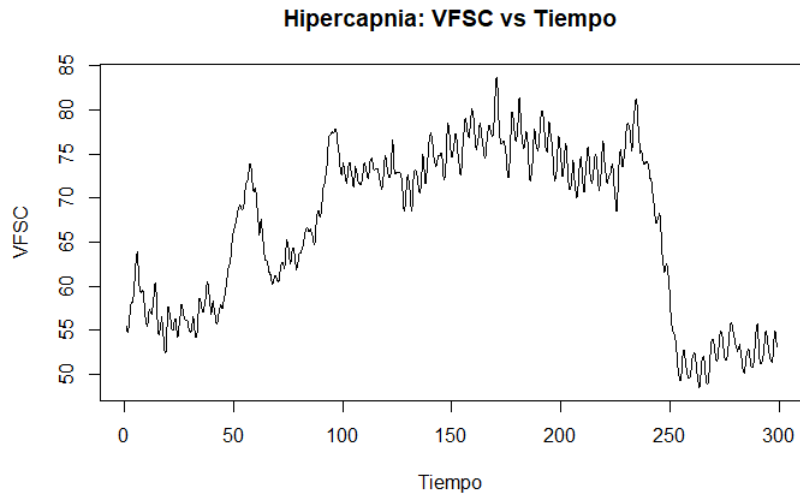


Figura 5: Serie Temporal - VFSC sujeto con hipercapnia

ambas series seria de 12 horas. (Unites States Naval Academy, sf)

En las Figuras 7 y 8, se presenta la correlación entre las series temporales de presión arterial media (PAM) y velocidad de flujo sanguíneo cerebral (VFSC) para hipercapnia, en la Figura 7 se realiza con un lag máximo de 1000 y en la Figura 8 se realiza con un lag máximo de 2000, el cambio de lag máximo tan solo permitió conocer hasta que valor de lag las series de tiempo dejaron de superponerse. Cabe destacar que la mayor correlación conseguida fue positiva y se obtuvo a partir de valores de lag menores a 0.

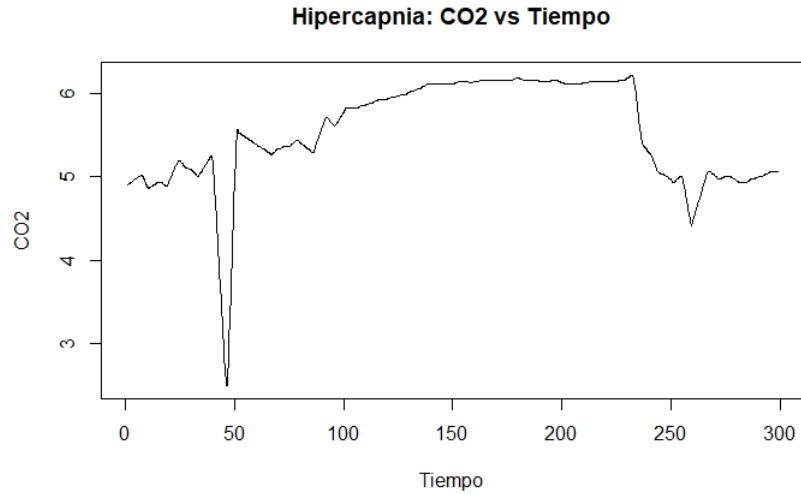


Figura 6: Serie Temporal - CO2 sujeto con hipercapnia

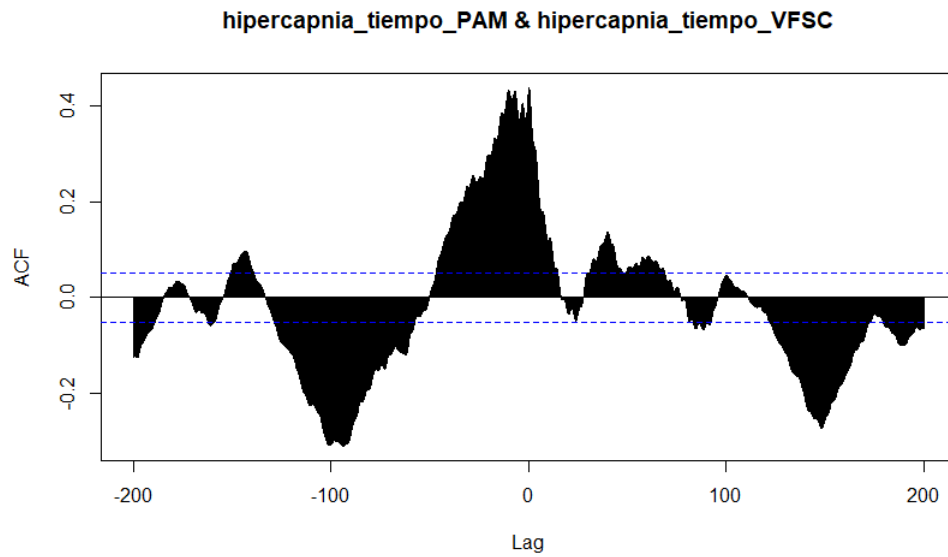


Figura 7: Correlación cruzada: Sujeto con hipercapnia — MaxLag = 1000

En las Figuras 9 y 10, se presenta la correlación entre las series temporales de presión arterial media (PAM) y velocidad de flujo sanguíneo cerebral (VFSC) para normocapnia, en la Figura 9 se realiza con un lag máximo de 1000 y en la Figura 10 se realiza con un lag máximo de 2000. Cabe destacar que la mayor correlación conseguida fue negativa y se obtuvo a partir de valores de lag cercanos a -100 y levemente mayores a 0.

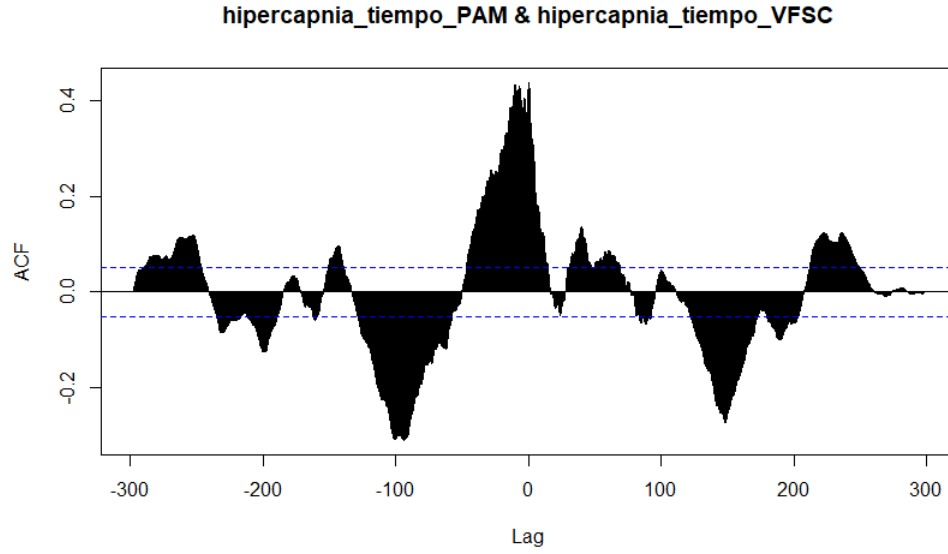


Figura 8: Correlación cruzada: Sujeto con hipercapnia — MaxLag = 2000

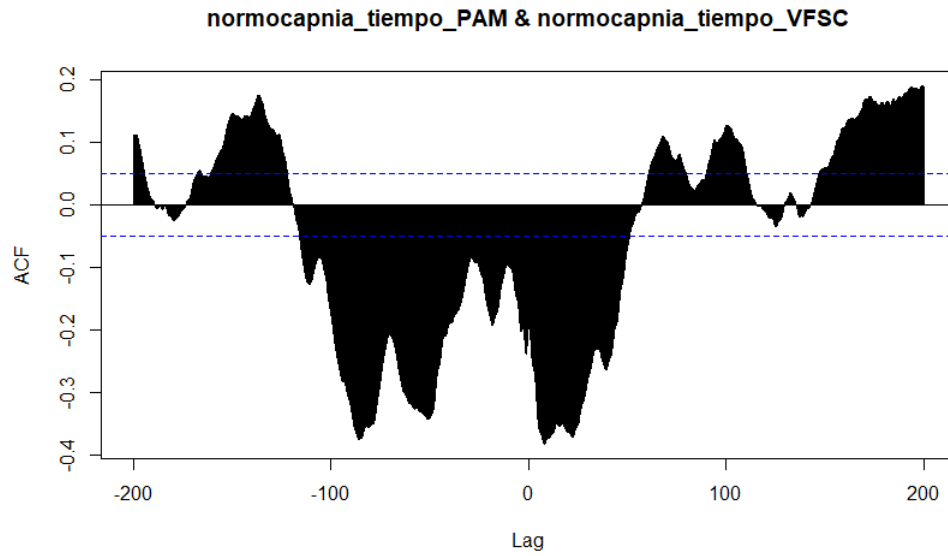


Figura 9: Correlación cruzada: Sujeto con normocapnia— MaxLag = 1000

3.3. Autocorrelación

Luego, se presenta la autocorrelación obtenida a partir de la presión arterial media (PAM) para normocapnia e hipercapnia. En la Figura 11, se presenta la autocorrelación de la presión arterial media (PAM) para hipercapnia con un lag de 1490 (cantidad de muestras de la serie temporal de PAM de hipercapnia). En la Figura 12, se presenta la autocorrelación de

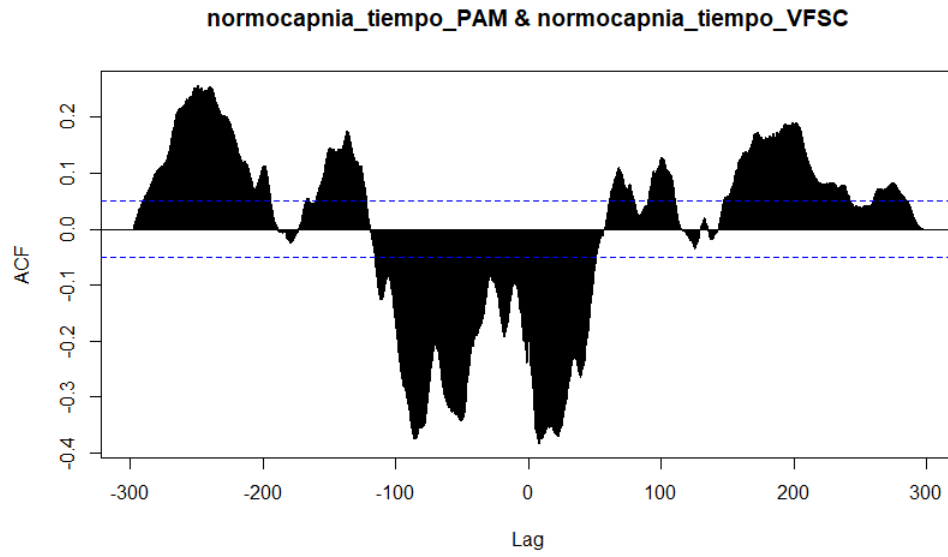


Figura 10: Correlación cruzada: Sujeto con normocapnia— MaxLag = 2000

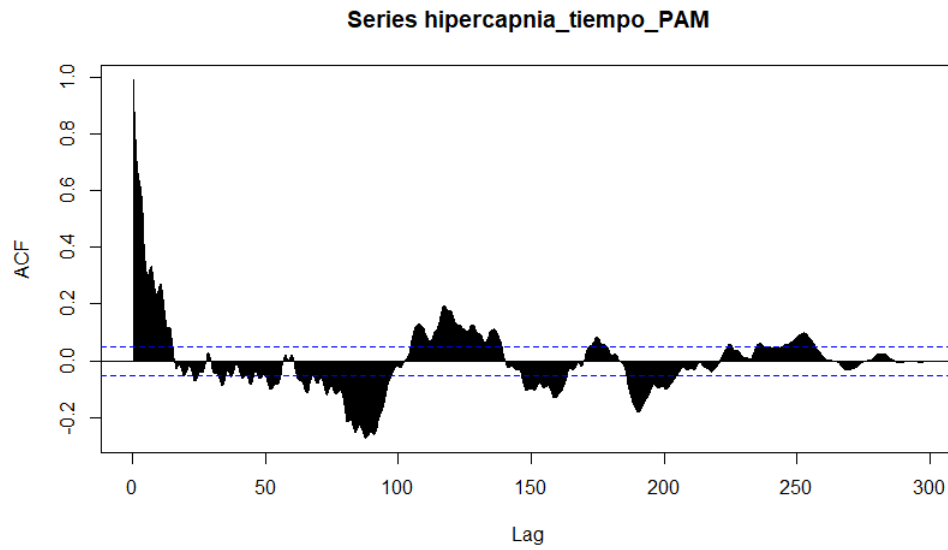


Figura 11: Autocorrelación sujeto con hipercapnia

la presión arterial media (PAM) para normocapnia con un lag de 1491 (cantidad de muestras de la serie temporal de PAM de normocapnia).

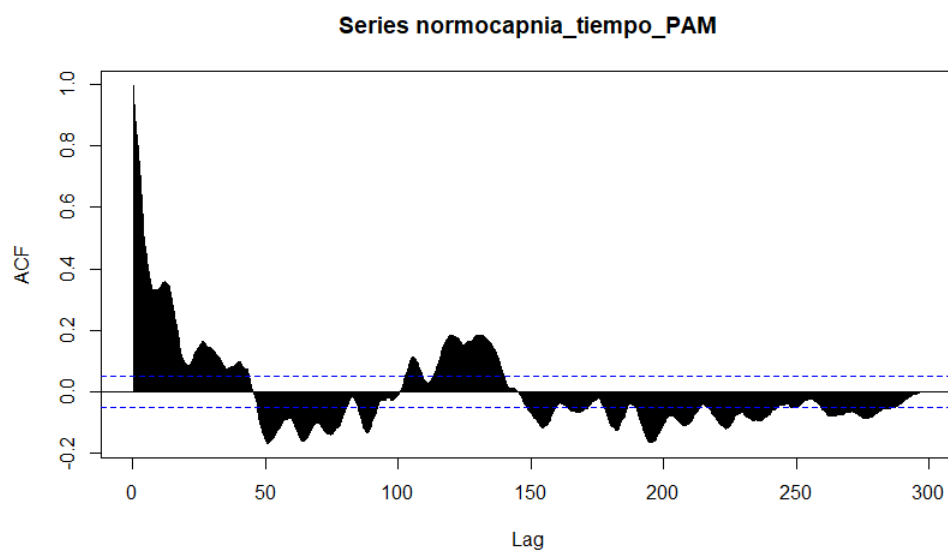


Figura 12: Autocorrelación sujeto con normocapnia

3.4. Periodogramas

En la Figura 13 se puede apreciar el periodograma obtenido al aplicar el método de Pwelch a la autocorrelación de PAM hipercapnia.

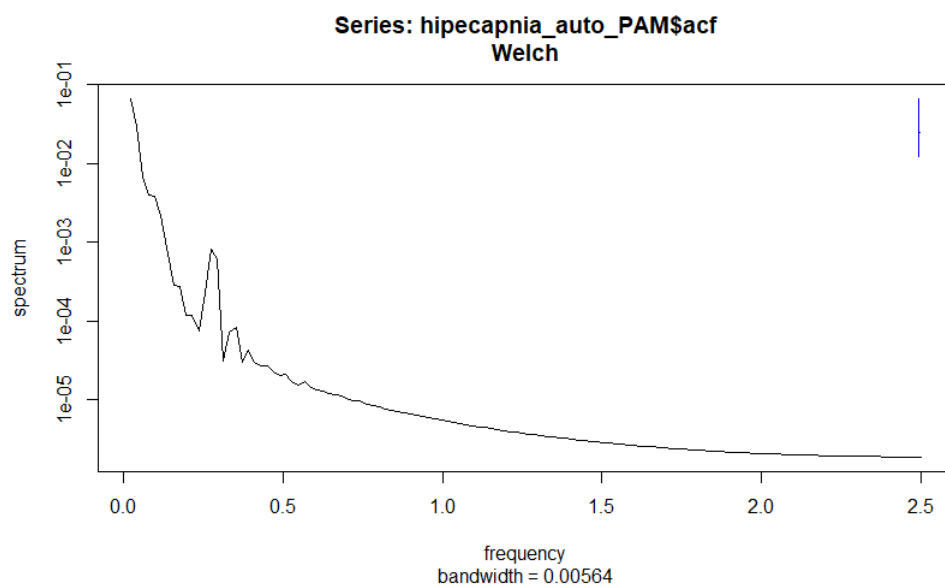


Figura 13: Periodograma para Autocorrelación sujeto con hipercapnia

En la Figura 14 se puede apreciar el periodograma obtenido al aplicar el método

de Pwelch a la autocorrelación de PAM normocapnia.

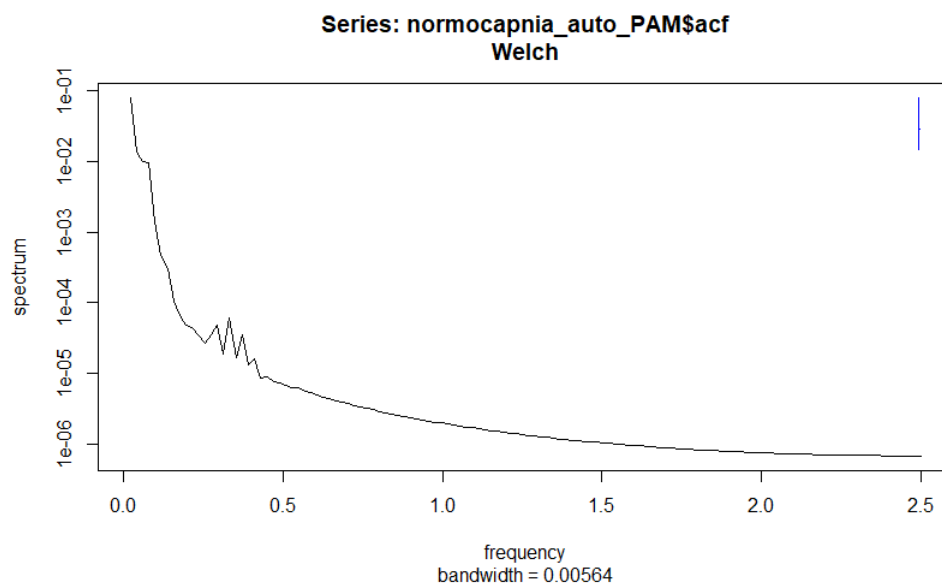


Figura 14: Periodograma para Autocorrelación sujeto con normocapnia

En la Figura 15 se puede apreciar el periodograma obtenido al aplicar el método de Pwelch a la correlación entre PAM y VFSC para hipercapnia.

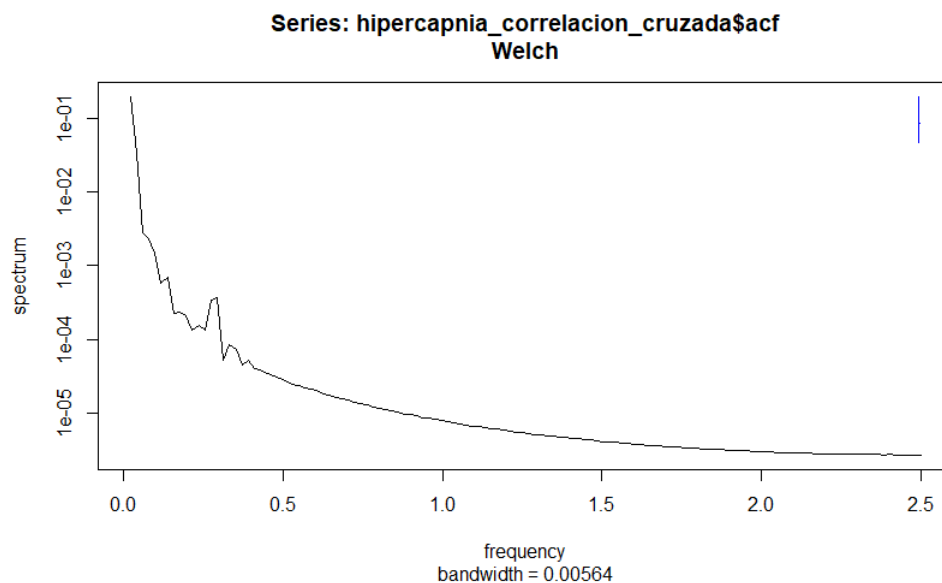


Figura 15: Periodograma para correlación entre PAM y VFSC sujeto con hipercapnia

En la Figura 16 se puede apreciar el periodograma obtenido al aplicar el método de Pwelch a la correlación entre PAM y VFSC para normocapnia.

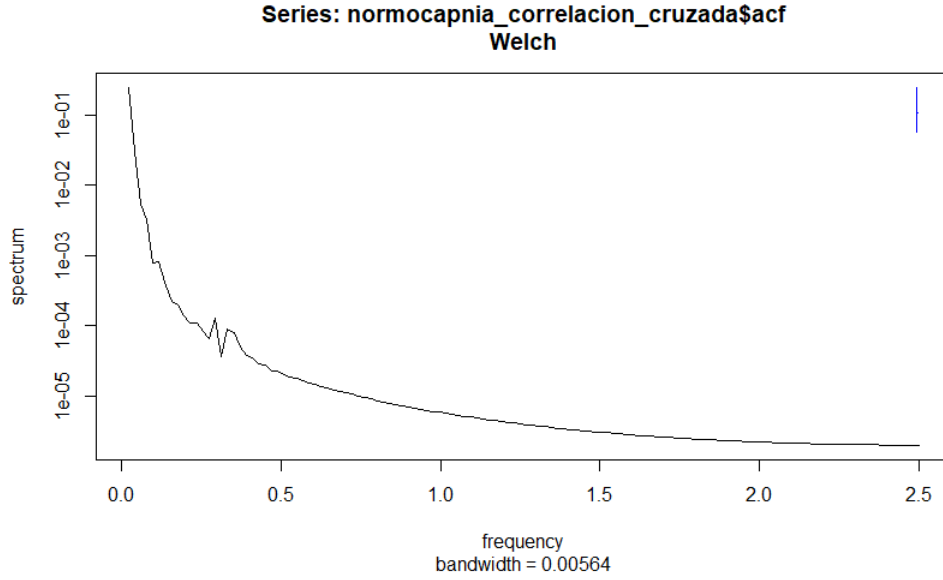


Figura 16: Periodograma para Autocorrelación sujeto con normocapnia

3.5. Función de transferencia

En la Figura 17, se presenta la función de transferencia para hipercapnia, tomando en consideración que para el cálculo de la función de transferencia el **numerador** corresponde al espectrograma resultante de la correlación entre la presión arterial media (PAM) y el flujo sanguíneo cerebral (VFSC) de las series temporales de hipercapnia y el **denominador** corresponde al espectro resultante de la autocorrelación de la velocidad de flujo sanguíneo cerebral(VFSC).

En la Figura 18, se presenta la función de transferencia para normocapnia, tomando en consideración que para el cálculo de la función de transferencia el **numerador** corresponde al espectrograma de las frecuencias obtenidas de la correlación entre la presión arterial media (PAM) y el flujo sanguíneo cerebral (VFSC) utilizando el método de Pwelch y el **denominador** corresponde al espectrograma de las frecuencias obtenidas de la velocidad de flujo sanguíneo cerebral(VFSC) mediante el método de Pwelch.

3.6. Aplicación de escalón inverso

En la Figura 19, se aprecia la respuesta del sistema (función de transferencia hipercapnia) al aplicar un escalón inverso.

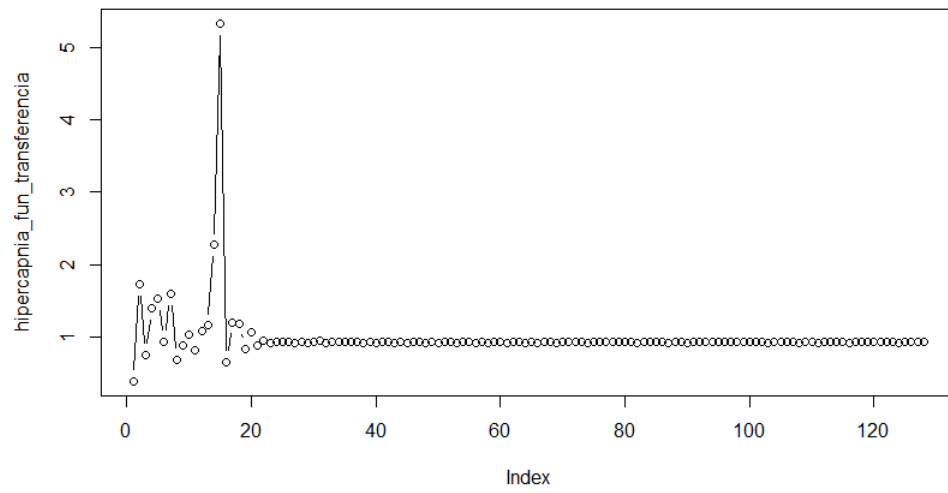


Figura 17: Función de transferencia VFSC sujeto con hipercapnia

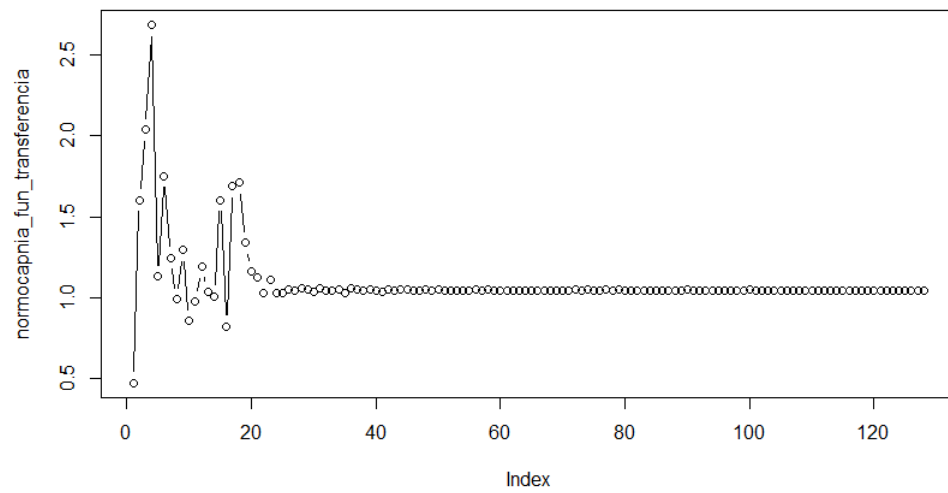


Figura 18: Función de transferencia VFSC sujeto con normocapnia

En la Figura 20, se aprecia la respuesta del sistema (función de transferencia normocapnia) al aplicar un escalón inverso.

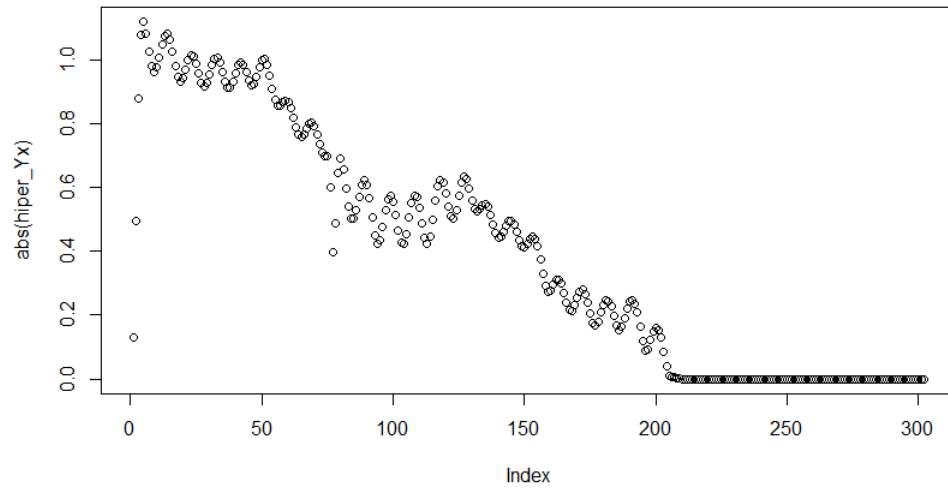


Figura 19: Aplicación de escalón inverso VFSC - Sujeto con hipercapnia

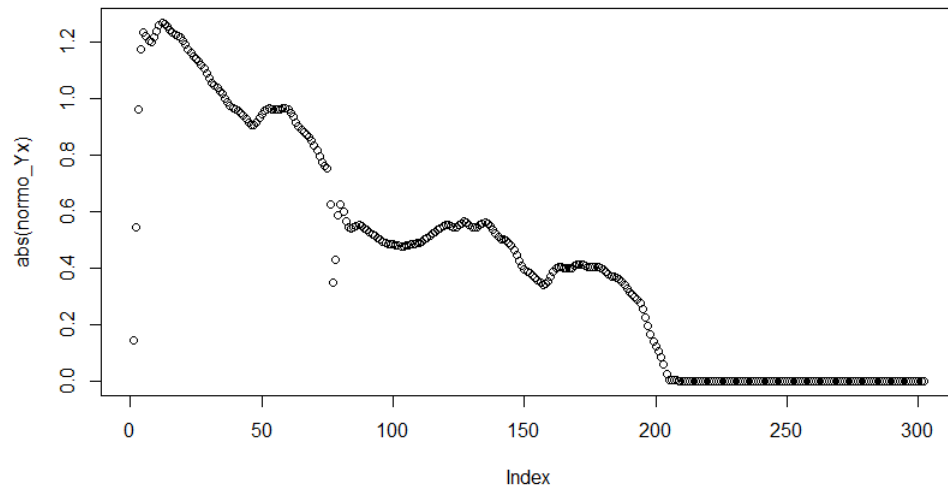


Figura 20: Aplicación de escalón inverso VFSC - Sujeto con normocapnia

4. Análisis de los resultados

Antes de analizar los resultados se hace importante el entender la relación biológica entre la presión arterial media (PAM), la velocidad del flujo sanguíneo cerebral (VFSC) y el dióxido de carbono presente en la sangre (CO_2).

El flujo sanguíneo cerebral es fundamental para el correcto funcionamiento de las funciones cerebrales. El dióxido de carbono (CO_2) tiene un efecto profundo y reversible en la velocidad del flujo sanguíneo cerebral (VFSC), el CO_2 actúa como un potente vasodilatador, provocando la dilatación de las arterias cerebrales, lo que termina incrementando la VFSC, se ha encontrado que una inhalación del 5 % de CO_2 causa un incremento del 50 % de VFSC (Battisti-Charbonney et al., 2011). Sin embargo, se ha encontrado que este aumento en la VFSC no es causado directamente por el CO_2 . En el rango de la hipercapnia, sucede que cuando el CO_2 ha dilatado completamente las arterias cerebrales, el incremento o disminución en la velocidad del flujo sanguíneo cerebral es provocado solo y exclusivamente por la presión arterial media (Cipolla, 2009).

El mecanismo de autorregulación cerebral es el proceso homeostático de regulación de la VFSC en respuesta a cambios en la presión de perfusión cerebral (Cantidad de presión necesaria para mover sangre hacia el cerebro). La forma en que se logra la autorregulación cerebral es mediante la regulación de la resistencia cerebrovascular (CVR), lo cual se traduce en modificar el radio de las arterias y arteriolas del cerebro (Fantini et al., 2016).

En caso de que el mecanismo de autorregulación no pueda ajustar el radio de las arterias cerebrales, un incremento en la presión arterial media (PAM), causa un incremento en la presión de perfusión cerebral, lo que causa un incremento en la VFSC incluso si la demanda metabólica del cerebro permanece constante. Por lo tanto, el mecanismo de autorregulación contrarresta a la presión arterial media incrementando el radio de las arterias (incrementando así su resistencia al flujo sanguíneo), logrando mantener la VFSC en niveles constantes (Fantini et al., 2016).

En resumen, el sujeto con normocapnia no debería presentar una correlación entre sus valores de VFSC y de PAM, debido a que el mecanismo de autorregulación cerebral contrarresta el efecto que tiene la presión arterial sobre la velocidad del flujo sanguíneo cerebral. Sin embargo, en el sujeto con hipercapnia, al tener altos niveles de CO_2 en su cuerpo y este haber dilatado sus arterias cerebrales, no puede regular el radio de las arterias, por lo que la presión arterial media afecta directamente sobre la velocidad del flujo sanguíneo cerebral.

Ante un episodio de hipercapnia prolongado, el cuerpo toma una serie de medidas, como el aumento de la excitabilidad nerviosa simpática cerebral, el aumento de hematocrito,

la liberación de norepinefrina y los factores de vasoconstricción como la endotelina-1 y el peróxido, contrayendo así los vasos sanguíneos cerebrales y reduciendo el flujo sanguíneo cerebral, logrando así la regulación del flujo sanguíneo cerebral ante estar expuesto a niveles elevados de CO₂ por un periodo prolongado (Hao et al., 2022).

4.1. Correlación cruzada

La Figura 10 muestra la correlación cruzada entre PAM y VFSC para el sujeto con normocapnia, con un valor de lag máximo de 2000. En este caso es posible el observar que con un valor de lag de cero se tiene un valor de correlación de aproximadamente -0.2, lo cual es un valor bajo que implica que un cambio en la presión arterial media (PAM) no provoca un cambio en la velocidad de flujo sanguíneo cerebral (VFSC), esto biológicamente tiene sentido ya que como se explicó en la introducción de esta sección, cuando el sujeto se encuentra en un estado normal (normocapnia), con niveles normales de CO₂ en la sangre, los cambios en el PAM no tienen efecto alguno sobre la VFSC, ya que el mecanismo de autorregulación modifica el radio de las arterias para ajustarla a la presión (Fantini et al., 2016).

La Figura 8 muestra la correlación cruzada entre PAM y VFSC para el sujeto con hipercapnia, con un valor de lag máximo de 2000. En este caso es posible el observar que la máxima correlación ocurre en valor con lag igual a cero, o sea, sin efectuar algún desplazamiento para la comparación de ambas señales y comparándolas en un mismo tiempo simultaneo. El valor de 0.4 de correlación indica que, si hay una relación entre la PAM y la VFSC, esto tiene sentido biológicamente, debido a que como se explicó anteriormente, cuando hay un aumento de CO₂ en la sangre, esta dilata las arterias cerebrales, haciendo que la PAM afecte directamente sobre la VFSC al no poder regular el radio de las arterias (Fantini et al., 2016). Este comportamiento se confirma al observar la Figura 21 en donde se puede ver claramente el cómo un aumento o disminución de la PAM hace que aumente o disminuya la VFSC.

Cabe destacar que solo se hizo el análisis de la correlación con lag igual a cero, debido a que, por la naturaleza del problema, no resulta de utilidad el “desplazamiento temporal” que ofrece el análisis de introducir lag, es necesario el analizar el cómo interactúan PAM y VFSC en un mismo tiempo. El análisis con lag resulta útil en fenómenos que pueden

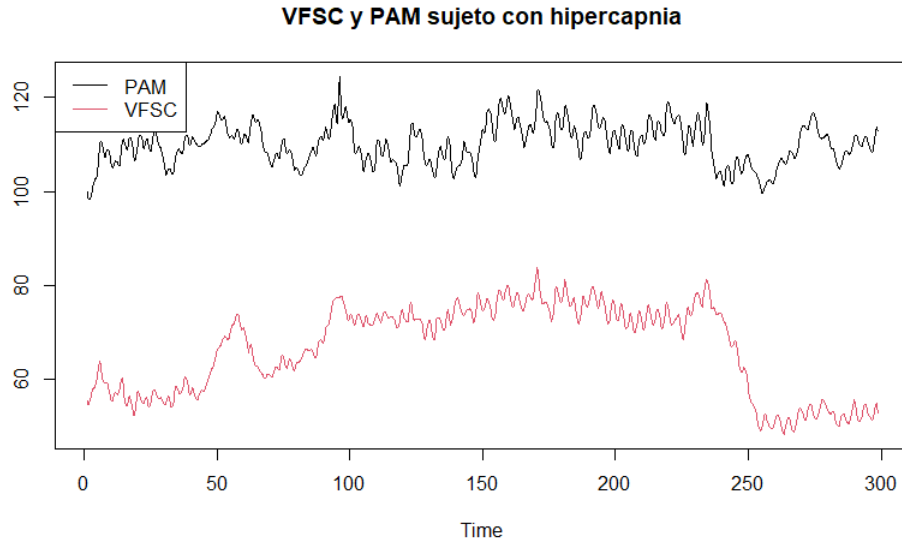


Figura 21: Comparación de VFSC y PAM en sujeto con hipercapnia

tener causales temporales, como lo son el análisis del clima.

4.2. Función de transferencia

En la Figura 18 se muestra la función de transferencia para la VFSC del sujeto con normocapnia y en la Figura 17 se muestra la función de transferencia para la VFSC del sujeto con hipercapnia.

Al comparar ambas funciones de transferencias es posible diferenciar cual corresponde al sujeto con normocapnia y cual pertenece al sujeto con hipercapnia, es posible observar como en la función de transferencia del sujeto con hipercapnia, se presenta una magnitud creciente para la VFSC en el tiempo 15 en adelante, llegando a valores mayores a 5, para luego disminuir, comportamiento similar ya observado en la Figura 5, además el sujeto con normocapnia no alcanza estos valores de magnitud, ya que el sistema de autorregulación anula el efecto de las variaciones en la PAM cuando no hay niveles de CO₂ altos en sangre (Fantini et al., 2016).

Cabe destacar que no se analizó la función de transferencia para la PAM, debido a que el objeto de análisis de interés es la VFSC y para ambas señales pertenecientes al sujeto con normocapnia e hipercapnia, la PAM nunca fluctúa fuera de los valores normales o tienen

una diferencia entre ellas, teniendo una diferencia de menos de una unidad tanto en la media como en la mediana de ambas series de tiempo. (Media de PAM normocapnia = 111.43 — Media de PAM hipercapnia = 110.3).

4.3. Reacción del sistema

En la figura 20 y 19, se puede apreciar la reacción del sistema (función de transferencia) al aplicar un escalón inverso, cabe recordar que la función de transferencia es un modelo creado a través de las series de tiempo que puede ser usado para predecir un comportamiento futuro. En ambos casos los niveles de VFSC se estabilizan en un tiempo mayor a 200, esta estabilización podría explicarse con los mecanismos de autorregulación cerebral, ya que, ante una alteración, ya sea en un estado normal como es normocapnia, o un estado alterado como la hipercapnia, el mecanismo de autorregulación cerebral siempre busca el estabilizar los niveles de la VFSC (Fantini et al., 2016).

Es posible diferenciar al sujeto con hipercapnia debido a que antes de lograr regularse, se puede observar que presenta muchas más fluctuaciones que el sujeto con normocapnia, el cual presenta casi un comportamiento lineal hasta lograr regularse. Esto podría ser explicado debido a que al estar ante un alto nivel de CO₂ en la sangre, el primer intento de regular la VFSC consiste en nivelar el radio de las arterias cerebrales para contrarrestar las variaciones en la PAM, pero al no poder hacerlo debido a que el CO₂ es un potente dilatador arterial, el mecanismo de autorregulación debe recurrir a otros recursos para lograrlo, como lo es el aumento de la excitabilidad nerviosa simpática cerebral, el aumento de hematocrito, la liberación de norepinefrina y los factores de vasoconstricción como la endotelina-1 y el peróxido, entre otros. Logrando así volver a contraer los vasos sanguíneos cerebrales y recuperando los valores de la VFSC (Hao et al., 2022), este proceso no funciona como efecto inmediato y es lo que podría explicar las altas fluctuaciones hasta que logra regular los niveles, delatando así al sujeto con hipercapnia.

5. Conclusiones

En el presente experiencia de laboratorio se realizó el análisis de señales para un sujeto con hipercapnia y un sujeto con normocapnia, se observó las series temporales para ambos sujetos, analizando en particular la velocidad de flujo sanguíneo cerebral (VFSC), observando su relación con la presión arterial media (PAM). Se realizó un análisis de correlación cruzada para ambas señales, se modelaron funciones de transferencia que muestran la relación entre PAM-VFSC y se realizó una predicción de como reaccionarían ambos sujetos ante una variación de la VFSC mediante la aplicación de un escalón inverso a las funciones de transferencia.

Respecto a los objetivos, se considera que estos fueron cumplidos, se cumplió el objetivo principal el cual es lograr diferenciar al sujeto con hipercapnia del sujeto con normocapnia mediante la observación y el análisis de las señales. Además, se cumplieron los objetivos secundarios propuestos, al haber logrado realizar los análisis mencionados en el párrafo anterior.

Dentro de los resultados más relevantes conseguidos se pueden mencionar el que fue posible en primera instancia el lograr relacionar los comportamientos de ambas señales al fenómeno biológico, se descubrió que en el paciente con normocapnia la PAM no afecta en los cambios de la VFSC, ya que existe un mecanismo de autorregulación cerebral que modifica el diámetro de las arterias para ajustarse a la presión arterial media que tiene el cuerpo (Fantini et al., 2016). Este comportamiento se observa en la Figura 9, al conseguir una correlación de -0.2, lo cual es un valor bajo y que denota que no existe correlación entre ambos valores, esto debido al mecanismo de autorregulación. Sin embargo, en el caso del sujeto con hipercapnia, la PAM si afecta directamente a las fluctuaciones de la VFSC, esto debido a que el CO₂ es un vasodilatador potente (Battisti-Charbonney et al., 2011), entonces al estar las arterias y arteriolas cerebrales dilatadas el sistema de autorregulación en un inicio no es capaz de ajustar el diámetro de las arterias, por lo que no logra contrarrestar el efecto de la PAM, haciendo que la VFSC se vea directamente alterada ante las fluctuaciones de la PAM (Fantini et al., 2016). Esto se comprueba en la Figura 7 que muestra una correlación de 0.4 entre ambas señales, aún más, visualmente es posible observar en la Figura 21 donde se ve la tendencia de que la VFSC sigue la misma tendencia que la PAM, esto permite diferencias a ambos sujetos en primera instancia observando solo sus correlaciones.

Por otro lado también es posible el diferenciar a ambos sujetos mediante sus funciones de transferencia, ya entendiendo el fenómeno biológico, el sujeto con hipercapnia presenta una magnitud creciente para la VFSC, llegando a valores mucho más altos que el sujeto con normocapnia, para luego disminuir, este comportamiento es el mismo que se observa al observar la serie de tiempo en la Figura 5, el sujeto con normocapnia no es capaz de alcanzar estos valores de magnitud debido a que como se explicó, el sistema de autorregulación anula cualquier efecto en variaciones de la PAM cuando no existen niveles de CO_2 elevados en la sangre (Fantini et al., 2016).

Luego también fue posible el diferenciar a ambos sujetos al aplicar un escalón inverso a ambas funciones de transferencia, para predecir el comportamiento que tendrían ante una alteración de la VFSC. En ambos casos terminan por estabilizar sus niveles, esto gracias al sistema de autorregulación cerebral, se puede apreciar como en el sujeto con normocapnia se tiene una estabilización prácticamente lineal, sin embargo el sujeto con hipercapnia presenta muchas fluctuaciones antes de estabilizarse en comparación al sujeto con normocapnia, esto se podría explicar debido a que el mecanismo de autorregulación al no poder contrarrestar el efecto de la PAM como lo realiza normalmente (las arterias se encuentran completamente dilatadas y no es posible ajustar el diametro de las mismas), el mecanismo de autorregulación se ve forzado a tomar otra serie de medidas como lo es aumentar la excitabilidad nerviosa simpática cerebral, aumento de hematocrito, liberar norepinefrina y factores de vasoconstricción como la endotelina-1 y peróxido, de esta forma logra volver a contraer las arterias y puede volver a regularse de forma normal, sin embargo todo ese proceso no es inmediato ni funciona de forma directa como el directamente poder ajustar el diametro arterial, lo que explica las fluctuaciones antes de lograr la regulación ante la aplicación del escalón inverso.

Para concluir, se toma como consideración que es posible mejorar aún más el análisis realizado en esta experiencia de laboratorio logrando conseguir información más detallada respecto al análisis de series de tiempo, en especial de funciones de transferencia y aplicaciones a distintos casos, ya que eso mismo fue una de las grandes dificultades de esta experiencia.

Bibliografía

- Battisti-Charbonney, A., Fisher, J., and Duffin, J. (2011). The cerebrovascular response to carbon dioxide in humans. *The Journal of physiology*, 589(12):3039–3048.
- Chacón, M. (2015). Análisis de datos capítulo viii “análisis de series temporales”. [Diapositiva de PowerPoint]. Repositorio material curso Análisis de datos.
- Cipolla, M. J. (2009). Control of cerebral blood flow. In *The cerebral circulation*. Morgan & Claypool Life Sciences.
- DEWESoft (2022). ¿qué es el procesamiento de señales? <https://dewesoft.com/es/daq/ques-procesamiento-de-senal>.
- Fantini, S., Sassaroli, A., Tgavalekos, K. T., and Kornbluth, J. (2016). Cerebral blood flow and autoregulation: current measurement techniques and prospects for noninvasive optical methods. *Neurophotonics*, 3(3):031411.
- Foex, P. and Prys-Roberts, C. (1975). Effect of co2 on myocardial contractility and aortic input impedance during anaesthesia. *British Journal of Anaesthesia*, 47(6):669–678.
- Hao, G.-S., Fan, Q.-L., Hu, Q.-Z., and Hou, Q. (2022). Research progress on the mechanism of cerebral blood flow regulation in hypoxia environment at plateau. *Bioengineered*, 13(3):6353–6358.
- Healthline (2017). Hipercapnia: ¿qué es y cómo se trata? <https://www.healthline.com/health/es/hipercapnia>.
- Hmong (2012). Correlación cruzada. <https://hmong.es/wiki/Cross-correlation>.
- Hmong (s.f.). El método de welch. <https://hmong.es/wiki/Cross-correlation>.
- MathWorks (s.f.a). Convolución. <https://la.mathworks.com/discovery/convolution.html>.
- MathWorks (s.f.b). periodogram. <https://la.mathworks.com/help/signal/ref/periodogram.html>.
- Máxima Formación (2020). ¿qué es la correlación estadística y cómo interpretarla? <https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-la-correlacion-estadistica-y-como-interpretarla/>.

Unites States Naval Academy (s.f.). Cross correlation.
https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/time0alq.htm.

Universidad Nacional de Tucuman (2015). Función de transferencia.
https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2015/12/CL03_Funci%C3%B3n_Transferencia_Modelado_y_An%C3%A1lisis_d