

La duración de la representación emocional en la memoria de trabajo está estrechamente relacionada con el grado de arousal del estímulo: Un estudio neurocognitivo a través de espectroscopia funcional por cuasi-infrarrojos (fNIRS).

JOSE LEON-CARRION*, **
JESÚS DAMAS-LÓPEZ **
JUAN FRANCISCO MARTÍN-RODRÍGUEZ*, **
JUAN MANUEL BARROSO Y MARTÍN*
MARIA ROSARIO DOMÍNGUEZ-MORALES**
UNIVERSIDAD DE SEVILLA* / C.RE.CER. **

RESUMEN

En la presente investigación estudiamos el curso temporal y la duración de representación de los estímulos emocionales en la memoria de trabajo a través de los cambios en la hemoglobina oxigenada (Oxy-Hb) tras la exposición a estímulos emocionalmente competentes. La zona cerebral de estudio es la corteza dorsolateral prefrontal (CPFDL) usando espectroscopia funcional por cuasi-infrarrojos (fNIRS) en un grupo de 30 participantes voluntarios sanos. Encontramos que la activación temporal durante y después de la presentación del estímulo difería a lo largo de un rango de emociones y que los *overshoots* y *undershoots* aparecen aun cuando los estímulos emocionales no están ya presentes. La valencia que no tenía un alto grado de arousal no provocó *overshoot* prefrontal postestimular, y parece estar relacionado con los aspectos puramente cognitivos de la emoción. Alto arousal subjetivo provocó el *overshoot* prefrontal postestimular más pronunciado, y parece estar relacionado con procesos biorregulatorios. Los datos aportan evidencias de que la valencia y el grado de arousal subjetivos de un estímulo emocional pueden determinar si la activación de la CPFDL tras la exposición al mismo será temprana, tardía, fluctuante o estable. El curso temporal de la Oxy-Hb fue descendente-abrupto en los estímulos placenteros/relajantes y ascendente-fluctuante en los estímulos emocionalmente no placenteros. Implicaciones para la teoría y la investigación psicológica son discutidas.

Palabras claves: corteza prefrontal; fNIRS; neuroimagen; valencia; arousal

- * Laboratorio de Neuropsicología Humana, Facultad de Psicología, Departamento de Psicología Experimental, C/ Camilo José Cela s/n. Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain. 41018
** Centro de Rehabilitación de Daño Cerebral (C.RE.CER), Sevilla, Spain

Datos de contacto:

Jose Leon-Carrion: leoncarrion@us.es

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Educación como parte del Plan Nacional para la Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (2004-2007), y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (ERDF): FIT-300100-2004-58.

(Artículo recibido el 3-7-06 y aceptado el 22-9-06)

ABSTRACT

We studied the temporal course of changes in oxygenated hemoglobin (Oxy-Hb) after exposure to emotional stimuli in prefrontal cortex (DLPFC) using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) in a group of 30 normal subjects. We found that temporal activation during and after stimuli presentation differed across a range of emotions and that overshoots and undershoots appear when emotional stimuli are no longer present. Valence lacking a high degree of arousal did not provoke post-stimulus PFC overshoot and seems to be related to the cognitive aspects of emotion. Subjective high arousal provoked the most pronounced PFC post-stimulus overshoot and seems to be related to the bio-regulatory processes. Data show evidence that the subjective valence and degree of arousal of an emotional stimulus could determine whether PFC post-stimulus activation will occur early on, late, fluctuate or remain stable. The temporal course of Oxy-Hb was rapidly descendent for pleasant/relaxing stimuli and fluctuant-ascendant for unpleasant emotional stimuli. We discuss implications for theory and research.

Key words: PFC; fNIRS; neuroimaging; valence; arousal

Las relaciones entre emoción y cognición son un apasionante tema de debate y de investigación que dura ya más de un siglo desde que James (1890) propuso cuáles son los factores que se requieren para la generación y la expresión de una emoción y situó en un segundo plano el papel de la cognición sobre la emoción. Este debate hizo famosos a Schachter y Singer (1962), dos psicólogos cognitivos, y a su teoría sobre el enfoque cognitivo de la emoción en la que se contraponían a James afirmando que lo que realmente distingue la experiencia emocional no se debe a los diferentes patrones de cambios viscerales, como aseguraba James, sino que es el resultado de la evaluación cognitiva del estímulo (para una interesante discusión sobre las teorías clásicas de la emoción ver Papanicolaou, 2004). La pregunta que aún sigue viva es ¿las emociones se disparan automáticamente por debajo de los niveles de la consciencia o necesitan hacerse conscientes para generarse y expresarse en forma de acción? La respuesta era bastante difícil de dar exclusivamente desde el ámbito psicológico, especialmente por la dificultad en disociar temporalmente lo cognitivo de lo visceral, con certeza, durante la generación de una emoción solo con instrumentos psicológicos.

Recientemente la introducción de las técnicas de neuroimagen como instrumentos de uso por los neuropsicólogos ha permitido a la psicología una mejor ubicación dentro de las neurociencias cognitivas y afectivas facilitando una mejor comprensión del fenómeno emocional y de las relaciones entre emoción y cognición. Pero este avance no ha hecho más que abrir nuevas necesidades teóricas sobre la comprensión del fenómeno así como también han aparecido nuevos problemas metodológicos a la luz de los nuevos resultados obtenidos utilizando estas técnicas. Una revisión exhaustiva (Phan, Wager, Taylor & Liberzon, 2002) sobre las investigaciones realizadas sobre emoción con neuroimágenes no ha sido capaz de proporcionar datos concluyentes sobre cuales son las regiones o circuitos neurales implicados en el fenómeno emocional, aunque la mayoría de las investigaciones realizadas implican a la corteza prefrontal y zonas del sistema límbico.

Las técnicas de neuroimagen son los nuevos instrumentos de investigación para los neuropsicólogos y en general para la neurociencia cognitiva. La ayuda que pueden ofrecer instrumentalmente estas técnicas se centran fundamentalmente, y al menos, en aportar datos objetivos para poder definir las variables que entran en juego en la generación de una emoción o en la experiencia emocional. Nos permiten definir operativamente qué es cognitivo y

qué es valoración consciente en términos neurales. Cognitiva podría definirse como toda aquella información que es representada en forma de activación en la corteza cerebral, especialmente en los lóbulos occipitales, temporales, parietales y/o frontales (ver Luria, 1966; Fuster, 2002). Valoración consciente podría también ser definida como toda aquella información/estimulación que activa un determinado grupo neuronal después de un segundo de tiempo. La pregunta que nos hacíamos es pues ¿las emociones se disparan automáticamente por debajo de los niveles de la consciencia o necesitan hacerse conscientes para poder ser evaluadas? Estas definiciones introducen un nuevo elemento en el estudio de las emociones: la temporalidad. Recientemente se ha observado una circuitería cerebral en tiempo real asociada a la generación de una emoción que se desarrolla en menos de 850 milisegundos (ver Leon-Carrion, McManis, Castillo & Papanicolaou, 2006), es decir durante un tiempo de procesamiento pre-consciente durante el cuál el sujeto aún no es consciente de que el estímulo le está afectando. El sujeto, según este estudio, se hace consciente de la emoción cuando la activación llega a la corteza frontal, es decir, entre los 270-850 milisegundos [ver Ledoux (1996) para procesamiento urgente no-consciente vía amígdala]. Para estos autores el valor y la intensidad emocional están asociados a la activación de la zona medial del lóbulo temporal, especialmente el hipocampo y la amígdala. Para ellos la emoción no es un producto de la activación de la corteza frontal sino que es en la corteza prefrontal donde se hace consciente la representación emocional. La corteza prefrontal es el final del circuito percepción-acción donde el tiempo es la esencia (ver Fuster, 2001).

La pregunta que trata de responder este trabajo se sitúa en el área de la emoción consciente, es decir, una vez que la información se encuentra en la corteza prefrontal y permanece en ella para analizarla y poder tomar una decisión y dar una respuesta: ¿cuánto dura la representación emocional en la consciencia y de que depende dicha duración? y en términos neurales ¿cuál es el papel de la corteza prefrontal en el procesamiento emocional? En términos neuropsicológicos nos estamos refiriendo a la memoria operativa o memoria de trabajo, es decir al lugar donde se mantiene y manipula simultáneamente la información (Baddeley, 1992) y a su correlato neuroanatómico-funcional la corteza dorsolateral prefrontal (CDLPF) (Goldman-Rakic, 1998; Fuster, 1973; 2001).

La respuesta a estas preguntas requiere un diseño experimental que incluya el uso de técnicas de neuroimagen que cumplan el requisito de poder analizar la secuencia temporal del registro y tener definidas las variables emocionales a estudiar. Hasta ahora la mayoría de los estudios de neuroimagen aceptan implícita o explícitamente que la activación cerebral se produce como consecuencia de la estimulación directa cognitiva o afectiva y que dicha activación decrece cuando cesa el estímulo, por lo que prácticamente la mayoría de estos estudios se centran en el análisis de los cambios de señal o de activación simultáneos a la duración del estímulo. Sin embargo, las neuronas pueden continuar excitadas y las áreas cerebrales pueden mostrar un aumento de activación inmediatamente después de la retirada del estímulo, especialmente cuando el estímulo es emocional. Por todo ello, cuando se estudian las emociones y sus correlatos cerebrales es muy importante estudiar el curso temporal de las representaciones emocionales en el cerebro. Este tipo de estudios implica que no sólo se deben estudiar los cambios de señales en el cerebro durante la exposición directa a un estímulo emocionalmente competente sino también los cambios que se producen inmediatamente después a la retirada del estímulo.

El otro requisito para el estudio de las emociones a través de neuroimágenes funcionales es tener bien definido los estímulos. La estimulación emocional se caracteriza a través de

dos dimensiones: (a) intensidad o arousal (excitante o calmante) y (b) valencia (placentera o displacentera) (Bradley, Greenwald, Petra, & Lang, 1992; Russell, 1980) aspecto que deberán estar bien definidos y controlados en los estudios. La disociación de los códigos neurales de las dimensiones afectivas es extremadamente importante para poder entender mejor la toma de decisiones y la acción consecuenta con un estímulo cargado emocionalmente.

Este trabajo introduce un nuevo paradigma en el estudio de los procesos emocionales enfatizando el curso temporal y la integración de las dimensiones afectivas en la corteza dorso-lateral prefrontal (CDLPF). La CDLPF ha sido elegida como región de interés ya que existe en un amplio acuerdo en que es la zona cerebral asociada a la memoria de trabajo, definida como el lugar donde permanece la información entre un estímulo y su respuesta (Goldman-Rakic, 1998) en la cima del ciclo percepción acción (Fuster, 2001).

Muchos trabajos con neuroimagen han estudiado el fenómeno emocional durante la percepción directa de un estímulo emocionalmente competente, pero muy pocos han estudiado el periodo que sigue al cese del estímulo (Leon-Carrion *et al.*, 2006). En este trabajo estudiamos el curso temporal de la activación en la CDLPF durante la exposición directa a diferentes estímulos emocionales (periodo "on") y durante el periodo que sigue al cese del estímulo ("off" period). Nuestra hipótesis es que los estímulos emocionales producirán un "overshoot" (incremento de señal) post-estímulo en la CDLPF asociado con el grado de arousal del estímulo pero no con el grado de valencia que estará asociado al periodo "on"; la señal no disminuirá invariablemente después del cese del estímulo sino que por el contrario mostrará overshoot o undershoot (decremento de señal) relacionado con las dimensiones afectivas del estímulo.

MÉTODO

Sujetos

En este experimento participaron 30 voluntarios sanos (50% varones, 50% mujeres) con edades comprendidas entre los 19 y los 51 años (media = 25,84; desviación típica de 7,62). Se estimaron los cocientes de inteligencia según el método de Barona, Reynolds, & Chastain (1984), siendo de 117,13 para los varones y 115,37 para las mujeres. Ningún sujeto presentaba una historia de alteración neurológica o psiquiátrica. Todos los sujetos eran diestros. Se obtuvo un consentimiento informado escrito para cada uno de los sujetos que participaron en la investigación, y el protocolo experimental estaba de acuerdo con la Declaración de Helsinki.

Procedimiento

Se seleccionaron un total de 4 escenas de varias películas en formato DVD (ver tabla 1). Los contenidos incluyen mutilaciones (Clip 1), una escena de la vida cotidiana en la que un hombre conduce por la ciudad (Clip 2), un plano aéreo de una playa (Clip 3) y un acto repulso (Clip 4).

Después del visionado, los participantes evaluaron varios aspectos de cada escena en una escala de 1 a 9 [*Self-Assessment Manikin*, SAM (Lang, Bradley & Cuthbert, 2005)]: la categoría de valencia afectiva (i. e. cuán agradable resultó el vídeo: 1 = lo más desagradable; 9 = lo más agradable) y el grado de arousal autopercibido (i. e. cómo de activado/calmado estuvo durante la exposición al estímulo: 1 = absolutamente relajado; 9 = extremadamente activado). En la Tabla 1 pueden verse los resultados de dichas evaluaciones. Dada tales puntuaciones, los clips 1 y 4 fueron definidos como displacenteros/alta activación y los clips 2 y 3 como placenteros/baja activación.

Tabla 1

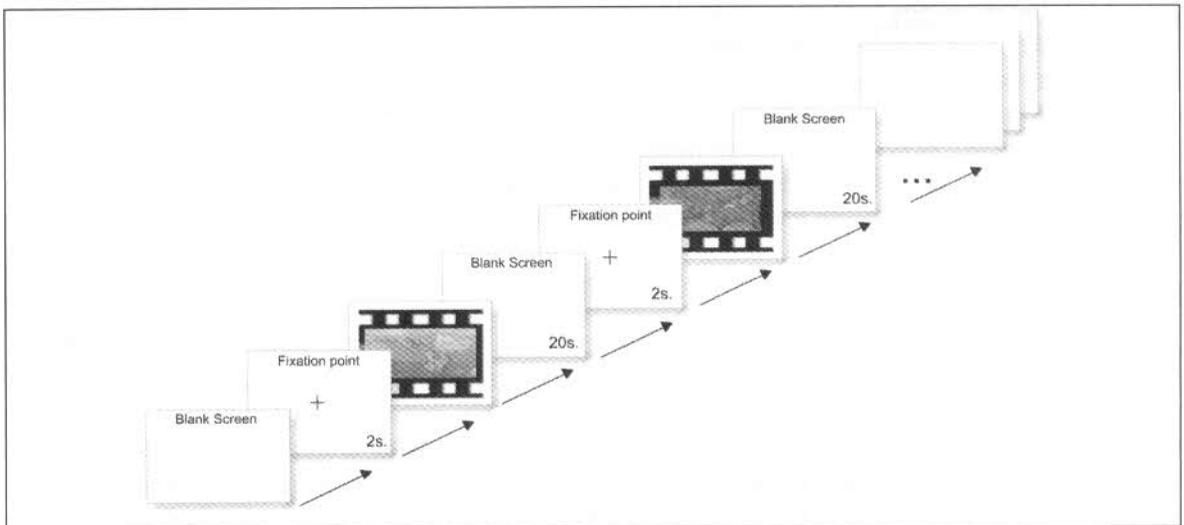
Descripción, duración y Valencia/arousal percibido de los clips seleccionados.

Nombre	Orden clip	Duración del clip (s.)	Descripción	Valencia		Arousal	
				Media	D.T.	Media	D.T.
Salò o le 120 giornate di Sodoma (1976) de Pier Paolo Pasolini	1	13,97	Hombre cuya lengua está siendo cortada	2,14	1,125	6,28	1,750
	4	19,33	Mujer forzada a comer excrementos humanos	2,39	1,750	5,93	2,356
The Beach (2000) de Danny Boyle	3	19,21	Zoom out de una toma aérea de la isla con música relajante de fondo	8,45	1,021	2,17	1,583
The Long Shadow (1992) de Vilmos Zsigmond	2	14,09	Hombre conduciendo por la ciudad	7,11	1,370	2,71	1,902

Los clips fueron presentados a todos los sujetos en un orden preestablecido (ver tabla 1) en una pantalla TFT de 17 pulgadas. Antes de cada clip se mostró un punto de fijación durante 2 s., y después de cada escena se mostró una pantalla en negro durante 20 s. (ver figura 1). Los experimentadores instruyeron a los sujetos para que permaneciesen sentados en un sillón cómodo, sin moverse, y prestando atención durante toda la prueba, ya que desconocían el orden de los estímulos así como la duración del periodo entre los mismos. Los registros fNIRS de la activación prefrontal comenzaban 5 s. antes del primer vídeo, e incluyeron tanto la fase de exposición a los estímulos como la fase posterior ante la pantalla en negro. Los datos del registro correspondientes a los tres segundos anteriores al comienzo de cada vídeo más los 2 s. del punto de fijación del mismo se usaron como línea base para calcular los parámetros de oxigenación de cada condición.

Figura 1

Esquema de presentación de los estímulos. Primero aparece un punto de fijación (X) durante 2 s en pantalla. Acto seguido comienza el vídeo (periodo "on"). Tras el cese del vídeo, aparece una pantalla en negro (periodo "off" de 20 s de duración). Los siguientes ensayos siguen la misma secuencia. Nótese que para cada condición emocional (periodos "on"+"off") todos los datos de oxigenación fueron relativo a su línea base local (cada vídeo posee su propia línea base) para así evitar efecto acumulativo o saturación,



La espectroscopia funcional por cuasi-infrarrojos (fNIRS)

La espectroscopia funcional por cuasi-infrarrojos (*functional Near-Infrared Spectroscopy*, fNIRS) es un instrumento óptico de neuroimagen funcional desarrollado de acuerdo con el método ideado por Chance y Leigh (1977). La validez de este método ha sido probada por diferentes autores tanto en estudios con humanos (Chance, Luo, Nioka, Alsop & Detre, 1997; Hoshi & Tamura, 1993; Kato, Izumiyama, Koizumi, Takahashi & Itoyama, 2002; Leon-Carrion *et al.*, en prensa; Liu, Miwa, Beauvoit, Wang, & Chance, 1993; Luo, Nioka & Chance, 1997) como en animales (Hoshi, Kobayashi & Tamura, 2001). El grado de cambio en el volumen de flujo sanguíneo cerebral medido a través de fNIRS está estrechamente relacionado con los cambios medidos mediante otras técnicas tales como PET (*Positron Emission Tomography*, tomografía por emisión de positrones) (Hock *et al.*, 1997) o resonancia magnética funcional (*functional Magnetic Resonance Imaging*, fMRI) (Kato, Izumiyama, Koizumi, Takahashi & Itoyama, 2002).

El instrumento fNIRS detecta cambios en la concentración de las moléculas de hemoglobina, los transportadores de oxígeno en los glóbulos rojos. Una explicación simple del proceso sería la siguiente: la fuente de luz del instrumento de fNIRS manda luz que penetra en el cerebro y, a partir de la proporción de la misma que es reflejada y registrada en los detectores, determina cuánta sangre oxigenada se haya presente. La base matemática para la fNIRS es la Ley de Beer-Lambert, que define una relación lineal entre la absorción de la radiación electromagnética y la concentración del material objetivo absorbente en un medio dado.

Por medio del instrumento de fNIRS se pueden calcular los cambios en los valores de línea base de los niveles de las moléculas de hemoglobina oxigenada (Oxy-Hb) y desoxigenada (Deoxy-Hb). Los valores de estos niveles se usan para calcular los niveles de oxigenación (en microMoles) y dichos valores pueden ser tratados como porcentajes de cambio en el volumen sanguíneo.

El aparato de registro de NIM (NIM Inc., Philadelphia, USA) tiene unas medidas de 18x6 cm y registra un área de 14x3,5 cm. Se compone de cuatro fuentes de luz rodeadas de diez detectores. Dada la disposición de los detectores y las fuentes, se obtiene un total de 16 combinaciones que configuran 16 canales de adquisición de datos. Cada fuente contiene dos LEDs (con longitudes de onda de 730 y 850 nm [+/-15 nm] respectivamente) con los que ilumina simultáneamente los cuatro detectores más cercanos y las fuentes se activan de una en una consecutivamente durante un corto intervalo de tiempo. Un ciclo completo de adquisición de datos dura aproximadamente 330 ms, dando lugar a una resolución temporal de 3 Hz. Las salidas de la sonda óptica se conectan a un convertidor analógico/digital (A/D) de 12 bits, configurado para tener un paso mínimo de 0,304 mV, que se considera dentro del nivel de ruido del detector/amplificador óptico.

Con una distancia de 2,5 cm entre detector y fuente, se estima que la profundidad aproximada de cada sondeo es de 1,25 cm. Dada la colocación del instrumento, la región cuya actividad se registra corresponde a la corteza prefrontal.

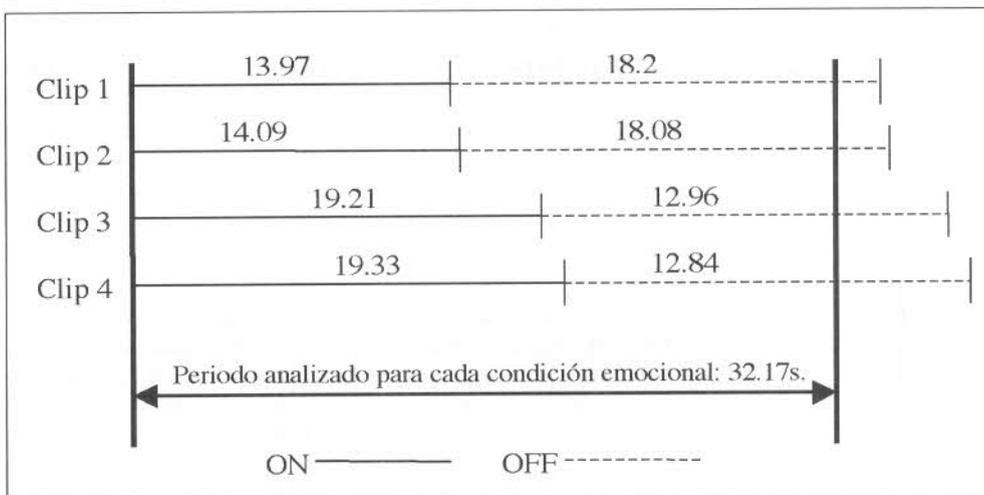
Análisis de Datos

El pulso del corazón y las señales de la respiración fueron eliminados de los datos fNIRS usando un filtro pasa-bajos de impulso finito. Analizamos los cambios en los parámetros (concentraciones de hemoglobina oxigenada u Oxy-Hb), medidos por la fNIRS, para cada condición emocional: esto es, la oxigenación durante la exposición a cada vídeo (llamado periodo "on"), y la oxigenación durante la pantalla en negro tras cada escena (periodos "off"). Un periodo "on" más su periodo "off" correspondiente conforman una condición emocional. El

periodo total analizado para cada condición emocional fue de 32,17 s., que corresponde a la duración del vídeo más corto más 20 segundos de pantalla en negro. Por tanto, el tiempo analizado de cada periodo de pantalla en negro varía dependiendo de la condición emocional, yendo aquél desde 12,48 a 20 segundos. Por una parte se obtuvo el curso temporal de la oxigenación dentro de cada condición emocional, y por otra se promedió la oxigenación de cada periodo dentro de cada condición, y se llevó a cabo un ANOVA de medidas repetidas de dos factores (9 clips X 2 periodos de exposición ['on'/'off']) para comparar las distintas condiciones y periodos. A continuación se llevaron a cabo pruebas *t* para comparar los periodos de exposición dentro de cada condición.

Figura 2

Periodo de tiempo analizado para cada condición emocional. En línea continua se representa la duración del periodo de exposición a los vídeos (periodo "on"). En línea punteada se representa la duración del periodo tras el cese de los vídeos (periodo "off").



RESULTADOS

La Tabla 2 y la Figura 3 muestran los principales resultados para cada condición emocional. En ella se exponen los siguientes datos: media y desviación típica de los niveles de oxigenación en los periodos "on" y "off", nivel de significación de la comparación entre la activación en "off" relacionada con "on", el porcentaje de incremento en la activación desde el periodo "on" al "off" y la media de la valencia y nivel de arousal percibido para cada clip. A continuación se detallan los resultados para cada condición emocional.

Clip 1 Displacentero/Alta activación (escena elegida del film Salò o le 120 giornate di Sodoma (1976) de Pier Paolo Pasolini. Descripción: Hombre cuya lengua está siendo cortada).

El incremento de oxigenación en la CPFDL ocurrido en el periodo "off" con respecto a "on" resultó ser significativo a un nivel de $p < 0,001$. La figura 3 muestra la representación de la oxigenación cerebral obtenida con fNIRS, interpolando los 16 canales de adquisición de datos, y calculando la media para los periodos "on" y "off". El curso temporal de la oxigenación también se presenta.

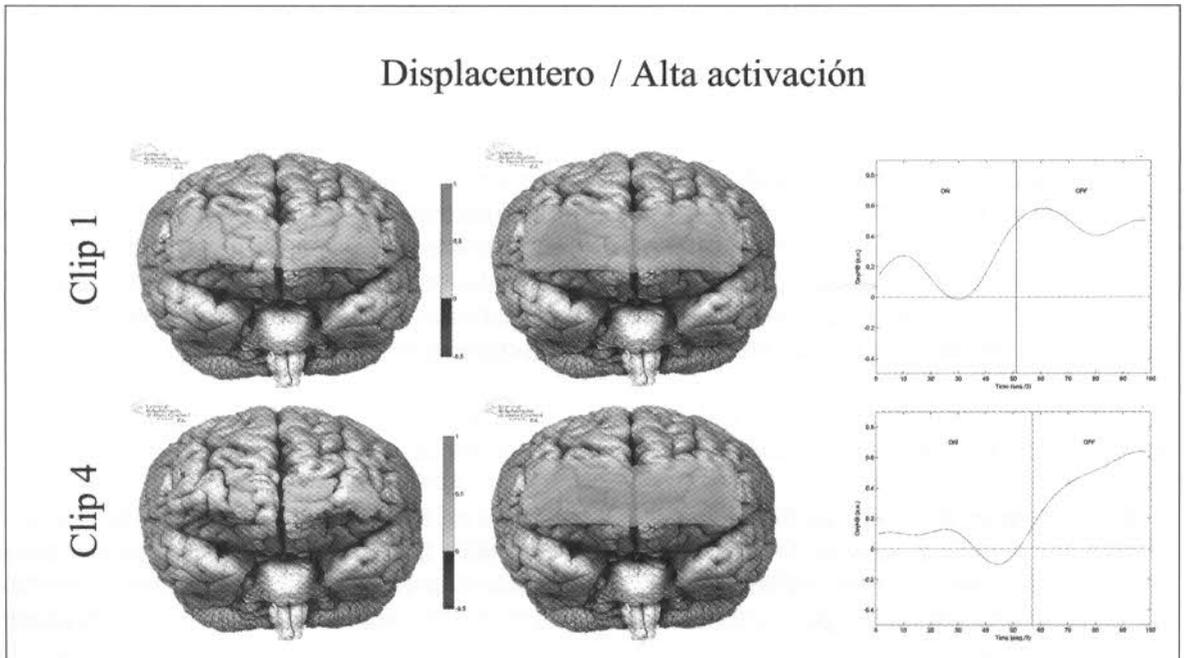
Tabla 2

Media y desviación típica (D.T.) de los niveles de oxigenación (expresados en microM) para las condiciones emocionales en los periodos "on" y "off". Muestra también el nivel de significación (Sig.) de la comparación entre la activación en "off" relacionada con "on", el porcentaje de incremento (% Δ) en la activación desde el periodo "on" al "off" y la media de la valencia y nivel de arousal percibido para cada clip.

	Displacentero/Alto activación				Placentero/Baja activación			
	Clip 1		Clip 4		Clip 3		Clip 2	
	Oxy-Hb media	D.T.	Oxy-Hb media	D.T.	Oxy-Hb media	D.T.	Oxy-Hb media	D.T.
On	0,18	0,73	0,05	0,60	-0,20	0,45	-0,25	0,52
Off	0,49	1,25	0,48	0,86	-0,31	0,57	-0,37	0,82
Δ	+0,31		+0,43		-0,11		-0,12	
% Δ	+172%		+860%		-55%		-48%	
Sig.	< 0,001**		< 0,001**		< 0,001**		< 0,001**	
Valencia	2,14		2,39		8,45		7,11	
Arousal	6,28		5,93		2,17		2,71	

Figura 3

Activación prefrontal en los periodos "on" (cerebro de la izquierda) y "off" (cerebro del centro), y curso temporal de la oxigenación (derecha) para los clips categorizados como Displacenteros/Alta activación (Clip 1 y 4). Los colores cálidos representan un incremento ("overshoot") respecto a la línea base (representada con el cero). Colores fríos representan decremento ("undershoot") respecto a la línea base. Obsérvese como el aumento de oxigenación ("overshoot") en la CPFDL ocurre mayoritariamente durante el periodo "off".



Como puede observarse en la (figura 3), existe un incremento significativo de la oxigenación prefrontal de un 172% en el periodo "off" respecto al "on" en la escena donde se muestra daño deliberado explícito. En el curso temporal se muestra un patrón de activación durante la condición "on", pero el pico máximo ocurre durante el periodo "off". Podríamos definir este curso temporal como ascendente-fluctuante, particularmente durante el periodo "off".

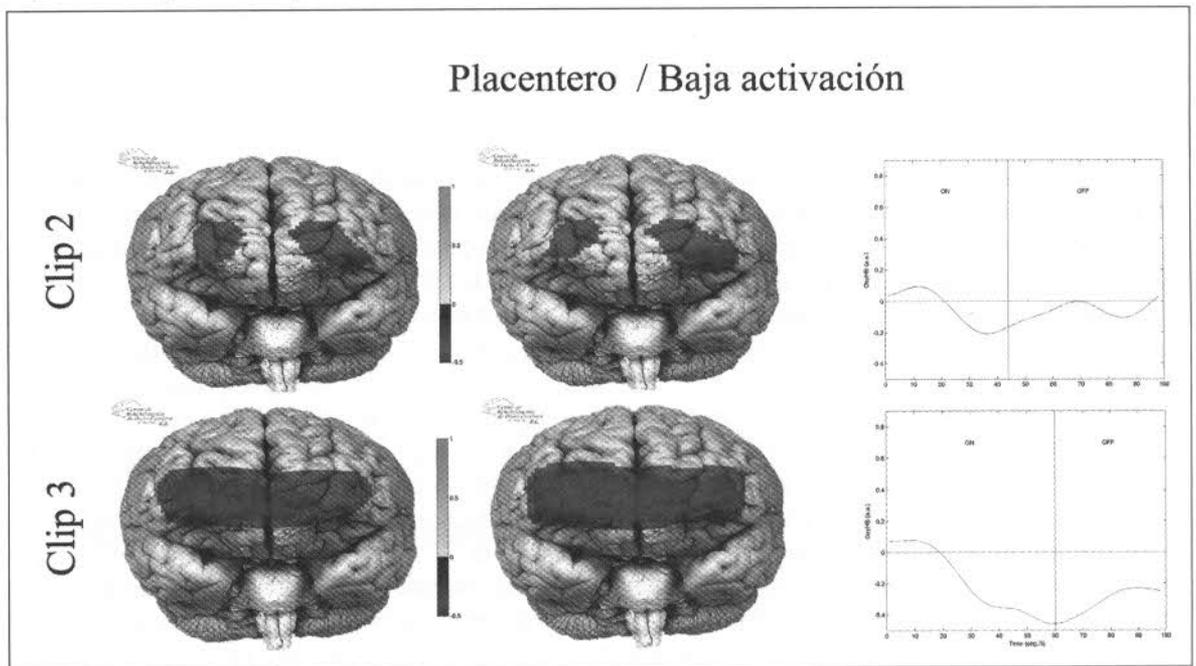
Clip 4 Displacentero/Alta activación (escena elegida del film Salò o le 120 giornate di Sodoma (1976) de Pier Paolo Pasolini. Descripción: Mujer es obligada a comer excrementos humanos).

Puede observarse un incremento de un 860% en la oxigenación del periodo "off" con respecto al periodo "on". A lo largo del curso temporal puede verse cómo la oxigenación permanece por encima de los valores iniciales durante la mayor parte del periodo "on", pero la activación se incrementa aún más a lo largo del periodo "off", en el que puede observarse el mayor pico de oxigenación. En general, el curso temporal de la oxigenación para este caso es fluctuante durante el periodo de exposición a la escena, y claramente ascendente durante el periodo posterior (ver figura 3).

Clip 2 Placentero/Baja activación (escena elegida del film The Long Shadow [1992] de Vilmos Zsigmond. Descripción: Hombre conduciendo por la ciudad).

Figura 4

Activación prefrontal en los periodos "on" (cerebro de la izquierda) y "off" (cerebro del centro), y curso temporal de la oxigenación (derecha) para los clips categorizados como Placenteros/Baja activación (Clip 2 y 3). Los colores cálidos representan un incremento ("overshoot") respecto a la línea base (representada con el cero). Colores fríos representan decremento ("undershoot") respecto a la línea base. Los vídeos dentro de esta categoría experimentan un "undershoot" (decaimiento de la oxigenación por debajo de la línea base) durante el periodo "on" y no se recuperan durante el periodo "off".



Puede verse como la oxigenación prefrontal media se mantuvo en torno a 0 (o cercano a la línea base) durante todo el registro, tanto durante la parte "on" como en la fase "off", siendo la oxigenación media ligeramente inferior a 0 durante toda la condición (ver figura 3).

Clip 3 Placentero/Baja activación (escena elegida del film The Beach [2000] de Danny Boyle. Descripción: Zoom out de una toma aérea de una isla tropical acompañado de música relajante).

En este caso la oxigenación media, tanto en el periodo "on" como en el "off", está por debajo de los niveles basales, siendo más baja sobre todo en el periodo posterior a la exposición de la escena (-0,31 microM, relativos a la línea base local) (significación $p < 0,001$). Observando el curso temporal puede verse cómo la oxigenación, tras un leve pico, cae por debajo de 0 y se mantiene así hasta incluso el final del periodo posterior al vídeo., aunque al principio aumenta, cómo disminuye la oxigenación por debajo de 0 (ver figura 3).

DISCUSIÓN

El principal hallazgo de este estudio es que las dimensiones afectivas de los estímulos emocionales juegan un papel crucial en la duración de la activación de la corteza dorsolateral prefrontal. Este es el primer trabajo en demostrar que los estímulos emocionales pueden producir un mayor grado de activación (Oxy-Hb) en la CPFDL cuando no están presente (periodo "off") que cuando están presente (periodo "on") y que tal activación está asociada al grado subjetivo de arousal que el sujeto asocia al estímulo emocional. En otras palabras cuando el grado de arousal es alto, la representación del estímulo emocional permanece en la corteza prefrontal dorsolateral incluso cuando los estímulos ya no están presentes. La persistencia de las fuentes de activación durante el periodo "off" está estrechamente relacionada al grado de arousal (intensidad) que el sujeto asigna al estímulo; cuanto más alto es el grado de arousal mayor es la activación de la CDLPF durante el periodo "off". Los resultados muestran, por el contrario, que la valencia por si sola no determina la persistencia de la activación en la CDLPF.

La duración de la representación emocional en la memoria de trabajo está estrechamente relacionada con el grado de arousal percibido del estímulo.

Nuestros datos con humanos sanos coinciden con aquellos obtenidos por Fuster y Alexandre (1971) y Fuster (1973, 2000) en primates. Estos autores encontraron que las células de la CPF se disparaban persistentemente a una alta tasa cuando el animal retenía un ítem de información visual en la memoria a corto plazo (MCP). En los citados estudios demostraron que, usando tareas de respuestas demoradas, las "células de la memoria" disparaban con una mayor frecuencia en los periodos de demora (el periodo "off" de nuestro estudio), estos es, los periodos en los cuales se requería una mayor participación de la MCP que durante los periodos de toma de línea base. En el presente estudio hemos encontrado que la activación relacionada con la estimulación emocional persiste a lo largo de los ensayos, siendo dicha duración mayor de 10 s, al igual que las descripciones en primates de Fuster y Alexandre (1971) y Fuster (1973, 2000). Si aplicamos sus interpretaciones a nuestros resultados, estas propiedades de activación de las células nerviosas de la CPF, especialmente durante largos periodos sin estimulación (> 10 s), implicarían a dichas células en la retención de un estímulo concreto en la memoria. De nuestros datos también se interpreta que la persistencia de la activación en el periodo "off" requiere la participación de la memoria de trabajo.

Este es el primer trabajo que proporciona evidencia directa en humanos de que la representación de las emociones intensas permanece en la corteza prefrontal dorsolateral en forma de activación antes de que se produzca alguna respuesta. En términos psicológicos se interpreta como que los estímulos emocionalmente competentes permanecen en la memoria de trabajo hasta que se encuentra la respuesta adecuada a dicho estímulo. La función de permanecer en la corteza dorsolateral prefrontal es la tener tiempo para poder manipular o analizar la información para poder guiar el comportamiento consiguiente. Pero esto solo ocurre con aquellos estímulos que son intensos o que tienen una capacidad de alerta alta, aquellos que solo tienen un valor hedónico, es decir los que tienen un valor de placer por si solos no son capaces de mantener la corteza cerebral dorsolateral activada más allá del periodo de directa exposición al estímulo o periodo "on", de tal manera que cuando el estímulo cesa la activación cerebral cesa. En términos psicológicos quiere decir que la memoria de trabajo solo mantiene la información durante la directa percepción de estímulos emocionales placenteros y luego decae y la prolonga cuando el estímulo tiene un componente excitatorio para el sujeto. Tal como señalan D'Esposito, Postle y Rypma (2000) y Petrides (1994, 1996) la CDLPF es fundamentalmente requerida cuando la información debe ser manipulada además de ser mantenida.

Emociones "frías" y "calientes" en la CPFDL.

Las emociones pueden dividirse en dos dimensiones: "calientes" (con alto arousal) o "frías" (placenteras con bajo arousal). En la búsqueda de los sustratos neurales de dichas dimensiones, Goel y Dolan (2003) encontraron que los ensayos de razonamiento "fríos" provocan una actividad más destacada en la CPF lateral/dorsolateral, y una supresión de la actividad de la CPF ventromedial. Sin embargo, encontraron que los ensayos de razonamiento "calientes" tenían el patrón contrario. Nuestros datos confirman que la valencia y el arousal pueden ser disociados y que eso, unido al curso de la activación, es una parte importante de la explicación neuropsicológica del *overshoot* postestimular observado en la CPFDL. De acuerdo con estos resultados, la valencia puede estar relacionada con los aspectos cognitivos de la emoción ("emoción fría") y el arousal con los procesos biorregulatorios ("emoción caliente"). A una persona puede gustarle algo o alguien pero sentir nada, por ejemplo se puede apreciar la belleza de algo o de alguien sin desear a ese algo o a ese alguien; eso no es más que pura cognición que podría decir James. La figura 3 y la tabla 2 muestran que los niveles de activación caen durante el periodo "off" en un 48-55% en los vídeos placenteros con bajo arousal. Así, un estímulo con alta valencia pero con bajo arousal elicitaba una "emoción fría", es decir una valoración puramente cognitiva que resulta en una activación de la CPFDL sólo cuando está presente ("on"). Por otra parte, una emoción elicitada por un estímulo con alto arousal provoca un mayor grado de activación de la CPFDL cuando el estímulo no está presente ("off") así en los vídeos displacenteros con alto arousal se da un aumento que va desde el 172 al 860%.; esto puede ser considerado como una "emoción caliente", una emoción en sentido estricto.

Curso temporal de los estímulos emocionales

Los estímulos emocionalmente competentes, de acuerdo con nuestros datos, deben definirse de acuerdo a tres dimensiones: valencia, arousal y curso temporal de la activación de "on" a "off". Los estímulos emocionales deberían catalogarse indicando dichos valores con-

juntamente. En este estudio se presenta que los estímulos placenteros (valencia) y de baja activación (arousal) tienen un curso temporal que va desde baja concentración de oxigenación durante el periodo "on" hasta un ulterior "undershoot" que ocurre durante el periodo "off", siendo el curso temporal rápidamente descendente. Los estímulos clasificados como displacenteros/alta activación (baja valencia y alto arousal) presentan un curso temporal fluctuante ascendente, cuyos niveles de oxigenación van de menos a más (experimentando un "overshoot") durante el periodo "off". Por lo tanto, la valencia causa un "overshoot" temprano y el arousal, además tardío.

Implicaciones

Nuestros hallazgos tienen implicaciones en la investigación, tanto básica como aplicada, en el campo de la emoción. La implicación, a nuestro juicio, más importante para la investigación es el hecho de que la dimensión temporal es esencial cuando se trata de definir la emoción consciente. Será, asimismo, necesario especificar la duración de exposición al estímulo y la longitud del registro de la respuesta a tal estímulo. El aspecto más relevante para la teoría de las emociones es que la cognición es parte del proceso de la emoción consciente, guiando la consiguiente respuesta. Es decir, el orden y curso temporal de la activación de las redes neurales prefrontales a través de la estimulación emocional podría ser paralelo a la transferencia temporal de información en la estructura del razonamiento cognitivo, de la conducta y de los cambios somáticos que lo acompañan.

Nuestros datos también señalan que la CPFDL, desarrollada máximamente en los humanos, proporciona el apoyo cognitivo en la organización temporal de la conducta, y que la activación en la CPFDL depende del tipo de información con la cual se opera, tal y como propuso Fuster (2001). Se confirma que el uso de fNIRS es una herramienta válida para el estudio de la circuitería cortical de las emociones, siendo necesario un mayor número de estudios con técnicas de neuroimagen de alta resolución temporal que tengan en cuenta las características de los procesos que aquí se presentan.

REFERENCIAS

- Baddeley, A.D. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556-559.
- Barona, A., Reynolds, C.R., Chastain, R. (1984). A demographically based index of premorbid intelligence for the WAIS-R. *Journal of consulting and clinical psychology*, 52, 885-887.
- Chance, B., & Leigh, J.S. Jr. (1977). Oxygen intermediates and mixed valence states of cytochrome oxidase: Infrared absorption difference spectra of compounds A B and C of cytochrome oxidase and oxygen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 74, 4777-4780.
- Chance, B., Luo, Q., Nioka, S., Alsop, D.C. & Detre, J.A. (1997). Optical investigations of physiology: a study of intrinsic and extrinsic biomedical contrast. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 352, 707-716.
- D'Esposito, M., Postle, B.R. & Rypma, B. (2000). Prefrontal cortical contributions to working memory: Evidence from event-related fMRI studies. *Experimental Brain Research*, 133, 3-11.
- De Stefanis, A. (Producer) & Pasolini, P.P. (Director) (1976). *Salò o le 120 giornate di Sodoma* [Motion Picture]. Italy / France: BFI.

- Edelenyi, J. (Producer) & Zsigmond, V. (Director) (1992). *The Long Shadow* [Motion picture]. Israel / USA / Hungary: Israfilm / Novo Film.
- Fuster, J.M. & Alexander, G.E. (1971). Neuron activity related to short-term memory. *Science*, 173, 652–654.
- Fuster, J.M. (1973). Unit activity in prefrontal cortex during delayed-response performance: Neuronal correlates of transient memory. *Journal of neurophysiology*, 36, 61–78.
- (2000). Prefrontal neurons in networks of executive memory. *Brain research bulletin*, 52, 331–336.
- (2001). The prefrontal cortex—An update: Time is of the essence. *Neuron*, 2, 319–333.
- (2002). *Cortex and Mind*. New York: Oxford University Press.
- Goldman-Rakic, P. (1998). The prefrontal landscape. In: A.C. Roberts, T.W. Robbins & L. Weiskrantz (eds.). *The Prefrontal Cortex*. New York: Oxford University Press.
- Goel, V. & Dolan, R.J. (2003). Reciprocal neural response within lateral and ventral medial prefrontal cortex during hot and cold reasoning. *Neuroimage*, 20, 2314–2321.
- Hock, C., Villringer, K., Muller-Spahn, F., Wenzel, R., Heekeren, H., Schuh-Hofer, S., Hofmann, M., Minoshima, S., Schwaiger, M., Dirnagl, U. & Villringer, A. (1997). Decrease in parietal cerebral hemoglobin oxygenation during performance of a verbal fluency task in patients with Alzheimer's disease monitored by means of near-infrared spectroscopy (NIRS)—correlation with simultaneous rCBF-PET measurements. *Brain Res* 755: 293–303.
- Hoshi, Y., Kobayashi, N. & Tamura, M. (2001). Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *Journal of Applied Physiology*, 90, 1657–1662.
- Hoshi Y. & Tamura M. (1993). Dynamic multichannel near-infrared optical imaging of human brain activity. *Journal of Applied Physiology*, 75, 1842–1846.
- Kato, H., Izumiyama, M., Koizumi, H., Takahashi, A. & Itoyama, Y. (2002). Near-infrared spectroscopic topography as a tool to monitor motor reorganization after hemiparetic stroke: a comparison with functional MRI. *Stroke*, 33, 2032–2036.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Holt.
- Lang, P.J., Bradley, M.M. & Cuthbert, B.N. (2005). International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual. Technical Report A-6. Gainesville: University of Florida.
- LeDoux, J.E. (1996). *The Emotional Brain*. New York: Simon and Schuster.
- Leon-Carrion, J., Damas, J., Izzetoglu, K., Pourrezai, K., Martín-Rodríguez, J.F., Barroso y Martín, J.M., Dominguez-Morales, M.R. (2006). Differential time course and intensity of PFC activation for men and women in response to emotional stimuli: a functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study. *Neuroscience Letters*, 403, 90–95.
- Leon-Carrion, J., Damas-López, J., Martín-Rodríguez, J.F., Domínguez-Roldán, J.M., Murillo-Cabezas, F., Barroso y Martín, J.M., Dominguez-Morales, M.R. (en prensa). The hemodynamic cost of cognitive control: Speed of cognitive processing depends on the level of oxygenation of the superior prefrontal cortex. *Neuroimage*.
- Leon-Carrion, J., McManis, M.H., Castillo, E.M., Papanicolaou, A.C. (en prensa). Time-locked brain activity associated with emotion: A pilot MED study. *Brain injury*.

- Liu, H., Miwa, M., Beauvoit, B., Wang, N.G. & Chance, B. (1993). Characterization of absorption and scattering properties of small-volume biological samples using timeresolved spectroscopy. *Analytical biochemistry*, 213, 378-385.
- Luria, A.R. (1966). *Human brain and psychological processes*. New York: Harper and Row.
- Luo, Q., Nioka, S. & Chance, B. (1997). Functional Near-Infrared Image. In: Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue: Theory, Instrumentation, Model, and Human Studies II, in B. Chance & R.R. Alfano, (Eds.), *Proceedings of International Society for Optical Engineering*, 2979, 84-93.
- MacDonald, A. (Producer) & Boyle, D. (Director) (2000). *The Beach* [Motion picture]. United States / United Kingdom: Twentieth Century Fox.
- NIM Inc. Cognoscope: Functional near-infrared brain imager. Philadelphia PA USA.
- Papanicolaou, A.C. (2004). Emoción: Una reconsideración sobre la teoría somática. *Mono-grafías de la Revista Española de Neuropsicología*, 6 (1-2).
- Petrides, M. (1994). Frontal lobes and working memory: evidence from investigations of the effects of cortical excisions in nonhuman primates. In: F. Boller & J. Grafman (Eds.) *Handbook of Neuropsychology*, volume 9, 59-82.
- (1996) Specialized systems for the processing of mnemonic information within the primate frontal cortex. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 351, 1455-1462.
- Phan, K.L., Wager T., Taylor S.F., Liberzon I. (2002). Functional neuroanatomy of emotion: a meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *Neuroimage*, 16, 331-348.
- Schachter, S. & Singer, J. E. (1962). Cognitive, social and physiological determinants of emotional states. *Psychological Review*, 69, 379-399.