

EXPERIMENTO PRELIMINAR

Capítulo 2

2 EXPERIMENTO PRELIMINAR

El objetivo primordial del presente experimento es explorar el efecto de la orientación sobre la velocidad percibida en un tipo de estímulos sutilmente diferente a los utilizados por Castet et al. en su trabajo de 1993. Los estímulos que utilizamos se componen generalmente de dos líneas inclinadas en forma de cruz (figura 2.2). A partir de las bases teóricas expuestas en el capítulo 1, podemos esperar que la velocidad percibida de las “cruces” sea menor que la velocidad percibida para la línea vertical (estímulo estándar). Más allá de que los estímulos utilizados por nosotros son sutilmente diferentes a aquellos utilizados por Castet et al. (1993), es igualmente plausible encontrar dicho efecto debido a que el mismo parece apoyarse en el problema de la apertura presente en ambos tipos de estímulo. Sin embargo, dado que nuestros estímulos presentan 5 puntos particulares (terminadores) en lugar de los solamente 2 que presentan las líneas, esperamos que la magnitud del efecto sea menor en nuestro caso que el encontrado por Castet et al. En definitiva, pretendemos comprobar que el efecto sobre la velocidad percibida se puede generalizar para los estímulos utilizados por nosotros en forma de cruces.

La utilización de los estímulos en forma de cruz tiene por objetivo evitar problemas derivados de una interacción observada en los resultados de Castet et al. (1993) entre la orientación de la línea y la dirección del movimiento (Bonnet, comunicación personal). En los experimentos realizados en 1993, se detectaron diferencias entre la estimación de la velocidad de una línea cuya orientación coincide con la dirección de movimiento y otra que, si bien formaba el mismo ángulo que la anterior con respecto a la vertical (orientación), su dirección de movimiento era de sentido contrario. Una forma de evitar esta interacción entre dirección y orientación puede ser la de duplicar el número de ensayos, balanceando la variable dirección del movimiento. Sin embargo, a fin de evitar la sobrecarga de ensayos para los sujetos, optamos por los estímulos en forma de cruz que permiten compensar el efecto aditivo de la dirección y la orientación, anulando la posibilidad de una interacción entre estas dos variables. Asimismo, la utilización de este tipo de estímulo en movimiento horizontal permite evitar posibles efectos confundidos de las conocidas anisotropías del sistema visual (S. Mateeff, comunicación personal), las cuales aparecen reportadas experimentalmente en numerosos trabajos (Ball y Sekuler, 1980; Mateeff y Hohnsbein, 1988).

En cuanto al procedimiento, en este experimento se utiliza una variante de los métodos adaptativos para medir la velocidad percibida (el método de la doble escalera; Cornsweet, 1962; Sekuler y Blake, 1994). La idea se apoya tanto en la existencia de trabajos previos que lo utiliza (Castet et al., 1993) como en la rapidez con la que es posible obtener el Punto de Igualación Subjetiva (PIS) mediante este procedimiento. En este sentido, utilizamos dicho procedimiento con dos escaleras aleatoriamente intercaladas para ejecutar nuestra primera aproximación a las capacidades de estimación de la velocidad de los sujetos.

La hipótesis que subyace al experimento es que el PIS mostrará una tendencia a aumentar a medida que las líneas que conforman el estímulo se aproximen a la horizontal. Esto permitiría afirmar que la velocidad percibida es menor para los estímulos cuyas líneas se aproximan a la horizontal que para aquellos próximos a la línea vertical (véase figura 2.2). Los resultados obtenidos permiten confirmar la presencia del efecto de la orientación sobre la velocidad percibida para el tipo de estímulos utilizados (“cruces”). De todas maneras, consideramos este experimento como de carácter exploratorio en tanto nos permitirá ajustar los valores a utilizar en los experimentos siguientes.

2.1 Método

2.1.1 Sujetos

Tres sujetos entrenados en experimentos visuales de Psicofísica: sujeto E de 29 años, sujeto M de 30 y sujeto P de 25; todos ellos con visión normal sin corregir.

2.1.2 Aparatos

El *software*, diseñado específicamente en nuestro laboratorio²⁸ para este tipo de experimentos, se ejecutó sobre un ordenador Pentium II, 400 hercios. Los estímulos se presentaron sobre un monitor color de alta resolución EIZO 21’’ (53.34 cm de diagonal) con una resolución de pantalla de 1280 × 1024 píxeles; 8 bits por píxel y frecuencia de refresco de 85 hercios no entrelazados.

Un segundo PC conectado al Pentium II y a un dispositivo especial de 2 botones (caja de respuestas) se utilizó para registrar la respuesta de cada sujeto. Los sujetos observaban la secuencia con ambos ojos (visión binocular). El monitor permanecía casi invisible para el sujeto gracias a un dispositivo en forma de caja negra que unía al sujeto con el monitor y al ambiente exterior con poca luz (figura 2.1). Con ayuda de una mentonera se fijaba la visión de

²⁸ MOTION LAB, Laboratori de Visió i Control de l’Acció, U.A.B.

los sujetos en el centro exacto de la pantalla a 60 cm de distancia, es decir, con un ángulo de visión global vertical de 31.04° y horizontal de 38.8° .

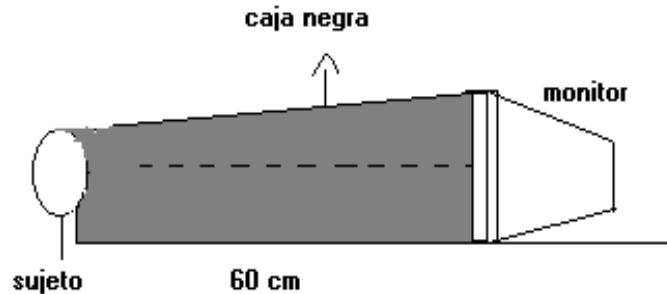


Figura 2.1: Vista lateral esquemática del dispositivo utilizado en los experimentos. El ambiente exterior estaba escasamente iluminado.

2.1.3 Estímulos

Los estímulos podían ser una línea vertical, una línea horizontal o cruces formadas por dos líneas que se cruzan en su punto medio y se movían horizontalmente hacia la izquierda o hacia la derecha. La luminancia de todas las líneas utilizadas era de 50 cd.m^{-2} y se presentaban sobre fondo negro con luminancia media 0.3 cd.m^{-2} en un ambiente muy poco iluminado.

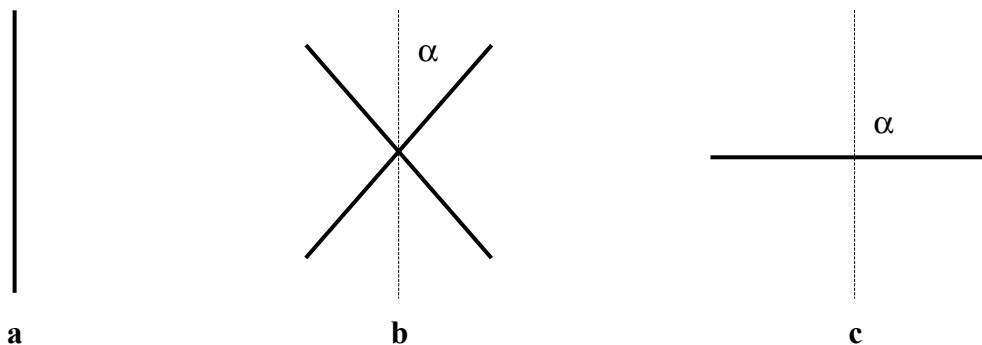


Figura 2.2: Estímulos utilizados en el experimento preliminar. (a) estímulo estándar: orientación = 0° . También era utilizado como estímulo de comparación en la condición control. (b) Representación esquemática de los estímulos de comparación. El ángulo α podía valer 15° , 30° , 45° , 60° o 75° . (c) Estímulo de comparación, donde α vale 90° y, por tanto, constituye una línea horizontal.

Cada ensayo estaba compuesto por 2 presentaciones secuenciales de los estímulos. El primer estímulo (estándar) era siempre una línea vertical (figura 2.2a) que se movía con una velocidad de 1, 2, 4, 8 o $16^\circ/\text{seg}$. Los estímulos de comparación se obtuvieron a partir de la variación del ángulo α en pasos de 15° , dando lugar así a “cruces” donde α podía valer 0° (línea vertical), 15° , 30° , 45° , 60° , 75° o 90° (línea horizontal, figura 2.2c). Todas las líneas

componentes de los diferentes estímulos subtienen un ángulo de cuatro grados visuales (4°) con el observador. El ancho de las líneas era siempre de 1 píxel.

El movimiento era generado por el *software* a través del volcado en pantalla de las líneas adyacentes desde la memoria gráfica de la tarjeta de vídeo con una tasa de refresco del monitor de 85 Hz. Las imágenes de la secuencia se volcaban a la pantalla cada 11.7 milisegundos desde la memoria de vídeo en sincronía con la frecuencia de refresco.

2.1.4 Procedimiento

Utilizamos un paradigma de elección forzada con 2 alternativas (EF2A) conjuntamente con un procedimiento de doble escalera intercaladas convergiendo al 50%. En cada ensayo, se presentan secuencialmente 2 objetos: el estímulo estándar y el estímulo de comparación separados por un intervalo de 1500 milisegundos. El sujeto debe indicar si el primer estímulo (estándar) es más rápido que el segundo (comparación) mediante uno de los dos botones disponibles en la caja de respuesta.

Los estímulos aparecen en el centro del monitor y, después de un tiempo aleatorio (entre 510 y 700 milisegundos) utilizado para dar la oportunidad al sujeto de fijar la mirada, comienzan a moverse. La duración del movimiento varía de manera aleatoria entre 100 y 290 milisegundos con el objetivo de minimizar el uso de la distancia recorrida por los objetos como clave para la estimación de velocidad. Asimismo, la utilización de tiempos breves de duración del movimiento (100 – 290 milisegundos) reducen la posibilidad de realizar un seguimiento del objeto²⁹. De esta manera se busca evitar el efecto descrito por Mckee y Welch (1985) del seguimiento sobre la velocidad percibida (véase también Rashbass, 1961). La dirección del movimiento es la misma para los dos estímulos de un mismo ensayo, pero varía de manera aleatoria (izquierda o derecha) en los diferentes ensayos.

Cinco velocidades del estándar (1, 2, 4, 8 o $16^\circ/\text{seg.}$) y 7 orientaciones (0, 15, 30, 45, 60, 75 y 90°) se estudian en el presente experimento. Para cada velocidad se presentan siete bloques de 2 escaleras aleatoriamente intercaladas (una descendente y otra ascendente). Cada bloque contiene una orientación del estímulo de comparación (0, 15, 30, 45, 60, 75 y 90°). En cada sesión se realiza una sola combinación de velocidad y orientación (bloque) elegida al azar; conformando así un total de 35 sesiones. En una sesión, la velocidad del estándar es siempre la misma para todos los ensayos (1, 2, 4, 8 o $16^\circ/\text{seg.}$) mientras que la velocidad del estímulo de comparación varía acorde al procedimiento de la escalera con una regla simple de

²⁹ La media aritmética del tiempo aleatorio del movimiento fue de 205 mseg, apenas superior al tiempo de latencia del seguimiento y casi idéntico al tiempo de latencia de una sácada (Rashbass, 1961; Westheimer, 1954).

subida y bajada. Esto implica que si la respuesta del sujeto indica que el estímulo de comparación se percibe más rápido que el estándar, entonces el *software* muestra en el próximo ensayo un estímulo de comparación más lento (disminuyendo en un paso).

Los valores iniciales de velocidad de los estímulos de comparación para cada escalera son un 20%³⁰ mayor que la velocidad del estándar (escalera descendente) y un 20% menor para el caso de la escalera ascendente. El paso mediante el cual varía la velocidad del estímulo de comparación corresponde al 3% del valor de la velocidad del estímulo estándar. Una escalera finaliza después de 15 inversiones de respuesta. Se computa una inversión siempre que el sujeto cambia (invierte) el sentido de su respuesta en una determinada escalera, sin tomar en consideración si la respuesta era correcta o incorrecta. El PIS (Punto de Igualación Subjetiva) se define como la media de las últimas 12 inversiones. El sujeto dispone de *feedback* auditivo de su respuesta que se expresa mediante un sonido de 0.5 segundos de duración en caso de error.

2.2 Resultados

El PIS indica la velocidad del estímulo de comparación que los sujetos perciben como igual a la velocidad del estímulo estándar. En la figura 2.3 se muestra el PIS medio para los tres sujetos en función de las inversiones de respuesta. En el gráfico sólo se observan las últimas 12 inversiones de respuestas dado que las 3 primeras se descartan con la intención de posibilitar al sujeto un tiempo inicial de adecuación al experimento y estabilización de su respuesta.

Los resultados que se muestran en la figura 2.3 corresponden a los tres sujetos promediados para las 35 condiciones estudiadas (5 velocidades del estímulo estándar \times 7 orientaciones del estímulo de comparación). Se puede observar que existe una marcada tendencia al aumento del PIS a medida que la orientación aumenta, es decir, a medida que las líneas del estímulo se aproximan a la horizontal. Recuérdese que el valor numérico del PIS no corresponde directamente con la velocidad percibida sino que equivale al valor de velocidad al cual debe moverse el estímulo de comparación para percibirse igual que el estímulo estándar. En este sentido, el PIS tomará valores mayores que la velocidad física del estímulo estándar cuando la velocidad percibida del estímulo de comparación sea inferior a la del estándar (como sucede en la mayoría de los casos que se presentan en la figura 2.3).

³⁰ Dicho porcentaje corresponde a 4 veces el valor del umbral de discriminación de la velocidad propuesto por S. Mckee (1981).

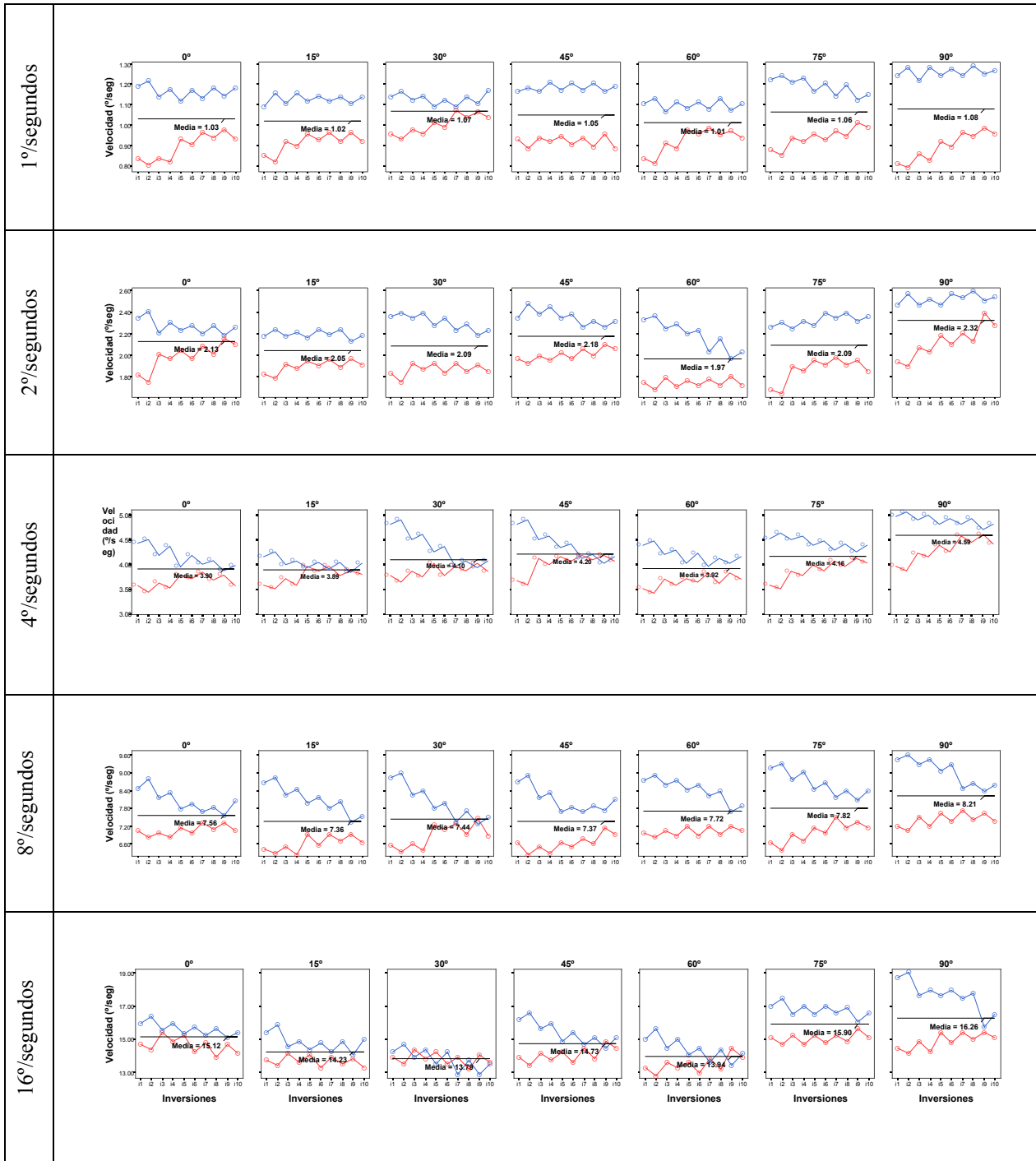


Figura 2.3: Resultados del experimento preliminar para las 35 condiciones estudiadas. La línea superior muestra la evolución de las respuestas en la escalera descendente mientras que la línea inferior muestra la escalera ascendente.

En principio, los resultados pueden indicar que el aumento de la orientación de las líneas componentes provoca un efecto de disminución de la velocidad percibida de los objetos (cruces). Dicha tendencia, que coincide con el efecto de velocidad percibida descrito por Castet et al. (1993), parece ser menor para las velocidades altas que para las velocidades bajas.

2.3 Discusión

Un análisis detallado de los datos pone de manifiesto la dificultad que presenta la utilización de un procedimiento adaptativo en tareas complejas que implican la estimación de la velocidad. La alta variabilidad detectada nos indica la necesidad de disponer de un mayor número de ensayos que posibiliten la convergencia de ambas escaleras en todas las condiciones ya que la estimación del PIS bajo condiciones de no convergencia se vuelve una medida imprecisa y con escasas posibilidades de representar con realismo a la velocidad que percibe el sujeto.

También es probable que dicha variabilidad esté relacionada con el criterio elegido para la obtención del PIS. Como se menciona anteriormente, el PIS equivale a la media de las últimas doce inversiones de respuesta, las cuales –en principio- deberían ser suficientes para lograr la convergencia de las respuestas del sujeto, siempre que el criterio de respuesta se haya estabilizado previamente. En nuestro caso, al utilizar una regla directa para el cómputo de las inversiones (regla simple, véase apartado 2.1.4), es posible que el sujeto no disponga de suficientes ensayos (solamente tres) para lograr estabilizar su criterio de respuesta. Por lo tanto, es altamente probable que las inversiones en las respuestas de los sujetos no respondieran a la incertidumbre propia de la zona de umbral sino que, por el contrario, estuvieran determinadas por el propio proceso de estabilización del criterio de respuesta. Si las escaleras no convergen (como es el caso para alguna de las condiciones estudiadas en este experimento, véase figura 2.3), el PIS corresponde más a un promedio que a la velocidad percibida por el sujeto. El método necesita de la convergencia para que los resultados no representen una medida abstracta, alejada de la percepción de los sujetos.

Por otro lado, consideramos que el paso elegido (3% del valor de velocidad del estímulo estándar) es muy pequeño, especialmente para mantenerlo fijo durante toda la sesión. En principio, hubiera sido más eficiente comenzar con un paso más elevado (10% por ejemplo) que luego de una cantidad determinada de inversiones de respuesta se redujera. De esta manera, la estimación del PIS se realiza con mayor precisión y actuando ya en una zona cercana al umbral.

Debido a estas dificultades, consideramos más apropiado para el desarrollo de nuestra investigación la utilización del método de estímulos constantes en los próximos experimentos. El método de estímulos constantes resultará más adecuado a nuestros propósitos ya que nos habilita a interpolar el PIS a partir de la función psicofísica. Los resultados obtenidos en el presente experimento nos permiten identificar las diferencias de velocidad del estímulo de comparación que pueden ser discriminadas por los sujetos y las que no. En este sentido, partiremos de estos resultados para determinar el rango de velocidades y orientaciones a

estudiar en los experimentos definitivos (capítulos 3, 5 y 6). De todas maneras, se incluyen aquí los resultados obtenidos en este experimento ya que, tal como se plantea al inicio de este capítulo, dichos resultados han servido de orientadores en el diseño de los experimentos siguientes y han permitido, además, ajustar los valores a utilizar.

EXPERIMENTO 1: La Velocidad Percibida

Capítulo 3

3 EXPERIMENTO 1: la velocidad percibida

En los experimentos realizados por Castet et al. (1993) se comprueba experimentalmente que la velocidad percibida de una línea oblicua es subestimada con respecto a la de una línea vertical. En el presente experimento se evalúa el cambio en la velocidad percibida producido por las diferentes orientaciones del estímulo. La tarea que se propone al sujeto es una tarea de igualación y se utiliza el método de los estímulos constantes. De esta manera, se pretende abordar la pregunta por los determinantes físicos de la velocidad para el sistema visual; en particular, la influencia de la orientación de las líneas en el cómputo de la información sobre velocidad.

Si bien el experimento que aquí presentamos se inspira inicialmente en el trabajo de Castet et al. (1993), existen suficientes diferencias entre uno y otro como para afirmar que no se trata de una réplica del mismo. A modo de resumen, ya que cada uno de estos aspectos diferenciales serán analizados específicamente en lo que sigue, cabe mencionar que además de los diferentes estímulos utilizados (“cruces” en lugar de líneas), los valores de velocidad evaluados difieren –al menos en una de las condiciones experimentales- de aquellos estudiados por Castet et al. La condición experimental 2 que se estudia aquí aborda la capacidad de estimación de los sujetos en las velocidades altas. El valor de la velocidad alta es cuatro veces mayor que el de velocidad baja (condición experimental 1), mientras que Castet et al. utilizan una proporción doble entre una y otra condición³¹. Es de esperar que esta diferencia en la elección de los valores a estudiar, junto con las diferencias en los estímulos utilizados, determine variaciones importantes en los resultados, previsiblemente en la línea de reducir la magnitud del efecto de la orientación sobre la velocidad percibida (véase apartado 3.3)

Según Castet et al. (1993) la velocidad percibida (V_{a_i}) de una línea oblicua en traslación horizontal está influenciada por los vectores locales (V_L), ortogonales a la línea, que son generalmente de menor módulo que el vector del movimiento global (V_T) (véase figura 3.1)³². La hipótesis planteada por estos autores, que se explica con mayor detalle más arriba (véase apartado 1.3.2.1) propone que el cómputo de la rapidez es el resultado de una media ponderada

³¹ Castet et al. utilizan 2.1 y 4.2 °/seg, mientras que en nuestro caso los valores de velocidad del estímulo estándar en cada condición experimental son 2.06 y 15.94°/seg respectivamente.

³² Se utilizará **negrita** cuando nos refiramos a magnitudes vectoriales.

entre los vectores V_L y V_T (tenemos un vector V_T en cada terminador o punto de intersección del estímulo). Las señales locales (V_L) expresan una información diferente (en la mayoría de los casos) a la velocidad del estímulo debido al ya descrito (véase apartado 1.2.1.3) problema de la apertura (Adelson y Movshon, 1982; Hildreth, 1983; Horn y Schunck, 1981; Wallach, 1935). Los V_T , sin embargo, contienen información sobre la velocidad del movimiento global para el sistema visual y sólo se encuentran disponibles en los extremos y en las intersecciones de las líneas del estímulo (terminador).

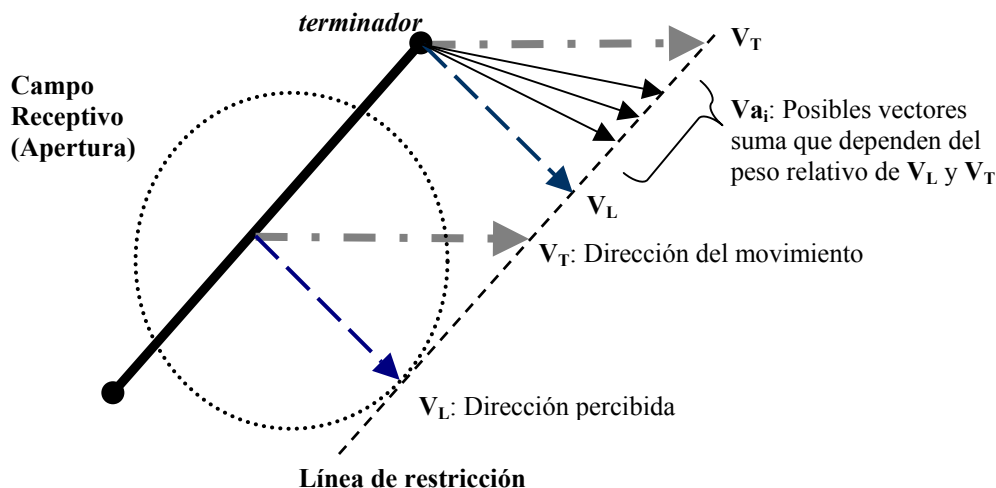


Figura 3.1: Según Castet et al. (1993), la velocidad percibida es igual a uno de los vectores Va_i que depende del peso relativo de V_T (velocidad global del movimiento sólo percibida en el terminador) y V_L (velocidad percibida localmente por los receptores). Dicha relación está dada por la ecuación: $Va_i = a \cdot V_L + b \cdot V_T$, siendo: $a + b = 1$

Si bien los estímulos utilizados en el presente experimento son diferentes a los utilizados por Castet et al., podemos pensar que, de todas maneras, es factible encontrar un efecto de la orientación sobre la velocidad percibida³³. Sin embargo, siguiendo la hipótesis explicativa que sugiere Castet et al. (1993), la magnitud del efecto de subestimación de la rapidez con las “cruces” debería ser sensiblemente menor a la que se encuentra en el caso de las líneas oblicuas, debido fundamentalmente a que en nuestros estímulos (figura 3.2) existen cinco puntos (terminadores) con información no ambigua de velocidad, a diferencia de los solamente dos que caracterizan a los estímulos de Castet et al. (líneas). Los cinco terminadores de nuestros estímulos provienen de los dos extremos de cada una de las líneas, además de un quinto punto con información no ambigua de velocidad, que se genera por la intersección de ambas líneas. Evidentemente, cuando la orientación de nuestros estímulos es 0° y 90° (línea

³³ Es necesario tener en cuenta que el objetivo de este experimento no es el de replicar el experimento de Castet et al. (1993) variando únicamente la forma de los estímulos. Existen además importantes diferencias en el método utilizado que imposibilitarían realizar una comparación eficaz de los resultados de uno y otro experimento (véase el apartado de discusión en este mismo capítulo).

vertical y línea horizontal, respectivamente) sólo disponemos de dos terminadores (que corresponden a los extremos de cada una de las líneas).

Por otro lado, Castet et al. (1993) sugieren que existe también una disminución de la magnitud del efecto a medida que la velocidad aumenta. En este sentido, en el presente experimento se evalúan dos condiciones experimentales, cada una para un valor diferente de velocidad del estímulo estándar (2.06°/seg y 15.94°/seg), con el objetivo de verificar esta predicción. La elección de los valores de velocidad responde a lo antedicho así como también a las posibilidades técnicas del *hardware* utilizado para la experimentación (frecuencia de refresco del monitor, tamaño del monitor, etc). Siguiendo la hipótesis de Castet, esperamos que el efecto de la orientación sobre la velocidad percibida sea mucho menor para la velocidad alta (15.94°/seg.) que para la velocidad baja (2.06°/seg.).

3.1 Método

3.1.1 Sujetos

Tres sujetos entrenados en experimentos visuales de Psicofísica: sujeto A de 29 años, sujeto J de 35 y sujeto P de 25; todos ellos con visión normal sin corregir. El sujeto P participó también en el experimento preliminar. Los sujetos A y J no participaron en el experimento preliminar, aunque están muy familiarizados con experimentos psicofísicos. Asimismo, estos dos sujetos (A y J) conocen los objetivos del experimento.

3.1.2 Aparatos

El *software* se ejecuta sobre un ordenador Pentium II, 400 hercios. Los estímulos se presentan sobre un monitor color de alta resolución EIZO 21'' (53.34 cm de diagonal) con una resolución de pantalla de 1280 × 1024 píxeles; 8 bits por píxel y una frecuencia de refresco de 85 hercios no entrelazados. Los sujetos observan la secuencia con visión binocular. Con ayuda de una mentonera se fija la visión de los sujetos en el centro exacto de la pantalla a 60 cm de distancia, es decir, con un ángulo de visión global vertical de 31.04° y horizontal de 38.8°

3.1.3 Estímulos

Al igual que en el experimento preliminar, los estímulos podían ser una línea vertical, una línea horizontal o “cruces” que se movían horizontalmente a izquierda o a derecha con diferentes velocidades.

Cada ensayo estaba compuesto por dos presentaciones secuenciales de los estímulos. El primer estímulo (estándar) era siempre una línea vertical moviéndose con una velocidad de 2.06 o 15.94°/seg (2 condiciones experimentales). Se estudiaron cinco orientaciones diferentes cubriendo el rango que va desde los 0° (línea vertical) a los 90° (línea horizontal). El segundo estímulo (comparación) correspondía a uno de los cinco diferentes estímulos (figura 3.2) que se obtienen a partir de la variación lineal del ángulo de inclinación con respecto a la vertical (α , en la figura 3.2) en pasos de 22.5°. Todas las líneas componentes de los estímulos subtenden un ángulo de 4° visuales con el observador. El ancho de las líneas era siempre de 1 píxel.

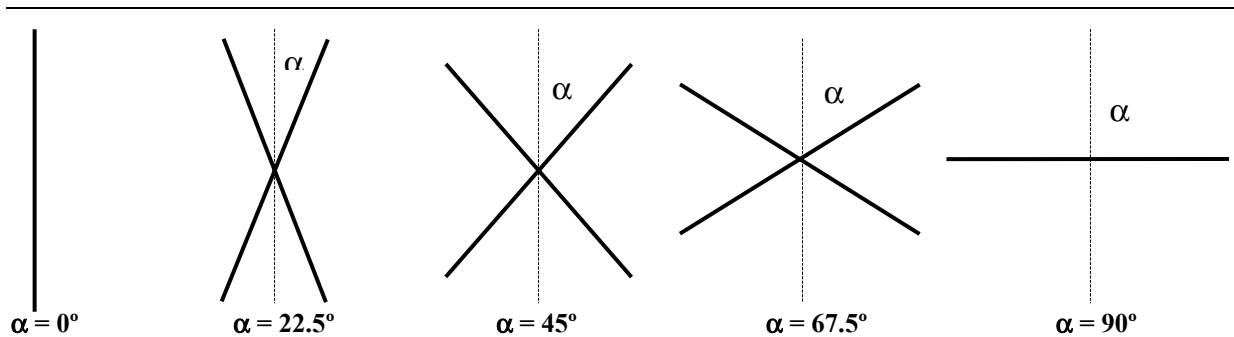


Figura 3.2: Estímulos utilizados en el experimento 1. La longitud de las líneas que componen las “cruces” es constante y en todos los casos vale 4°.

Tal como sucedía en el experimento preliminar, la luminancia de todas las líneas era de 50 cd.m⁻² y fueron presentadas sobre fondo negro con luminancia media 0.3 cd.m⁻² en un ambiente muy poco iluminado. Los estímulos aparecían en el centro del monitor y, después de un intervalo de tiempo aleatorio de entre 510 y 700 milisegundos, empezaban a moverse. El movimiento era generado por el *software* a través del volcado en pantalla de las líneas adyacentes desde la memoria gráfica de la tarjeta de video con una tasa de refresco del monitor de 85 Hz. Las imágenes de la secuencia se volcaban a la pantalla cada 11.7 milisegundos desde la memoria de video en sincronía con la frecuencia de refresco. La duración del movimiento variaba de manera aleatoria entre 100 y 290 milisegundos a fin de minimizar el uso de la distancia recorrida y la posibilidad del sujeto de hacer seguimiento del objeto (*pursuit*). La dirección del movimiento era la misma para los dos estímulos en un mismo ensayo, pero variaba de manera aleatoria (izquierda o derecha) en los diferentes ensayos.

3.1.4 Procedimiento

Se utiliza un procedimiento de elección forzada con dos alternativas (EF2A) en conjunción con el método de los estímulos constantes con bloques puros por cada orientación, donde la velocidad física del estímulo de comparación es la variable independiente. En cada ensayo se presentan secuencialmente dos estímulos en movimiento: primero, una línea vertical

(estándar) y después de 1500 milisegundos se presenta el estímulo de comparación. El intervalo temporal entre ensayo y ensayo es de 3 segundos.

Se estudian dos condiciones en este experimento: una, cuando el estímulo estándar se mueve a 2.06°/seg. (condición experimental 1) y otra, cuando su velocidad física es 15.94°/seg. (condición experimental 2). Para cada condición experimental, se estudian cinco orientaciones y siete velocidades del estímulo de comparación. Cada sesión contiene 140 ensayos y se realiza para una sola orientación (bloques puros) elegida al azar (7 velocidades de comparación × 20 repeticiones = 140). Cada sujeto lleva a cabo cuatro sesiones para cada una de las orientaciones estudiadas, con una duración aproximada de 20 minutos por sesión, conformando así un total de 80 repeticiones para cada velocidad y orientación.

En cada sesión, la velocidad del estándar es la misma para todos los ensayos (2.06 o 15.94°/seg. según la condición experimental que se esté evaluando) mientras que la velocidad del estímulo de comparación varía de ensayo a ensayo según el método de los estímulos constantes. El *software* elige (siguiendo los principios del método de estímulos constantes con bloques puros) la velocidad del estímulo de comparación entre dos series de 7 valores en progresión geométrica: 1.5, 1.69, 1.87, 2.06, 2.25, 2.43, 2.62°/seg. (condición 1) y 12.37, 13.69, 14.81, 15.94, 17.25, 18.47, 19.69°/seg. (condición 2). El sujeto debe indicar si el primer estímulo (estándar) es más rápido que el segundo (comparación) mediante uno de los dos botones disponibles en la caja de respuesta. No se proporciona ningún tipo de *feedback* a la respuesta del sujeto.

3.2 Resultados

A fin de obtener una primera representación de los resultados obtenidos, se grafica la probabilidad de respuestas “más rápido que el estándar” en función de la velocidad física del estímulo de comparación (abscisas). El porcentaje de respuestas “más rápido que” obtenidos para cada nivel de la variable independiente se ajustan a una función logística de la forma:

$$P(I) = \frac{1}{1 + e^{-(c.I+d)}} \quad (3.1)$$

donde P es la probabilidad de respuesta “más rápido que” (al tanto por uno), I representa los diferentes niveles de velocidad del estímulo de comparación (medido en °/seg.), mientras que c y d son dos parámetros de ajuste³⁴ (véase Bonnet, 1986). El Punto de Igualación

³⁴ Para el ajuste al modelo propuesto se utilizó el método de estimación Levenberg-Marquardt.

Subjetiva (PIS)³⁵ corresponde al punto de inflexión de la función logística y corresponde al valor opuesto de la razón entre los parámetros d y c (véase más adelante la ecuación 3.2).

La figura 3.3 presenta las diferentes funciones psicofísicas que se obtienen para cada una de las orientaciones estudiadas en un mismo gráfico por sujeto y condición experimental. El PIS en cada una de las funciones –que corresponde con el valor de la abscisa que determina un 50% de probabilidad en las ordenadas- indica la rapidez del estímulo de comparación que cada sujeto percibe como igual al estímulo estándar (línea vertical). Los valores del PIS obtenidos para condición experimental y para cada orientación de las líneas que componen el estímulo se presentan en la tabla 3.1.

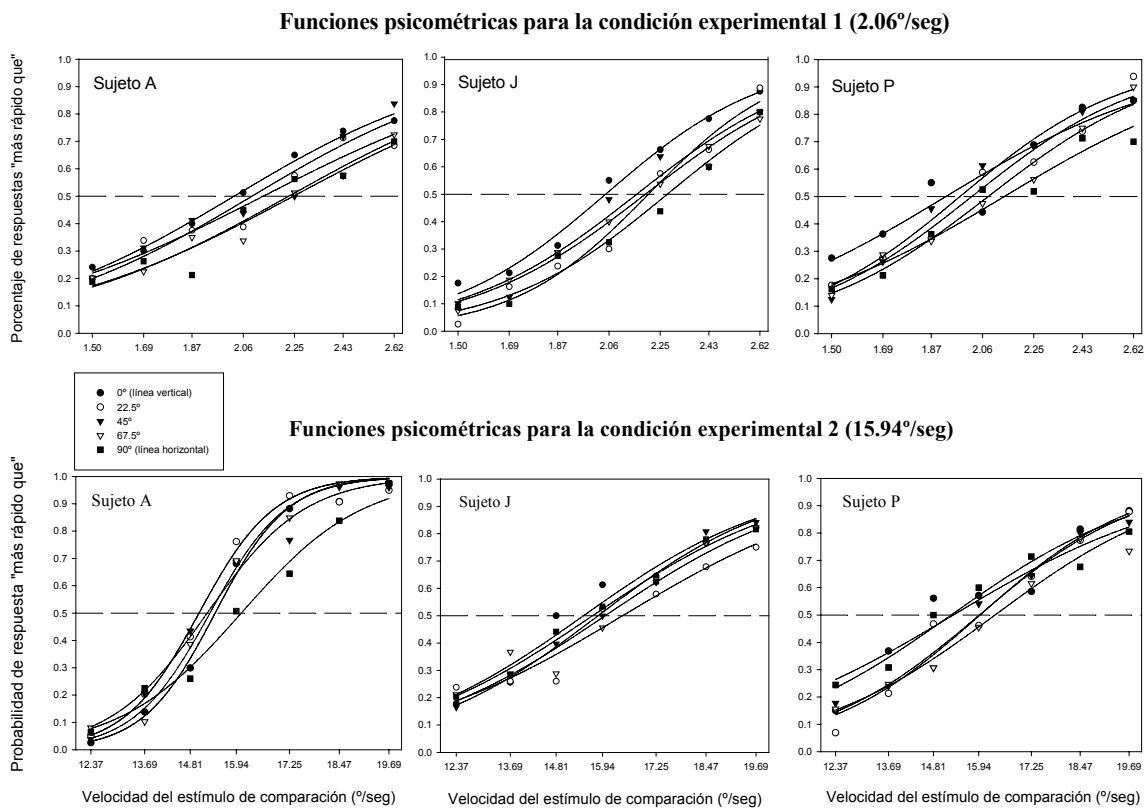


Figura 3.3 Funciones psicométricas obtenidas para cada una de las orientaciones. Cada gráfico contiene todas las funciones para cada sujeto y en cada condición experimental.

Los valores del PIS para cada una de las funciones se obtienen a través de la siguiente ecuación:

$$PIS = -\frac{d}{c} \tag{3.2}$$

³⁵ También se lo puede encontrar en la literatura castellana como “Punto de Igualdad Subjetiva”

Como sugieren Castet et al. (1993), se puede observar (figura 3.4) que el PIS tiende a aumentar a medida que las líneas que componen el estímulo se aproxima a la línea horizontal ($\alpha = 90^\circ$). La figura 3.4 muestra esta variación del PIS en función de la orientación para las dos condiciones experimentales estudiadas. El ajuste de funciones lineales sobre los valores del PIS obtenidos es satisfactorio ($R^2 \geq 0.8$) para todos los casos de la condición de velocidad baja, mostrando una clara tendencia del PIS a aumentar a medida que las líneas del estímulo se aproximan a la horizontal. Sin embargo, para el caso de la velocidad alta (15.94°/seg.) los resultados no parecen indicar una clara tendencia en este sentido (véase figura 3.4.).

Tabla 3.1: PIS de velocidad para los tres sujetos, en cada condición experimental y por orientación.

Sujeto	2.06 °/s					15.94 °/s				
	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
A	2.03	2.13	2.09	2.25	2.23	15.42	15.03	15.23	15.30	16.06
J	2.05	2.21	2.16	2.20	2.28	15.48	16.43	15.83	16.01	15.70
P	1.92	2.02	1.98	2.08	2.14	15.25	15.97	15.96	16.35	15.31
medias	2.00	2.12	2.08	2.17	2.22	15.38	15.81	15.67	15.88	15.69

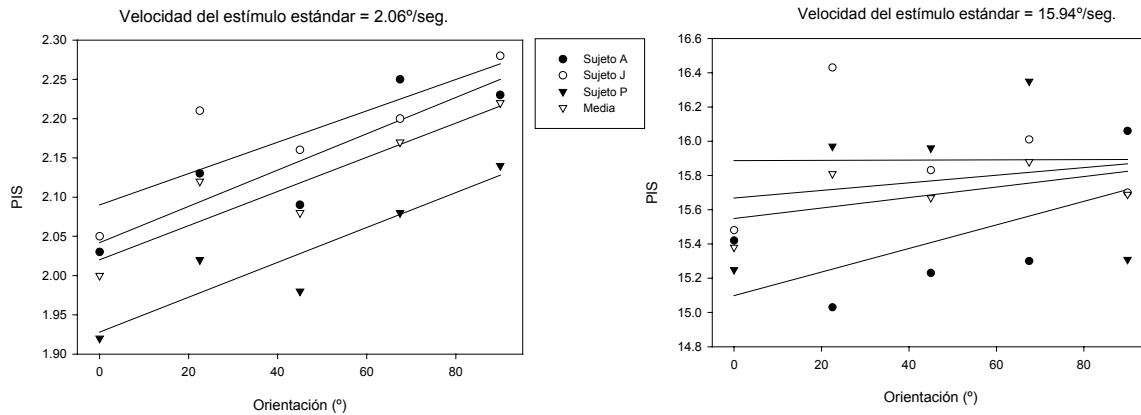


Figura 3.4: Variación del PIS en función de la orientación para cada una de las condiciones experimentales estudiadas. En el panel de la izquierda se presentan los resultados obtenidos para la velocidad más baja (2.06°/seg.) y en el de la izquierda los que provienen de la velocidad alta (15.94°/seg.)

En la estimación *logit*, un aumento del PIS puede producirse debido a dos situaciones diferentes con implicaciones distintas. Por un lado, puede responder a la traslación (corrimiento hacia la derecha, en este caso particular) de las funciones psicométricas (manteniendo el paralelismo entre ellas). Es el caso que representa la figura 3.5b que, desde el punto de vista analítico, resulta de un aumento del valor absoluto del parámetro d en la ecuación (3.1). Por otro lado (véase figura 3.5a), el aumento del PIS puede producirse por un cambio de pendiente en la función psicométrica que se traduce analíticamente por un aumento del valor absoluto del parámetro c en la ecuación (3.1).

Un desplazamiento de las funciones psicométricas parece explicar mejor la variación del PIS en la condición experimental 1 (velocidad baja –ver panel superior de la figura 3.3-) que, por otra parte, muestra una variación del PIS consistente. Obsérvese que el desplazamiento de las funciones psicométricas manteniendo el paralelismo resulta de la obtención, por parte del sujeto, de menores probabilidades de respuesta “más rápido que” para todas las velocidades de comparación del estímulo, lo cual muestra que la velocidad percibida por el sujeto es menor a medida que el estímulo se aproxima a la horizontal.

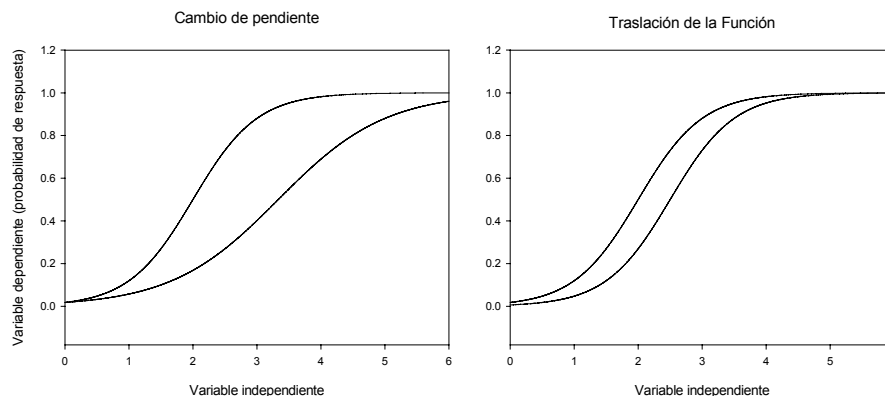


Figura 3.5: Funciones psicofísicas teóricas. (a) El PIS aumenta como producto de un aumento de la pendiente de la función. (b) El PIS aumenta como producto de un desplazamiento (traslación) de la función.

En cambio, para la condición 2 (velocidad alta) la variación de PIS parece responder más a un cambio en la pendiente de las funciones psicométricas que a una traslación de las mismas. Dicha situación resulta de la obtención de probabilidades de respuesta más baja por parte del sujeto, sólo para los valores más altos del estímulo de comparación. Por otro lado, recuérdese que la variación del PIS para esta condición experimental (velocidad alta) es muy leve y presenta un comportamiento que podría ser interpretado como oscilante con respecto a los diferentes valores de orientación del estímulo.

Una posible interpretación al respecto de estos diferentes comportamientos de las funciones psicométricas en una y otra condición experimental proviene de la idea (especulativa, de momento) de que un cambio de pendiente podría reflejar modificaciones del criterio de respuesta utilizado por el sujeto en cada nivel de orientación. Según datos no publicados (Bonnet, comunicación personal) la pendiente de las funciones psicométricas tiende a aumentar con el entrenamiento de los sujetos, lo cual apoya la idea de que existe una relación entre el valor de la pendiente y el criterio de respuesta³⁶. Desde esta perspectiva, podemos pensar que la variación del PIS que encontramos en la condición 2 responde a variaciones en el

³⁶ Evidentemente, partimos de la idea de que las diferencias que muestra un sujeto entrenado con respecto a otro sin entrenar, son diferencias que provienen de la estabilización de un criterio de respuesta mínimo que optimiza la respuesta de un sujeto bien entrenado (para una explicación más detallada de esta concepción véase apartado 4.3)

criterio de respuesta de los sujetos. Esta posibilidad será contrastada con los datos de TR de los experimentos 2 y 3 a través de la aplicación del modelo de Bonnet y Link (1998) que permite separar los componentes decisionales (ligados al criterio de respuesta) de los sensoriales en los TR y, por tanto, detectar modificaciones del criterio de respuesta de los sujetos.

La pendiente de la función psicométrica (figura 3.3) queda determinada por el valor del parámetro c de la ecuación 3.1. Concretamente, la pendiente de la función equivale al valor de la pendiente de la recta tangente a la curva en el punto de inflexión. La tangente en el punto de inflexión es una función lineal cuya fórmula se deriva de la función psicométrica (ecuación 3.1) y se expresa como:

$$tg(I) = (c * I + d + 2) / 4 \quad (3.3)$$

donde I representa a la intensidad del estímulo (en este caso, la velocidad física del estímulo de comparación) y los parámetros c y d son los parámetros de la función psicométrica. Los valores de c y d , para cada una de las funciones de la figura 3.3 se presentan en la tabla 3.2. A partir de ellos y considerando la ecuación 3.3 es posible calcular la pendiente para cada una de las funciones psicométricas³⁷.

Tabla 3.2: Valores de los parámetros de todas las funciones psicométricas. El valor del parámetro c , equivale al valor de la pendiente de la función psicométrica que aparece en letra cursiva.

Sujeto	Parámetro	2.06 °/s					15.94 °/s				
		0°	22.5°	45°	67.5°	90°	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
A	<i>c</i>	2.35	2.00	2.35	2.11	2.19	0.98	0.93	0.81	0.88	0.63
	<i>d</i>	-4.76	-4.28	-4.91	-4.74	-4.88	-15.15	-13.94	-12.28	-13.68	-10.15
J	<i>c</i>	3.37	3.97	3.08	3.03	3.23	0.39	0.34	0.45	0.37	0.39
	<i>d</i>	-6.90	-8.77	-6.66	-6.66	7.35	-6.08	-5.57	-7.12	-5.99	-6.14
P	<i>c</i>	2.38	3.11	3.24	3.03	2.36	0.38	0.49	0.48	0.42	0.34
	<i>d</i>	-4.58	-6.28	-6.41	-6.30	-5.05	-5.76	-7.91	-7.63	-6.82	-5.28

Con el objetivo de verificar la presencia del efecto de la orientación sobre la velocidad percibida se ajustan los PIS obtenidos para cada orientación del estímulo a una función lineal y se estima su pendiente a fin de cuantificar la magnitud del efecto que corresponde a la orientación. La pendiente es significativamente diferente de 0 ($t = 4.01$; $p = 0.028$) para los datos medios del grupo en la condición experimental 1. Sin embargo, para la condición experimental 2, las pendientes ajustadas con las medias del grupo no resultan significativamente diferentes de 0 ($t = 1.199$; $p = 0.317$) debido, al menos en parte, a la variabilidad que muestran los diferentes PIS en cada orientación. Por consiguiente, podemos afirmar que existe un efecto de subestimación de la velocidad con los estímulos utilizados por

³⁷ La realización de dichos cálculos excede los objetivos de éste trabajo y, por tanto, no se presentan. El lector puede realizarlos por sí mismo sustituyendo los valores de la tabla 3.2 en la ecuación 3.3.

nosotros en este experimento para la condición experimental que llamamos aquí de velocidad baja (2.06°/seg.). Dicho efecto es prácticamente inexistente para la condición de velocidad alta (15.94°/seg.).

Para unificar en una sola medida la magnitud del efecto en las dos condiciones estudiadas, intentaremos cuantificar el efecto introducido por la orientación de los estímulos sobre la velocidad. A tales efectos, se utilizará como variable dependiente a la *velocidad relativa* (en adelante Vr) que podemos definir para este experimento (pero véase apartado 5.2.3) como el cociente entre la velocidad percibida del estímulo estándar (Vps)³⁸ y el PIS. Dado que el PIS representa la velocidad a la cual debería moverse el estímulo estándar (línea vertical) para ser percibido como de igual velocidad que el estímulo de comparación, podemos decir que la Vr será un indicador de la magnitud del efecto introducido por la orientación sobre la velocidad percibida. A saber: valdrá 1 si el estímulo estándar y el de comparación se perciben como de igual velocidad, será menor que 1 si el estímulo de comparación es percibido como más lento que el estándar y, mayor que 1 en el caso contrario. La figura 3.6 muestra la variación de Vr que produce la orientación de los estímulos.

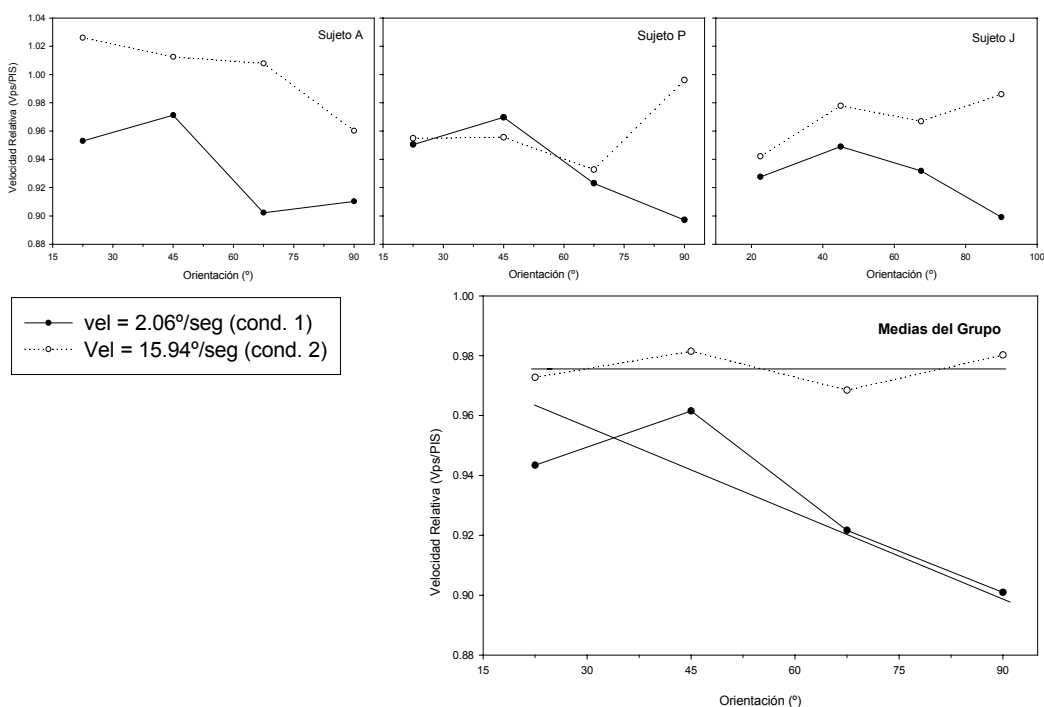


Figura 3.6: Variación de la Velocidad Relativa en función de la orientación para ambas condiciones experimentales (velocidad baja y alta). Los gráficos superiores representan los resultados individuales mientras que en el inferior se puede apreciar la variación media de los tres sujetos.

³⁸ Evidentemente, la velocidad percibida del estímulo estándar (Vps) corresponde al PIS obtenido de los ensayos donde la orientación del estímulo de comparación vale 0°. Esta “condición control” se utilizó justamente para obtener una medida de la velocidad percibida de la línea vertical en lugar de utilizar directamente el valor de velocidad física que tiene el estímulo.

3.2.1 Comparación con los resultados obtenidos por Castet et al. (1993)

Resulta interesante contrastar nuestros resultados con el modelo propuesto por Castet et al. (1993) para la velocidad percibida (*Weighted Average Hypothesis*, véase apartado 1.3.2.1) a fin de observar la capacidad predictiva del mismo ante estímulos sutilmente diferentes. De modo general, podemos decir que la magnitud del efecto que se reporta en el presente experimento es menor que la divulgada por Castet et al. Esto puede explicarse a partir de las diferencias en el método y a los estímulos utilizados (véase tabla 3.3). En cuanto a los estímulos, es necesario tener en cuenta que todas las diferencias introducidas por nosotros contribuyen a minimizar el efecto de la orientación sobre la velocidad percibida. La longitud de las líneas que componen nuestros estímulos es mucho mayor que la longitud de aquellos utilizados por Castet et al.³⁹ y, a su vez, la utilización de “cruces” determina la presencia de número mayor de puntos con información sobre la velocidad global que en las líneas. Además, la mayor de las velocidades utilizadas por nosotros (15.94°/seg.) es 4 veces superior a la mayor utilizada por ellos. El modelo que sugieren Castet et al. propone una disminución del efecto de la orientación a medida que la velocidad física aumenta. Concretamente, estos autores proponen que la magnitud del efecto de la orientación sobre la velocidad percibida se reduce en 1.6 veces cuando se duplica la velocidad. Considerando estos aspectos, es lógico suponer que la magnitud del efecto detectada por nosotros sea muy inferior, especialmente en la condición de velocidad alta del presente experimento (véase tabla 3.1).

Tabla 3.3: Principales diferencias entre el experimento 1 de Castet et al. (1993) y el presente experimento.

	Castet et al. (1993)	Maiche (2001)	
Metodológicos	Procedimiento	Adaptativo (escalera)	Igualación (estímulos constantes)
	Obtención del Umbral/PIS	Media de las 6 últimas inversiones de respuesta	Logit análisis
Estímulos	Forma	1 línea oblicua	2 líneas en forma de cruz
	velocidad del estándar	2.1°/seg y 4.2°/seg	2.06°/seg y 15.94°/seg
	Contraste (Michelson)	0.963	0.988
	Longitud	1.76°	4°
	tiempo de exposición	167 ms +-10%	Aleatorio entre 100 y 290 ms
	Inicio del movimiento	Variable +-21% (visión parafoveal)	Constante (Visión foveal)

A fin de verificar esta hipótesis ajustamos las medias del grupo de V_r a la función que estos autores proponen para formalizar el proceso de integración de diferentes señales de velocidad que implica el cómputo de la velocidad resultante. Partiendo de que el sistema visual dispone de dos señales primarias de movimiento (V_L y V_T , véase figura 3.1) y que la

³⁹ Lo cual implicaría, según los resultados de Castet et al., pero véase el capítulo 6 de este trabajo, que la velocidad percibida, velocidades percibidas más lentas.

estimación final de la velocidad resulta de un compromiso entre ambas, Castet et al. sugieren que la velocidad resultante estimada (V_{a_i}) se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{a_i} = a * V_L + b * V_T \quad (3.4)$$

donde V_{a_i} es la velocidad percibida para la orientación i , a y b son parámetros cuyo valor está entre 0 y 1 con $a + b = 1$, mientras que V_L y V_T representan al vector de velocidad local y al vector de velocidad global (del terminador) respectivamente. Resulta evidente, a partir de la formulación propuesta, que a y b representan los pesos con que el vector local (V_L) y el vector del terminador (V_T) contribuyen a la recuperación de la velocidad final que es, en definitiva, una media ponderada de ambas señales. El parámetro a representa la contribución de la señal local (V_L) en el procesamiento final de la velocidad mientras que el parámetro b indica el peso relativo de la señal proveniente de los terminadores (V_T). La necesaria restricción de que ambos parámetros sumen 1 se desprende de que para el caso de la línea vertical (estímulo estándar) ambas señales son idénticas y, por tanto, la velocidad final percibida corresponde simplemente a $1V_L$ que es igual a V_T . Concretamente, para el caso particular de la línea vertical:

$$\left. \begin{array}{l} V_{a_0} = a * V_L + b * V_T \\ V_L = V_T \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} V_{a_0} = (a + b) * V_L \\ \text{Asumiendo } a + b = 1 \end{array} \right\} \boxed{V_{a_0} = 1 * V_L} \quad (3.5)$$

Por lo tanto, el modelo asume que la velocidad percibida de la línea vertical es la que corresponde al vector V_L que es idéntico al vector V_T (es decir, el modelo asume que la percepción de la velocidad de la línea vertical corresponde a la velocidad física de la misma)⁴⁰. Sin embargo, para los cálculos de la velocidad relativa en el presente experimento, se utilizan los valores del PIS obtenidos para la condición control (0°) como la velocidad percibida de la línea vertical en lugar de su valor de velocidad física. Entendemos que esta opción no contradice el modelo propuesto por Castet et al. ya que el mismo asume que en el caso de la línea vertical la velocidad percibida está fundamentalmente determinada por el valor físico de V_L (que es igual a V_T). Asimismo, es necesario considerar que los valores de velocidad física utilizados por nosotros son producto también de ciertas limitaciones del *hardware* utilizado que determinan que el valor real de velocidad física que se muestra en cada instante de la secuencia admita pequeñas variaciones. Como se puede comprobar en la tabla 3.1, los valores de

⁴⁰ En el experimento 2, partiremos de esta misma asunción para proponer un procedimiento de cálculo de la velocidad percibida a partir de los datos de TR (véase 5.2.4)

velocidad percibida (PIS para 0°) son muy cercanos a los valores de velocidad física del estímulo, lo cual nos permite reafirmar la asunción de Castet et al. referente a que la velocidad percibida de la línea vertical está fundamentalmente determinada por el vector V_L .

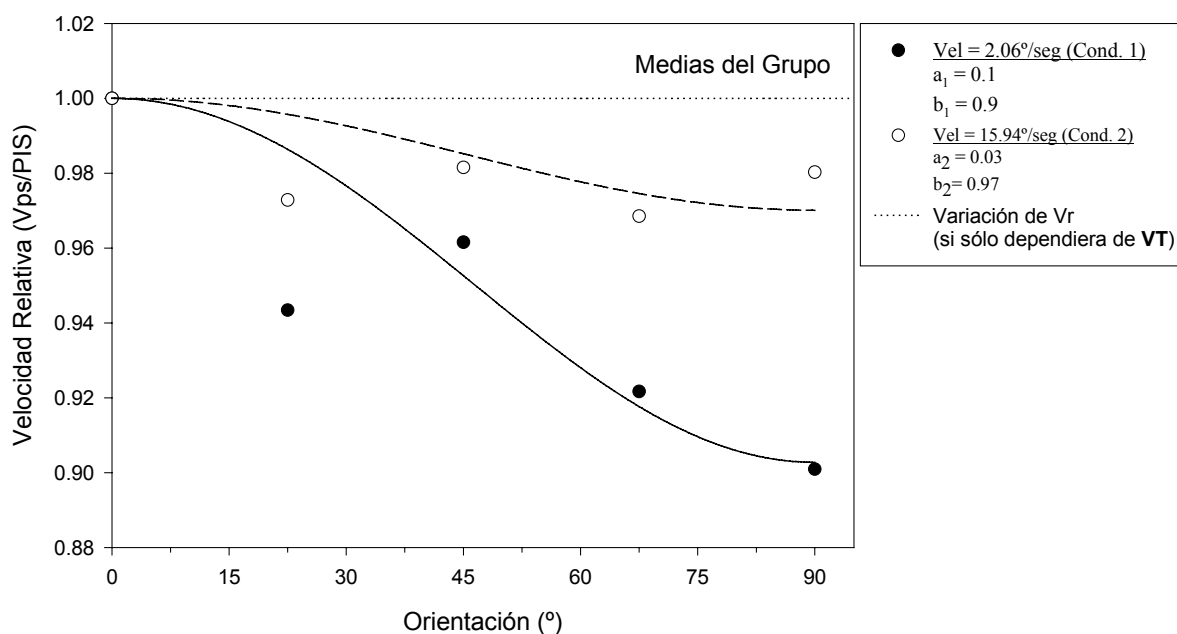


Figura 3.7: Efecto de la orientación sobre la velocidad relativa. La gráfica muestra los resultados medios obtenidos para los 3 sujetos en las dos condiciones experimentales estudiadas. Los datos son ajustados según las predicciones de la *Weighted Average Hipótesis*. La línea continua muestra el mejor ajuste obtenido para la condición experimental 1 y la línea entrecortada aquel que se obtiene para la condición experimental 2. Los parámetros a y b obtenidos para cada ajuste aparecen en el cuadro de referencias de la figura. La línea punteada muestra como sería la variación de V_r si la velocidad estuviera sólo determinada por el vector V_T .

A fin de comparar el comportamiento de nuestros resultados con respecto al modelo propuesto por Castet et al., ajustamos los valores de velocidad relativa obtenidos en el presente experimento a la ecuación 3.4⁴¹. Nótese que en este caso se incluye el valor correspondiente a la “condición control” (orientación 0°) que es efectivamente igual a la unidad. Cuando la V_r vale 1 se representa la igualdad en la percepción que, en este caso, corresponde a los dos estímulos son líneas verticales (condición control). Las funciones que predicen los valores de V_r así como los parámetros a y b obtenidos para cada condición experimental se muestran en la figura 3.7.

⁴¹ Específicamente, el ajuste se hace sobre la expresión analítica de la ecuación 3.4 dado que ésta contiene dos magnitudes vectoriales. Para mayor detalle sobre la transformación matemática que lleva desde la expresión vectorial a la analítica véase el apéndice matemático (pág. 1936) de Castet et al. (1993).

3.3 Discusión

Los parámetros a y b que se muestran en la figura 3.7 expresan cuantitativamente los diferentes pesos de cada tipo de señal en el cómputo final de la velocidad percibida. A partir de un primer análisis de estos valores, se observa que la información predominante a la hora de recuperar la velocidad en ambas condiciones experimentales proviene de los terminadores. Asimismo, es evidente que la relativamente escasa influencia que ejerce la señal local (V_L) ($a_1=0.1$ y $a_2=0.03$) en la recuperación de la velocidad es casi inexistente para el caso de la velocidad alta.

La aproximación cuantitativa que plantea el promedio ponderado de vectores (*Weighted Average Hipótesis*) no pretende proveer de un modelo general de integración de la velocidad, pero sin embargo permite explicar una parte de nuestros resultados. En este sentido, resulta imprescindible tener en cuenta las diferencias existentes entre el experimento realizado por Castet et al. (1993) y el nuestro ya que así podremos valorar con mayor precisión nuestros resultados a la luz de la hipótesis explicativa planteada por estos autores. Las principales diferencias entre ambos experimentos aparecen resumidas en la tabla 3.3, mientras que las diferencias en los valores de los parámetros obtenidos en uno y otro experimento se muestran la tabla 3.4.

Pensamos que el comportamiento casi oscilante de los PIS obtenidos para la velocidad alta puede explicarse, al menos en parte, por el tipo de método utilizado por nosotros para medir el PIS. Observando la figura 3.3 se puede apreciar que, salvo para el sujeto A, las velocidades del estímulo de comparación utilizadas no resultan suficientes para saturar la función psicométrica en sus extremos. Dado que el PIS corresponde con la abscisa del punto de inflexión de la función estimada, es lógico pensar que dicho estimador necesita de funciones suficientemente saturadas para mostrar una tendencia clara (obsérvese, por ejemplo, el panel que corresponde al Sujeto A, vel. = 15.94°/seg. en la figura 3.3). En este sentido, un método adaptativo, como el utilizado por Castet et al., podría ser más sensible para el caso de las velocidades altas. La metodología utilizada por nosotros (tarea de igualación mediante el método de estímulos constantes) no parece ser lo suficientemente sensible como para identificar variaciones pequeñas de la velocidad percibida como las que se esperan al menos para el caso de la velocidad alta (15,94°/seg.).

Tabla 3.4 Parámetros a y b obtenidos en el experimento 1 de Castet et al. (1993) y los obtenidos por nosotros en el presente experimento.

Parámetros	Castet et al. (1993)		Maiche (2002)	
	2.1°/seg	4.2°/seg	2.06°/seg	15.94°/seg
a	0.41	0.25	0.1	0.03
b	0.59	0.75	0.9	0.97

Si consideramos (siguiendo la propuesta de Castet et al.) que los pesos relativos de las diferentes señales (V_L y V_T) que se expresan a través de los parámetros a y b posiblemente reflejan el efecto de muchos factores que pueden estar confundidos (luminancia, tiempo de presentación de los estímulos, etc), debemos asumir que no es posible comparar directamente los resultados obtenidos en ambos experimentos. Sin embargo, resulta interesante observar cómo algunas de las predicciones que realizan Castet et al. se mantienen vigentes en los resultados de nuestro experimento.

El peso de las señales que provienen de los terminadores expresadas por el parámetro b resulta mucho mayor en nuestro caso que para Castet et al. Esto podría estar relacionado con el número de terminadores o puntos con información no ambigua de velocidad que presentan los estímulos utilizados por nosotros (5) en comparación con las líneas que utiliza Castet (2). Por otro lado, Castet et al. (1993) sugieren que el peso relativo de la señal local (parámetro a) es aproximadamente 1.6 veces menor para una velocidad de 4.2°/seg. que para la condición de velocidad 2.1°/seg. (pág. 1931). Dicha relación podría mantenerse en los resultados obtenidos por nosotros si se asume constante dicha tasa de crecimiento. Partiendo del decrecimiento en razón 1.6 para cada duplicación de la velocidad y, considerando que la velocidad más alta utilizada por nosotros es aproximadamente 4 veces mayor que la velocidad baja, podemos predecir un valor del parámetro a_2 4 veces menor que a_1 ⁴². Dicha predicción se cumple en nuestros resultados (véase tabla 3.4).

Para concluir, podemos decir que los resultados obtenidos en este experimento nos permiten afirmar que la orientación de los estímulos produce un efecto en la velocidad percibida. Con respecto a la magnitud de dicho efecto, parece ser determinante el número de terminadores de los estímulos. Asimismo, parece claro que, al menos con los estímulos y la metodología utilizada por nosotros en este experimento, el efecto de la orientación en la velocidad alta no resulta significativo. Esto podría indicar que la metodología empleada en el presente experimento no resulta suficientemente sensible como para medir muy pequeñas variaciones de la velocidad percibida. El experimento 2 pretende abrir camino en este sentido a través de una metodología basada en el análisis de los Tiempos de Reacción.

⁴² Los subíndices representan a la condición experimental.

LOS TIEMPOS DE REACCIÓN

Capítulo 4

4 Los Tiempos de Reacción

El tiempo que consumen los procesos humanos es una característica fundamental para comprender el funcionamiento de los mismos, tanto para los procesos preponderantemente biológicos como para aquellos fundamentalmente psíquicos (si es que se nos permite tal distinción a meros efectos didácticos). En Psicología, al tiempo que los humanos tardamos en emitir una respuesta desde la presentación de un estímulo se le denomina “Tiempo de Reacción”⁴³ (TR) y ha sido la variable dependiente natural en muchos de los experimentos llevados a cabo por esta ciencia desde el siglo XIX.

Partimos de la definición propuesta por Chocholle (1972) que resume de manera inteligente los diferentes aspectos que debemos considerar al hablar de Tiempo de Reacción. Para este autor, el TR es *“la demora más breve entre una respuesta simple que presenta caracteres de una respuesta habitualmente voluntaria y una incitación inicial que, casi siempre, adquiere la forma de un estímulo, estando ambas determinadas y fijadas por el operador y sin que existan entre ellas relaciones naturales algunas”* (Chocholle, 1972: 80). Desde esta perspectiva, una metodología basada en los TR requiere de un cuidado meticuloso de una serie de aspectos y del seguimiento de una cantidad de reglas para que su registro resulte fiable y su análisis nos permita arribar a alguna conclusión. Por un lado, es necesario tener en cuenta que el TR que medimos ante la respuesta representa la sumatoria de distintas latencias⁴⁴ en el proceso (otros TRs) y, por otro lado, es importante saber que los TR se encuentran influidos por una gran cantidad de factores (fisiológicos, psicológicos, experimentales, orgánicos, etc.). Asimismo, la variación intra e inter sujeto es elevada (incluso en condiciones normales) por lo que resulta especialmente interesante poder discriminar entre las variaciones de TR provenientes de factores cognitivos y aquellas que responden a factores relacionados con la sensibilidad del sistema en cuestión (véase apartado 4.2.3).

⁴³ Originalmente solía usarse el término “Tiempos de Respuesta” (*Response Times*) ya que de alguna manera se consideraba más amplio. En la actualidad los autores utilizan indistintamente uno y otro término para referirse al tiempo que se tarda en emitir una respuesta. En este texto, se utilizará la denominación Tiempo de Reacción (TR), que fue utilizada por primera vez en el trabajo clásico de Exner en 1873.

⁴⁴ En este texto, se utilizará la palabra *latencia* para referirnos a los tiempos intrínsecos de las diferentes fases que componen el TR global y observable.

Es necesario entonces considerar todas estas dificultades y precauciones antes de realizar una investigación que utilice el TR como variable dependiente. Este capítulo pretende describir algunas de las características históricas de la metodología de investigación basada en el estudio de los TR así como aspectos relacionados con su utilización como método psicofísico. Entre estos aspectos, se aborda específicamente el tema de los factores que influyen en el TR (apartado 4.2.2) así como la variabilidad que presentan este tipo de datos y las características de un método para su tratamiento (apartado 4.2.3). También se describen brevemente algunos elementos sobre la modelización matemática en que se apoya el modelo de análisis que se utilizará en la parte experimental, concretamente los referidos a la función de Piéron (apartado 4.2.1).

4.1 Un poco de historia

Según cuenta Chocholle (1972), los astrónomos fueron los primeros en descubrir que la reacción no era inmediata sino que presentaba un cierto atraso con respecto al estímulo. Al parecer, según figura en los informes del director del observatorio de Greenwich en 1795, había un asistente que anotaba los pasajes por el meridiano con una décima de segundo de atraso. En un principio, esto fue considerado una falta grave por el director del Observatorio, seguramente debido a la desconcentración o la poca preocupación por el desempeño de la tarea que dicho suceso implicaba. Sin embargo, varios años después, en 1820, otro astrónomo⁴⁵ decidió comparar los registros de varios observadores y descubrió que diferían entre sí con respecto a la duración del pasaje de una estrella por el meridiano. A partir de esto se comenzó a pensar en que podían existir diferencias entre dos individuos y que esa diferencia era relativa y dependía de ciertas condiciones.

Sin embargo, no fue hasta 1850 que Helmholtz se introduce verdaderamente en la experiencia de los TR. No podemos decir que su incursión fue específicamente dirigida al estudio de los TR (tal cuál los concebimos hoy) ya que su interés – es necesario recordar que Helmholtz era fisiólogo- se centraba en la velocidad de conducción del impulso nervioso. A fin de averiguar esto, Helmholtz procedió a aplicar un impulso eléctrico débil en diferentes partes de la piel al cual el sujeto debía responder mediante un movimiento. Partiendo del principio de que las fibras nerviosas que transportaban dicha información se encontrarían en un mismo punto en el cerebro, y considerando que cuanto mayor fuera la distancia de la zona estimulada al cerebro mayor tiempo consumiría el transporte de la señal, pensó que podría determinar la velocidad de transmisión de un estímulo nervioso.

⁴⁵ El astrónomo alemán Bessel.

Sin percatarse del todo de la importancia de su idea, Helmholtz abandonó este método al encontrarse con una enorme variabilidad en los datos y con que muchos de ellos eran incoherentes con su hipótesis previa. Apenas si lo comunicó en una conferencia en 1850, que fue posteriormente traducida al inglés, lo cual, según cuenta Chocholle (1972), permitió que varios autores se dieran cuenta del interés del método en cuestión. Wundt y sus colaboradores (1874, 1903) – particularmente el norte-americano Cattell (1886, 1890, 1895) que realizó su Tesis Doctoral en el famoso Laboratorio de Leipzig - fueron quienes formalizaron el método de los TR y mostraron algunas de sus ventajas.

Sin embargo, los primeros trabajos que plantean una metodología de investigación basada en el estudio de los TR no corresponden al equipo de Wundt. Link (1992) menciona el trabajo de De Jaager (1865) como pionero en este tipo de metodologías, mientras que otros autores (p.e. Luce, 1986) fijan el origen del interés en el tema en el fisiólogo holandés F.C. Donders. Donders fue pionero en describir las etapas del tratamiento en el TR, aunque su trabajo no fue conocido hasta un siglo después en que se tradujo su obra al inglés (Donders, 1868/1969). Lo cierto es que Helmholtz, De Jaager y Donders han dejado sólidos fundamentos para el uso del TR en el estudio de los procesos psico-fisiológicos. Su asunción fundamental es que la complejidad del procesamiento aumenta el TR, es decir que cuanto más compleja es una tarea de discriminación⁴⁶, más tiempo se necesita para emitir una respuesta (Link y Bonnet, 1998). El concepto se relaciona con la información que el TR es capaz de aportar sobre los procesos psicológicos. Joseph Jastrow (1890) utiliza esta idea para argumentar en favor del estudio de los TR asumiendo que existen diferentes caminos por los que la información en el cerebro puede ser transportada y que, cada uno de ellos, consume tiempos distintos. Por ese entonces, el estudio de los TR se enfrentaba a dos grandes barreras para su desarrollo: por un lado, el auge del conductismo (*behaviorism*) y, a su vez, un escaso desarrollo tecnológico (no existían aún los ordenadores) que facilitara la programación de los experimentos y el control de las condiciones experimentales (véase más abajo).

Los experimentos de F.C. Donders fueron de los primeros en utilizar una metodología basada en el TR (Benschot y Draaisma, 2000)⁴⁷. Donders aplicó un impulso eléctrico al pie izquierdo y al derecho del sujeto y midió el tiempo que el sujeto tardaba en presionar una tecla que indicara cual había sido el pie que había recibido el impulso. En una de las condiciones

⁴⁶ Podemos asumir que cualquier tarea implica una discriminación. Incluso una simple tarea de detección implica discriminar entre ruido y señal.

⁴⁷ Sin embargo, otros autores parecen no estar de acuerdo con considerar que los trabajos de Donders hayan sido los primeros. Link (1992) cita los trabajos de De Jaager como anteriores y Haupt (1999) sugiere que ya en 1862 W. Wundt, mientras era asistente de fisiología del Prof. Helmholtz en la Universidad de Heidelberg, presentó un estudio que utilizaba los TR como extensión del trabajo de su supervisor (1850-1852).

experimentales, el sujeto tenía conocimiento previo sobre cuál de sus dos pies sería estimulado, mientras que en la otra no disponía de este conocimiento antes de la aplicación del impulso eléctrico. Donders encuentra que la diferencia entre ambas condiciones experimentales es de 1/15seg. Para Benschot y Draaisma (2000), esta medida representa una de las primeras mediciones de la duración de un proceso en la mente humana (pero, téngase en cuenta también el trabajo de De Jaeger, 1865). Según nos cuentan estos autores, Donders era consciente de la importancia de su descubrimiento ya que escribió: "*This was the first determination of the duration of a well-defined mental process. It concerned the decision in a choice and an action of the will in response to that decision*" (Donders, 1868/1969).

Sin embargo, Donders no continuó interesado en el estudio de los Tiempos de Reacción y serán Wilhelm Wundt y sus colaboradores quienes desarrollarán formalmente el tema. Wundt, no sólo se dedica a elaborar y perfeccionar una serie de dispositivos complejos para la precisa medición de los Tiempos de Reacción (el cronógrafo, el martillo control⁴⁸ y el cronoscopio de Hipp), sino que además desarrolla un programa de investigación basado en la medida del tiempo que consumen los procesos mentales. Concretamente, el primer laboratorio de Psicología Experimental creado en 1879 en Leipzig, se centró, hasta 1950, en la medición del tiempo de los procesos psicológicos o lo que se convino en llamar, la "cronometría mental".

Aparatos como el cronoscopio (aunque una versión más moderna) fueron utilizados, por ejemplo, en los trabajos de Chocholle (1945, 1948 y 1954) para la medición de los TR a la percepción de estímulos auditivos. Sin embargo, es a partir de la década de los 60 que la investigación sobre el TR sufre una revolución de la mano de la aparición de los ordenadores y del auge que adquiere el enfoque del *procesamiento de la información*⁴⁹. Con los ordenadores, se gana fundamentalmente en facilidad (y no tanto en precisión de medida del TR) dada la versatilidad que permiten estas máquinas para la presentación de diferentes situaciones al sujeto. Los ordenadores permiten a través de una simple orden mostrar, de manera aleatoria, diferentes situaciones del estímulo y, al mismo tiempo, controlar variables como el intervalo entre ensayos que influye directamente sobre la respuesta de los sujetos, introduciendo modificaciones en el TR.

Sin embargo, aún con la enorme ventaja que posibilita la utilización de la tecnología actual en experimentación, pensamos como Luce (1986) en cuanto a que la empresa de conocer los procesos mentales a través del TR es, cuando menos, difícil. No obstante, cabe esperar que el TR nos aporte información sobre la organización general del sistema y quizás algún detalle

⁴⁸ Cuya denominación original en alemán es *Schailhammer*

⁴⁹ Prueba de ello es la traducción al inglés del libro de Donders (1868/1969) un siglo más tarde y la aparición de la serie *Attention & Performance* (1967).

de su funcionamiento a partir, por ejemplo, de relacionar los datos de TR con otros que provienen de estimaciones subjetivas del sujeto (evaluadas mediante juicios) y que se obtienen a partir de métodos psicofísicos tradicionales. El trabajo experimental que aquí presentamos se inscribe dentro de esta línea y pretende combinar los resultados obtenidos para la estimación de la velocidad (experimento 1) con los TR obtenidos para la detección del movimiento (experimento 2 y 3) a fin de conocer el tratamiento de la información sobre la velocidad que realiza el sistema visual.

4.2 La utilización de los TR en Psicofísica

Como se puede deducir del apartado anterior, varios son los trabajos que abordaron tareas netamente psicofísicas utilizando una metodología basada en los TR desde los primeros tiempos de la Psicología Experimental (De Jaager, 1865; Donders, 1868/1969; Exner, 1873; Cattell, 1886, etc.). El posicionamiento teórico de estos investigadores era evidentemente cercano a lo que hoy denominamos como enfoque del *procesamiento de la información* que, en función del auge que tuvo el *Conductismo* en aquella época en Psicología, no logró desarrollarse hasta casi un siglo después. Seguramente debido a esto es que la metodología basada en los TR se ha desarrollado tradicionalmente al margen de las investigaciones psicofísicas (Bonnet y Dresch, 2001).

Sin embargo, Cattell (1902) plantea un principio en el estudio de los TR que incluso hoy tiene vigencia (pero véase más adelante). Cattell sugiere que los estímulos que provocan la misma respuesta discriminativa, producirán iguales TR. Este principio, como señalan Link y Bonnet (1998), indica que el TR se incrementará a medida que la intensidad del estímulo disminuya y fue lo que permitió a Piéron (1914) proponer una función que representara la variación de TR en función de la intensidad del estímulo. Concretamente, Piéron (1914) concluye que, para una misma modalidad sensorial, el TR simple disminuye a medida que la intensidad del estímulo aumenta, y que esta variación puede ser descrita por una función hiperbólica que hoy, en su honor, denominamos como “función de Piéron” (véase apartado 4.2.1).

Habitualmente distinguimos entre dos tipos de TR: por un lado, los tiempos de reacción simples (TRs) que son aquellos que se miden cuando el acto perceptual es elemental (tareas de detección, por ejemplo) y, por otro lado, existen los tiempos de reacción complejos (TRc) en donde el acto perceptual se encuentra más diferenciado y, por tanto, se requiere una decisión por parte del sujeto (tareas de discriminación, por ejemplo). Estos últimos responden a situaciones donde el sujeto debe elegir entre varias respuestas posibles ante un estímulo determinado y, debido a esto, recibe también el nombre de tiempo de reacción a la elección

(*choice reaction time*). Evidentemente, los TRc suelen ser más elevados que los TRs para una misma modalidad sensorial. La ley de Piéron (o función de Piéron) se propuso inicialmente para describir la variación del TR simple, aunque recientemente (Pins y Bonnet, 1996) se ha demostrado que dicha función también es adecuada para describir la variación de los TR de elección variando el valor del término independiente.

4.2.1 La función de Piéron

Desde que se comenzaron a estudiar los TR, se han propuesto una gran variedad de funciones cronométricas para describir su variación en función de la intensidad del estímulo. Para la mayoría de las modalidades sensoriales estudiadas, la función de Piéron (1914) se ajusta adecuadamente a los datos y provee un buen ajuste para la mayoría de los casos (véase p.e. Bonnet, Zamora, Buratti y Guirao, 1999). Dicha función puede ser escrita de la siguiente forma:

$$TR = \beta \cdot I^{-\gamma} + t_0 \quad (4.1)$$

donde TR es el tiempo de reacción, β un parámetro de ajuste, I la intensidad del estímulo, γ el exponente y t_0 un tiempo de reacción asintótico independiente que representa el mínimo TR posible en que se admitiría la respuesta para una determinada modalidad sensorial y una determinada tarea (Link, 1992). El exponente de la función (γ) representa al parámetro de sensibilidad⁵⁰ y es específico para cada modalidad sensorial aunque existen grandes divergencias en los valores propuestos para algunas modalidades (Maiche et al., 2000). El parámetro (β) es un parámetro de ajuste de la función y depende del rango de variación de los TR observados. El parámetro t_0 , en principio, estaría relacionado con el criterio de respuesta y es, por definición, independiente de la intensidad (Bonnet y Dresp, 2001; Dzhafarov et al., 1993); sin embargo, cambia con la modalidad sensorial, como se desprende de la comparación de los TR obtenidos para el gusto y la visión (Bonnet y Dresp, 2001), lo cual indica que podría expresar también un componente sensorial global.

La función de Piéron ha sido utilizada para describir la variación de TR en diferentes modalidades sensoriales, enfatizando la capacidad de los TR de aportar información acerca de las propiedades de una etapa temprana del procesamiento de la información (etapa sensorial) a través de diversas tareas psicofísicas. Tanto en visión (Maiche et al., 2000, 2001; Mateeff, Genova, Hohnsbein, 1999; Pins y Bonnet, 1996, 1997; Tynan y Sekuler, 1982), como en

⁵⁰ Específicamente, representa al parámetro que determina la respuesta sensorial del sujeto a la tarea. Asumimos que la sensibilidad es un parámetro general que caracteriza a cada modalidad sensorial, mientras que la respuesta sensorial refiere específicamente al componente de la respuesta del sujeto que depende exclusivamente de la intensidad del estímulo. Es decir, que no resulta afectado por el criterio.

audición (Chocholle, 1945), como en otras modalidades sensoriales el ajuste de los resultados de TR que se obtiene con dicha función suele ser muy satisfactorio (véase p.e. Bonnet et al., 1999; Dzhafarov et al., 1993). Sin embargo, es importante tener en cuenta que los tres parámetros de dicha función presentan, generalmente, un alto grado de interdependencia entre ellos lo cual puede representar un problema a la hora de interpretar sus valores. Por esta razón, si bien la función de Piéron permite representar adecuadamente la variación del TR en función de la intensidad del estímulo, es también muy útil contar con un modelo de TR como el que se presenta más adelante (véase apartado 4.2.3), que permita separar los componentes sensoriales de la respuesta de los factores decisionales involucrados en el tiempo que se tarda en emitir una respuesta (TR).

Cualquier medida psicofísica combina efectos de diferentes factores y, por lo tanto, no debemos asumir la respuesta observada como la salida directa del sistema sensorial en cuestión (Bonnet, 1996; Green y Swets, 1966; Luce, 1986). Como mínimo, y siguiendo los principios de la *teoría de detección de señales*, se debe asumir que la respuesta se compone de dos elementos: el componente sensorial y el componente referente al criterio de respuesta (Bonnet y Dresch, 2001). De esta manera, parece quedar claro que incluso para un mismo tipo de estímulo y trabajando sobre la misma modalidad sensorial, no existe una única combinación de parámetros que determine la función de Piéron. La habitual variabilidad que se puede comprobar al comparar los distintos valores de los parámetros reportados puede deberse a esta característica de la función de Piéron, o también a cambios en el criterio de respuesta de los sujetos (o incluso a factores cognitivos de más alto nivel; Bonnet y Dresch, 2001). En este sentido, para el análisis de nuestros resultados de TR al inicio del movimiento, se utilizará el modelo que proponen Bonnet y Link (1998) y que luego desarrollan Bonnet y Dresch (2001) que pretende separar los componentes de orden sensorial de la respuesta de los relativos al criterio de respuesta que utiliza el sujeto a partir de los datos de TR (véase apartado 4.2.3).

A partir de aquí, se describen algunos de los factores que más comúnmente intervienen en la variabilidad de los TR haciendo especial hincapié en aquellos que resultaron importantes en el diseño de nuestros experimentos (capítulos 5 y 6). Posteriormente se revisan los cuatro componentes (latencias) que consideramos aparecen resumidos en cada medida del TR ante un estímulo determinado. A partir de esto, y proponiendo una reformulación del principio de Cattell (1902) con respecto a la igualdad de TR ante estímulos que provocan la misma respuesta discriminativa (véase más arriba), se describirán algunos de los aspectos fundamentales del modelo de Bonnet y Link (1998).

4.2.2 Factores que influyen en el Tiempo de Reacción

Como bien nos previene Chocholle (1972), los valores absolutos de TR por sí mismos no tienen sentido alguno, ya que individualmente resultan muy sensibles a una gran cantidad de factores. En este sentido, si no se describen las condiciones en las que se registraron dichos datos, sus valores no representarán una información certera ni permitirán un análisis fiable. Además, debido justamente a esta particularidad de los TR, la interpretación de los resultados a partir de la comparación de datos obtenidos en condiciones experimentales diferentes requiere de especial precaución por parte del experimentador⁵¹.

Uno de los efectos primeramente estudiados en el campo de los TR fue el efecto de la duración del estímulo (p.e. Wells, 1913). En principio, podemos pensar que ante una intensidad supraumbral constante y cuando la duración del estímulo es breve, la intensidad percibida disminuye a medida que la duración del estímulo decrece, hasta alcanzar un mínimo por debajo del cual no se registra sensación. Este fenómeno de suma temporal implica que en la zona del umbral, y hasta cierto valor de duración, aparece un fenómeno de complementación total entre la intensidad y la duración. Más allá de ese valor límite de duración del estímulo, la compensación entre ambas variables es parcial. Y, para presentaciones del estímulo aún más duraderas, no se registra ningún efecto del tiempo de presentación. Esto implica que si presentamos un estímulo durante un tiempo suficientemente largo, no se registrará, por ejemplo, ninguna variación en el TR que se pueda relacionar con el tiempo de presentación y, por tanto, éste variará fundamentalmente en función de la intensidad. Este efecto de la duración del estímulo sobre el TR constituye un factor puramente sensorial y, por consiguiente, las variaciones de TR provenientes de los cambios en la duración del estímulo afectan a la sensibilidad del sistema.

Por el contrario, los efectos provenientes del nivel de preparación del sujeto ante la respuesta refieren a factores decisionales y no de la sensibilidad del sistema, por lo cual suelen estar relacionados con el criterio de respuesta de los sujetos. En este sentido, existe evidencia empírica con respecto a la presencia del efecto del intervalo entre estímulos sucesivos o entre señal y estímulo⁵². El TR disminuye si se advierte al sujeto antes de que aparezca el estímulo (Wundt, 1903), lo cual ha permitido la denominación de *período preparatorio* para referirnos

⁵¹ debido a esta razón, en los experimentos de TR que aquí se presentan se intentó preservar al máximo las constantes experimentales; véase capítulos 5 y 6

⁵² En los experimentos que presentamos en los capítulos 5 y 6 la señal es justamente el propio estímulo que aparece estático en la pantalla a fin de favorecer la fijación de la mirada del sujeto. Luego de un tiempo aleatorio (período preparatorio) el estímulo comienza a moverse. A fin de introducir conceptos que veremos con más detalle más adelante, podemos decir que durante el período preparatorio el sistema sólo recibe ruido y a partir de allí, recibirá ruido y señal. La capacidad para discriminar entre ruido y señal determinará la respuesta del sujeto (véase apartado 4.2.3).

al intervalo entre la señal y el estímulo. Para evitar los efectos de anticipación y de automatización de la respuesta es aconsejable variar aleatoriamente el intervalo entre señal y estímulo de una medición a otra (Klemmer, 1956). Dicho intervalo debe ser lo suficientemente largo como para que el sujeto se encuentre listo para emitir una nueva respuesta pero, a la vez, no debe ser tan extenso como para provocar un descenso en la atención del mismo (Chocholle, 1972).

En cuanto a las variaciones de TR producidas por la fatiga o la activación de los sujetos, el modelo de Bonnet y Link (1998) asume que éstas provienen de factores decisionales que pueden alterar el criterio de respuesta en un momento determinado, pero no interfieren en la sensibilidad del sistema. Dicha asunción constituye una hipótesis empírica que se ha sometido a prueba a través del análisis de los TR individuales para varios sujetos durante largas sesiones de experimentación (Bonnet, comunicación personal). El efecto que produce la fatiga determina un aumento en los TR (Forbes, 1945). En este sentido es aconsejable controlar la duración de cada una de las sesiones que realiza un sujeto. Si bien estos elementos varían para cada sujeto, como regla general, se recomienda que las sesiones no superen los 30 minutos. Asimismo, uno de los factores orgánicos que resultan más interesantes y que pueden influir en los TR es la hora del día en que se realiza la prueba. Según Kleitman, Titelbaum y Feiveson (1935) los TR disminuyen por la mañana y aumentan pasado el mediodía siguiendo las variaciones de la temperatura corporal. Sin embargo, otros autores (Elbel, 1939) proponen que la variación de TR en función de la hora del día responde a patrones más complejos. Coincidiendo con esta visión, los resultados presentados por nosotros (Soler, Aparici, Maiche y Estaún, 2002) muestran que las variaciones de TR podrían estar relacionadas con el ritmo circadiano individual (nocturnidad/diurnidad).

Por último, es necesario mencionar el efecto de algunos factores “personales”⁵³ ya que ellos podrían estar en la base de la alta variabilidad a la que nos enfrentamos habitualmente en el estudio de los TR. Varios elementos “personales” podrían estar incidiendo en los TR, pero haremos hincapié solamente en el efecto de la motivación y los factores emocionales. A partir de la realización de experiencias en donde se recompensaba al sujeto por su desempeño en la tarea (Owen, 1959) quedó claro que la motivación de los sujetos para realizar el experimento era un elemento importante en la medición del TR. Por esta razón, es habitual que en los experimentos de TR se gratifique económicamente a los sujetos por participar, debido a la

⁵³ Incluiremos dentro de esta denominación a los aspectos relacionados con características propias de cada sujeto como, por ejemplo, variables motivacionales o incluso de personalidad.

exigencia de tiempo y disposición que el método requiere⁵⁴. Los factores propiamente emocionales, sin embargo, suelen incidir de una manera diferente. Según Washburn, Keller, New y Parshall (1929), los sujetos emotivos obtienen mayor variabilidad en sus datos que los sujetos con escaso grado de emotividad. Sin embargo, es probable que el efecto de los factores emotivos en el TR sólo resulte significativo en tareas complejas donde el procesamiento de la información necesaria para su ejecución es de más alto nivel. Asimismo, es necesario tener en cuenta que el entrenamiento de los sujetos reduce en buena medida la influencia de estos factores en el TR y estabiliza la respuesta del sujeto, disminuyendo el rango de variación del TR. Por esta razón, resulta imprescindible para la metodología psicofísica basada en el análisis de los TR, disponer de sujetos altamente entrenados. De toda maneras, el entrenamiento minimiza la variabilidad proveniente de estos factores, pero no la anula. Por lo tanto, es importante tener en cuenta que tanto los factores emocionales como los motivacionales afectarán al criterio de respuesta del sujeto, pero no a la sensibilidad. Seguramente debido a esto, Link (1992) denominó con la palabra “*willingness*” (disposición) al factor determinante en el establecimiento del criterio de respuesta en los sujetos.

Mas allá de todas estas consideraciones, debemos asumir que la variabilidad en los TR, no sólo debe ser explicada, sino que además es necesario tratarla mediante procedimientos que nos permitan entender su significación con respecto a la tarea y al procesamiento de la información que ella requiere. Concretamente, resulta importante averiguar los orígenes de esta variabilidad antes de que podamos realmente proponer una única ley psicofísica para la variación del TR (Bonnet y Dresp, 2001). El TR observado no proviene directamente de una sensación sino que representa la suma de sucesivas etapas en el recorrido neuronal que van desde el receptor hasta la respuesta motora. En los TRc, como los que se usan en nuestro trabajo experimental, podemos distinguir cuatro etapas concatenadas que en suma determinan el TR final u observado de cada respuesta. Cada una de estas etapas tiene una latencia específica y, por tanto, determinan cuatro fuentes potenciales de variabilidad del TR: la sensorial, la perceptual (discriminación), la decisional y la motriz (respuesta). La etapa sensorial consume el tiempo que corresponde a la detección del estímulo por parte del receptor que dependerá enteramente de la sensibilidad del sistema involucrado. La etapa perceptual requiere de un procesamiento más fino y el tiempo que consume se utiliza para discriminar entre las diferentes opciones del estímulo y se relaciona directamente con la cantidad de información disponible (generalmente incluye factores de más alto nivel que la sensibilidad, que sin embargo, responden al sistema sensorial). La decisional representa el tiempo que

⁵⁴ En los experimentos que presentamos en este trabajo se gratificó la participación de los sujetos que no tenían vinculación alguna con el trabajo. Afortunadamente para el presupuesto de nuestra investigación, dos de los sujetos que utilizamos están vinculados directamente con la misma (autor y co-director).

consume la decisión sobre la respuesta a emitir y claramente depende de aspectos decisionales ligados al criterio de respuesta del sujeto. Por último, la etapa motriz representa el tiempo que consume la respuesta motora.

Si bien es cierto que todos los procesos (biológicos y psicológicos) consumen un tiempo que es estadísticamente variable de un sujeto a otro e incluso intra- sujeto, el tiempo que consume una de las etapas que componen el TR descritas anteriormente puede considerarse estadísticamente constante. Es el caso de la etapa motriz que expresa el tiempo que consume la emisión de una respuesta motora. Tal como lo demuestra el reciente trabajo de Miller y Low, podemos asumir que la duración media de los procesos motores no varía a través de los diferentes ensayos y, en principio, tampoco en función de la tarea (Miller y Low, 2001). Por tanto, consideraremos, para el análisis del TR, que la respuesta motora consume un tiempo fijo y estable que se ubica en torno a los 100 milisegundos. El parámetro t_0 de la función de Piéron (ecuación 4.1) se relaciona con el tiempo que consume la respuesta motora, aunque dicho parámetro incluye también al criterio de respuesta, así como un componente global de la sensibilidad para cada una de las modalidades sensoriales (véase más adelante).

Siguiendo con esta línea de razonamiento, a fin de efectuar un análisis de la variabilidad del TR que discrimine los componentes ligados a la respuesta sensorial de aquellos componentes decisionales, podemos despreocuparnos –en principio- de la etapa motriz. Sin embargo, la variación del tiempo que consume la etapa sensorial será fundamental para identificar los posibles cambios en la respuesta sensorial del sistema. En este sentido, pensamos que el principio propuesto por Cattell (1902) que sugiere iguales TR ante estímulos que provoquen la misma respuesta discriminativa es válido solamente si lo restringimos al componente sensorial del TR. En consonancia con los principios que guían el modelo de Bonnet y Link, partimos de la base de que la intensidad será la mayor responsable de la variación del tiempo que consume la etapa sensorial. Así, para una misma intensidad (e igual cantidad de información disponible para el sistema), esperamos iguales respuestas sensoriales, siempre que los sujetos presenten la misma sensibilidad (por ejemplo, que no tengan deficiencias sensoriales como pérdida visual, sordera, etc.). El exponente de la función de Piéron (γ) se relaciona directamente con la respuesta sensorial del sistema y, por tanto, cabe esperar valores similares en este parámetro para las diferentes funciones de los sujetos que presenten la misma sensibilidad ante una tarea determinada.

La sensibilidad representa una noción general de la capacidad de un sistema sensorial para procesar cierto tipo de información, en nuestro caso, la velocidad de un movimiento. Utilizamos el término “respuesta sensorial” para representar una noción más específica que, en el caso de los TR, incluye tanto al componente puramente sensorial del receptor (tiempo que

tarda en procesar la información del estímulo que se relaciona directamente con la intensidad de la señal), como a un componente posterior que se relaciona con la cantidad de información que el sistema debe procesar para decidir su respuesta. Estos dos componentes están representados en la respuesta sensorial, que queda determinada por el exponente de la función de Piéron (más concretamente por el exponente de la función de Sensibilidad, como se verá más adelante). La elección de dicho término responde a que, para nosotros, la sensación implica diferentes etapas de procesamiento de la información y nuestro interés se ubica en la naturaleza temprana de la información generada por un estímulo en determinado sistema sensorial (Bonnet y Dresp, 2001).

La etapa decisional, por el contrario, es la responsable de la mayor parte de la variación del TR que habitualmente se reporta. Dicha etapa consume un tiempo variable de sujeto a sujeto, e incluso puede variar en un mismo sujeto en lapsos de tiempo prolongados (Bonnet, comunicación personal) y se relaciona directamente con el criterio de respuesta del sujeto. En cada ensayo, podemos suponer que tiene lugar un proceso de acumulación de la información proveniente del estímulo que sólo al llegar a determinado nivel activará la fase motora (cuarta etapa). Dicho proceso de acumulación es estocástico y al no conocerse las unidades de la acumulación de información se considera la media de todos los TR (a través de las diferentes intensidades) para un sujeto, como indicador del criterio de respuesta que ha utilizado en dicho experimento (véase más adelante para una explicación más detallada). Dichos factores decisionales aparecen, al menos en parte, expresados en el parámetro t_0 de la función de Piéron y se relacionan directamente con el criterio de respuesta.

En definitiva, queda claro que el TR constituye una suma del efecto de varios factores y, por tanto, es el resultado de la acumulación de diferentes tiempos, alguno de los cuales son independientes de la intensidad y otros varían conjuntamente con ella (Chocholle, 1972). Sin embargo, el análisis de los TR teniendo en cuenta estos aspectos, puede aportar elementos muy interesantes para comprender las relaciones existentes entre la sensación y el estímulo. En el capítulo 5 se propone - de manera preliminar - un método para el cálculo de las velocidades percibidas (intensidades) de líneas en movimiento a partir de los resultados de TR al inicio del movimiento.

Si bien podemos partir de la relación entre TR e intensidad que describe la función de Piéron para modelar la variación de TR, debemos conocer que no siempre podemos obtener una sola función que describa adecuadamente esta relación para todo el rango de intensidades (Pins y Bonnet, 1997; Thrane, 1960). Thrane (1960) demuestra que para las intensidades bajas del estímulo el comportamiento del TR difiere habitualmente del que se verifica para las intensidades medias o altas (demostración que también se pone de manifiesto en nuestros datos

para la velocidad; véase capítulo 5). El mismo efecto se puede comprobar a través de los análisis propuestos por Bonnet y Dresp (2001) sobre los resultados de diferentes experimentos que utilizaron la metodología de TR en diversas modalidades sensoriales.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, es posible utilizar la variación de los TR como índice de la intensidad percibida por el sujeto, por ejemplo, a través de la función de Piéron. Sin embargo, la validez de dicha utilización dependerá del éxito que tengamos en la discriminación de los factores sensoriales y los decisionales (criterio de respuesta) en la variación del TR. El modelo que presentamos a continuación, propone un tratamiento de los datos de TR que permite realizar tal distinción.

4.2.3 El criterio de respuesta y la sensibilidad: El modelo de Bonnet y Link (1998)

Los modelos sobre producción de la respuesta (Grice, 1968; Link, 1992) nos permiten separar la respuesta observada de los sujetos (en este caso un TR) en dos componentes: un componente sensorial y otro que refiere al proceso decisional. En los experimentos de TR se puede considerar que el aspecto sensorial de la respuesta puede ser descrito mediante un proceso de acumulación de la información a lo largo del tiempo. Este proceso de acumulación puede ser representado mediante funciones lineales de acumulación que se obtienen a partir de la relación entre los TR observados y un indicador del criterio utilizado para emitir la respuesta en cada sujeto (TR medio, por ejemplo). Los procesos de acumulación de información son análogos para cada una de las intensidades del estímulo por lo que las diferentes funciones de acumulación deben representar líneas paralelas (igual pendiente). El intercepto⁵⁵ de dichas funciones varía con la intensidad del estímulo, describiendo una función hiperbólica (función de Sensibilidad) cuyo exponente es un indicador de la parte sensorial de la respuesta de los sujetos a la tarea.

Algunos modelos de TR asumen que los sistemas sensoriales trabajan sobre la base de procesos acumulativos de la información proveniente del estímulo. De esta manera, la información sensorial para cada intensidad del estímulo aumentaría con el paso del tiempo por mera acumulación (Bonnet y Dresp, 2001). Estas ideas provienen de las teorías existentes con respecto a la codificación de la información sensorial que se basan, por lo general, en que la respuesta de un sujeto ante un estímulo sensorial está determinada por procesos neuronales con propiedades fijas como, por ejemplo, el recuento de los disparos de la neurona provocados por el estímulo (McGill, 1967).

⁵⁵ A lo largo del texto, utilizaremos la palabra intercepto (que deriva del inglés: *intercept*) para referirnos al valor numérico de la ordenada cuando la abscisa vale 0.

Variabilidad intra e inter individual

La llamada “Teoría de las ondas” (*The Wave Theory*) propuesta por Stephen Link (1992) parte de que cada estímulo genera una cantidad variable de eventos internos en el sistema (señales) a cada instante. Para iniciar una respuesta es necesario que se discrimine entre dos estímulos o entre dos valores del estímulo. Según la Teoría de las ondas, los eventos internos que corresponden a ambos valores del estímulo⁵⁶ siguen una *distribución de Poisson*, por lo que será la acumulación de la diferencia entre estas distribuciones lo que permitirá iniciar el proceso de discriminación y, por consiguiente, la respuesta.

Este proceso de acumulación de la diferencia que tiene lugar en el sistema es el resultado de un camino aleatorio (*random walk*) y, por tanto, constituye un proceso estocástico. El carácter estocástico del proceso podría explicar la elevada variabilidad intra-individual de los datos de TR que habitualmente aparece. Se ha demostrado que la variabilidad de los datos de TR como resultado de un camino aleatorio en la acumulación de información sensorial es plausible desde el punto de vista neuronal (Hanes y Schall, 1996). Por otro lado, el modelo de Link sugiere que el proceso de acumulación de las diferencias prosigue hasta alcanzar el umbral de respuesta del sujeto que está estrechamente ligado al criterio de respuesta⁵⁷ del mismo. Dicho criterio depende de varios factores (algunos de los cuales hemos descrito anteriormente) aunque se relaciona de manera directa con la disposición del sujeto para responder. Por consiguiente, podemos asumir que es el criterio de respuesta (y no factores relativos a la sensibilidad del sistema) el que determina la alta variabilidad inter-individual que suele presentarse entre los datos de TR de diferentes sujetos sin deficiencias sensoriales (Bonnet y Dresch, 2001).

En este sentido, el modelo que presentamos a continuación constituye una herramienta muy útil para interpretar las diferencias de TR que los mismos sujetos pueden presentar ante estímulos físicamente idénticos pero evaluados en diferentes momentos (por ejemplo, en situaciones experimentales con un intervalo de tiempo prolongado). El modelo permitirá determinar si estas diferencias se deben a una variación de la respuesta sensorial de los sujetos durante ese lapso de tiempo (cosa muy poco probable en condiciones habituales) o si, por el contrario, dichas diferencias corresponden a un cambio de criterio de respuesta de los sujetos. Esta utilidad del modelo se puede observar en el análisis comparativo de los resultados de TR al inicio del movimiento obtenidos en el experimento 2 y en el experimento 3 del presente trabajo (véase apartado 6.3).

⁵⁶ Podemos extrapolar la denominación de Link con respecto a dos valores del estímulo a los conceptos de señal y ruido ante un mismo estímulo. De hecho, el modelo de análisis de TR utiliza dicha extrapolación.

⁵⁷ Se asume tradicionalmente que el criterio de respuesta es constante para un mismo sujeto y una determinada sesión experimental.

Características del modelo

El modelo se apoya en los postulados de la Teoría de las ondas (Link, 1992) para desarrollar determinadas predicciones con respecto a la variación del TR en función de la intensidad del estímulo cuando ésta adquiere valores por encima del umbral. En este sentido, el modelo parte de que la probabilidad de detección del estímulo (tareas de detección) o de respuesta correcta (tarea de discriminación) es aproximadamente igual a uno. Bonnet y Link (1998) describen tres aspectos fundamentales del modelo que permitirán desarrollar un procedimiento de análisis de los datos de TR. Dicho análisis pretende diferenciar los componentes sensoriales de la respuesta en el sistema de aquellos relacionados con el criterio de respuesta del sujeto (factores decisionales). Estos tres elementos se resumen a continuación.

Ante la presentación de un estímulo comienza a “correr” el proceso estocástico de acumulación de la información sensorial que describíamos en el apartado anterior. La naturaleza de dicho proceso permite asumir que a mayor intensidad del estímulo, más rápido se iniciará el proceso de acumulación de la información que dará lugar, en primer lugar, a la discriminación (tercera etapa) y, posteriormente, a la iniciación de la respuesta (cuarta etapa). Esta anterioridad del proceso de acumulación de información para las intensidades altas queda reflejado en los valores del origen de las funciones de acumulación (véase figura 4.1, panel inferior). Por otro lado, la tasa de acumulación de la información (pendiente de las funciones de acumulación) se mantiene, en principio, constante⁵⁸ a través de los cambios en la intensidad física del estímulo.

La respuesta del sujeto se inicia al alcanzarse un determinado nivel en la acumulación de la información que correspondería con el umbral de respuesta del sujeto. Por lo tanto, cuanto más alto sea el criterio de respuesta del sujeto, mayores serán sus TR en general. En este sentido, podemos considerar a cada TR medio de cada sujeto como el tiempo en que se detiene el proceso de acumulación de información para cada sujeto. Como se explicita anteriormente, consideramos que el tiempo de la respuesta motora (cuarta etapa) es constante y no depende de factores decisionales ni sensoriales (Miller y Low, 2001).

Desde el punto de vista específico de cada uno de los ensayos, se considera que el TR observado representa el tiempo que necesita el proceso de acumulación para alcanzar el criterio de respuesta. Este tiempo depende por un lado de la tasa de acumulación ligada a la intensidad del estímulo y, por otro lado, del criterio de respuesta ligado, entre otros, a la disposición del sujeto a responder.

⁵⁸ Deberá ser igual a 1, según una de las asunciones del modelo.

En cada uno de los ensayos el proceso de acumulación genera un camino aleatorio. Sin embargo, si consideramos una cantidad suficientemente grande de ensayos, se puede aproximar el promedio de la acumulación de información a funciones lineales. Evidentemente, debemos construir una función de acumulación para cada una de las intensidades evaluadas en el experimento (véase apartado siguiente sobre procedimiento de análisis). Las pendientes de las funciones de acumulación determinan la tasa de crecimiento del proceso de acumulación que, desde el punto de vista teórico, deben ser iguales a uno para todas las intensidades (véase Bonnet y Link; 1998 para el desarrollo matemático de esta predicción). Los interceptos de las funciones de acumulación varían con la intensidad del estímulo describiendo una función de Piéron cuyo exponente, desde el punto de vista teórico, representa un parámetro exclusivo de la respuesta sensorial del receptor (Bonnet, comunicación personal). A esta función hiperbólica, la llamaremos función de Sensibilidad.

Desde el punto de vista teórico, se asume que las pendientes de las funciones de acumulación tomarán valores cercanos a la unidad (Bonnet y Link, 1998). Estas predicciones son teóricas y, por tanto, necesitan de comprobación mediante datos experimentales. Sin embargo, esta predicción no siempre se verifica empíricamente ya que con intensidades bajas (cercanas a la zona del umbral) la pendiente es frecuentemente menor que uno. Sin embargo, algunos análisis preliminares nos muestran que cuando consideramos solamente las respuestas correctas, la pendiente de la función de acumulación correspondiente a las bajas intensidades recuperan un valor cercano a uno. Según la demostración matemática propuesta por Link y Bonnet (1998), debemos asumir que el valor de las pendientes de las funciones de acumulación es igual a uno, cuando todos los sujetos tienen la misma respuesta sensorial. A continuación se describen algunos aspectos a tener en cuenta a la hora de proceder al análisis de los datos de TR según el modelo. Varios ejemplos aplicados de la utilidad de este tipo de análisis se pueden encontrar en los apartados 5.2.3 y 6.2.3.

Algunos apuntes sobre el procedimiento de análisis

El procedimiento parte de la función de Piéron (1914) que describe la variación de los TR en función de la intensidad para, desde allí, reconstruir las funciones de acumulación (véase figura 4.1). Éstas representan el proceso mediante el cual se acumula la información en el sistema por lo que indicarán la relación entre la *información acumulada* y el *tiempo que consume dicho proceso*. Las unidades en las que se puede medir la información acumulada es un tema controvertido aunque, siguiendo la teoría de Link (1992) podemos asumir que el *criterio de respuesta*, entendido como el tiempo en que se detiene el proceso de acumulación de información, puede ser un buen representante de la *información acumulada*. Asimismo, asumimos que el *tiempo que consume el proceso* de acumulación puede ser representado por

los valores de *TR observados*. De esta manera, las funciones de acumulación se grafican en un sistema de coordenadas donde el criterio de respuesta está en función del TR observado.

A fin de profundizar en estas asunciones cabe aclarar que partimos de la base que el criterio de respuesta no se mantiene necesariamente constante a lo largo de sesiones diferentes. En principio, debemos asumir que el entrenamiento provoca un descenso en los TR, tal cual lo demuestran Bonnet y Link (1998) que corresponde con una disminución (optimización de la respuesta) en el criterio de respuesta. Sin embargo, en sujetos bien entrenados, la variación del criterio de respuesta entre sesión y sesión es aleatoria y, por tanto, podemos considerar a la media de todos los TR observados como una buena estimación del criterio de respuesta utilizado por cada uno de los sujetos (Bonnet y Link, 1998). Esto es posible debido a que el TR señala el tiempo en que se detiene el proceso de acumulación de información y, por tanto, el TR medio será un buen indicador del momento en dónde finaliza dicho proceso; es decir, del criterio de respuesta del sujeto. La relación entre el TR específico que se obtiene para cada intensidad (TR observado) y el criterio de respuesta (TR medio) es lineal y la pendiente de dicha función será aproximadamente igual a uno para todas las intensidades supra-umbral evaluadas en el experimento (grafico inferior de la figura 4.1). Como se muestra más adelante (figura 4.2) si asumimos un valor de la pendiente igual a 1, la variación de los interceptos de las funciones de acumulación describen una función hiperbólica (de Piéron) cuyo exponente es un preciso indicador de la respuesta sensorial de los sujetos a la tarea. La figura 4.1 muestra la primera fase de este tipo de análisis para los TR a la detección del inicio del movimiento⁵⁹. La figura 4.2 muestra la segunda fase del análisis en donde se reconstruye la función de Piéron a partir del opuesto de los interceptos de las funciones de acumulación. Cuatro sujetos entrenados fueron utilizados en la tarea. Los detalles experimentales y del análisis de los datos se pueden consultar en el capítulo 5.

Las predicciones más importantes del modelo se relacionan con su capacidad para diferenciar las variaciones de TR que provienen de un cambio en la sensibilidad de aquellas que responden a factores decisionales (criterio de respuesta). En este sentido, los autores establecen que siempre que los sujetos presenten la misma respuesta sensorial, sus datos de TR se ajustarán a una única función lineal como se representa en la figura 4.1. Las diferencias

⁵⁹ Nótese que para la explicación del procedimiento de análisis se utilizan los datos de los experimentos que dan lugar al presente trabajo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que en dichos experimentos se estudia el efecto de, por lo menos, dos variables: la velocidad física y la orientación de los estímulos. El modelo está pensado originalmente para casos en que la intensidad del estímulo está representada por una sola variable en lugar de casos mixtos como éste. De todas maneras, y dado que el objetivo de este apartado es simplemente ejemplificar algunas fases en el procedimiento de análisis, hemos preferido trabajar con nuestros propios datos a fin de familiarizar al lector con ellos. La validez de las predicciones del modelo para este caso en particular, se discutirán en los apartados experimentales.

notorias en los TR entre estos sujetos (véase gráfico superior en la figura 4.1) provienen, según nos indican las funciones de acumulación, de diferencias en el criterio de respuesta, pero no de la sensibilidad de los sujetos dado que todos los datos de éstos “caen” en una única función lineal para cada intensidad. Nótese que la función de acumulación que corresponde a la velocidad más baja (1.12°/seg.) presenta una pendiente levemente inferior a 1, probablemente debido a que, en este caso, nos acercamos a la zona del umbral. En la segunda fase de análisis se “corrige” esta desviación forzando la pendiente de todas las funciones de acumulación a tomar el valor 1, tal cual predice el modelo a fin de reconstruir la función teórica de Piéron cuyo exponente (véase ecuación 4.1) constituye un indicador de la respuesta sensorial de estos sujetos ante la tarea propuesta (véase figura 4.2).

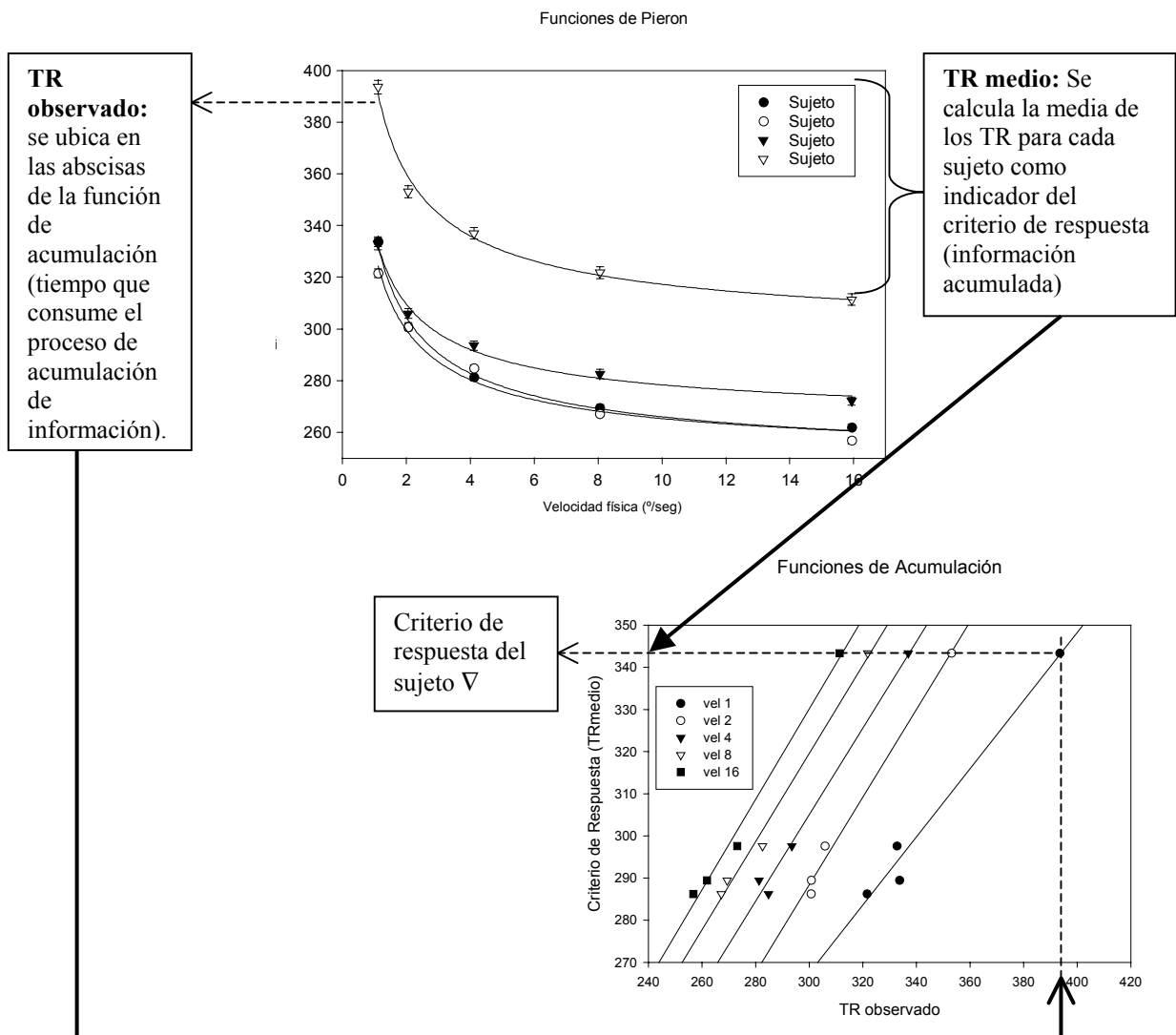


Figura 4.1: Breve esquema del procedimiento para el análisis de los TR siguiendo las asunciones del modelo de Bonnet y Link (1998). La predicción fundamental del mismo es que los sujetos cuyos datos se ajustan a una misma función lineal no difieren en su sensibilidad sino en el criterio de respuesta.

Según el modelo, si ajustamos las funciones de acumulación con un solo parámetro libre (es decir, fijando el valor de la pendiente en un valor igual a uno), los interceptos de dichas funciones variarán siguiendo una función de Piéron (que denominaremos Función de Sensibilidad) cuyo exponente será igual al de la función promedio de los datos brutos de TR de todos los sujetos, si la distribución de los sujetos es aproximadamente simétrica (véase figura 4.2).

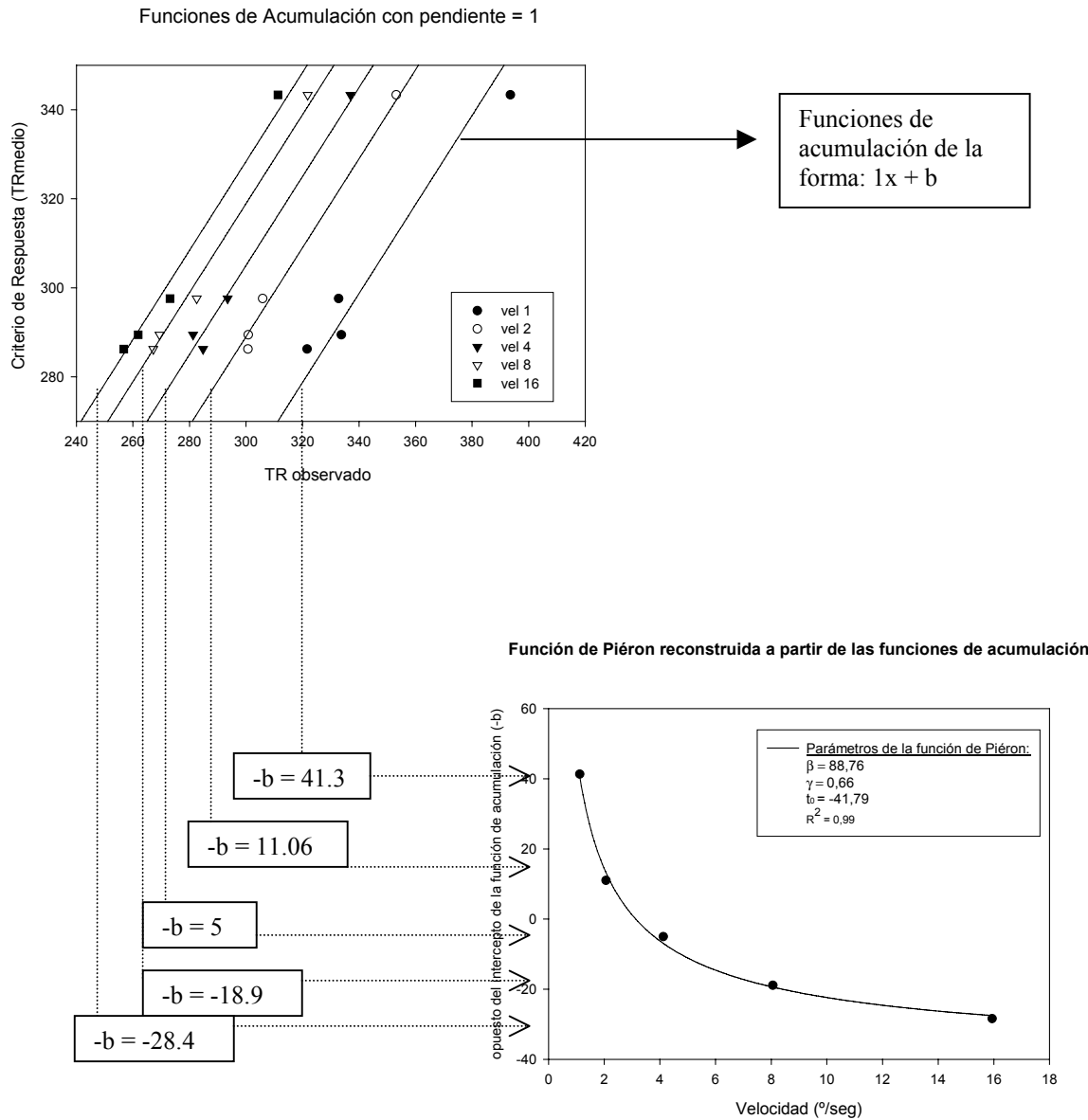


Figura 4.2: Breve esquema del procedimiento para la segunda fase del análisis de los TR. La reconstrucción de la función de Piéron. Siguiendo las asunciones del modelo, las funciones de acumulación deben de tener pendiente igual a uno. Así, los interceptos describen una función de Piéron para la intensidad cuyo exponente (0.66; véase el capítulo 5) representa a la respuesta sensorial de los sujetos a la tarea. La predicción fundamental es que los sujetos cuyos datos permiten el ajuste de una única función de Sensibilidad tienen la misma respuesta sensorial. Por tanto, las diferencias en sus TR responden a los distintos criterios de respuesta de cada uno.

El exponente de la función de Sensibilidad representará un parámetro que señala la respuesta sensorial de los sujetos en la tarea. En este caso, dado que existe un sujeto que presenta tiempos de reacción evidentemente más elevados que el resto (Sujeto S), la función promedio de los sujetos presentará un sesgo en este sentido (producto de las diferencias de criterio entre los sujetos) que no se detectará en la función de Sensibilidad construida a partir de la variación de los interceptos en función de la intensidad del estímulo (figura 4.2).

A fin de considerar los valores de los interceptos de las funciones de acumulación que predice el modelo se ajustan funciones lineales del tipo $f(x) = 1x + b$, es decir, imponiendo el valor de la pendiente a 1. Los coeficientes de ajuste que se obtienen son en todos los casos satisfactorios ($R^2 \geq 0.9$). Con los valores opuestos de los interceptos de dichas funciones se ajusta una función hiperbólica (función de Piéron) tal cual lo muestra la figura 4.2. El exponente de la función de Sensibilidad ($\gamma=0.66$) -reconstruida a partir de los interceptos de las funciones de acumulación- es un indicador preciso de la respuesta sensorial (en este caso, igual para los cuatro sujetos). Además coincide, por un lado, con el valor del exponente de la función de Piéron con los TR promedio de los cuatro sujetos y, por otro, con el valor propuesto por Dzhafarov et al. (1993) para una tarea de detección del inicio del movimiento (véase apartado 5.2.1 para una explicación más detallada de este punto).

En el trabajo de Bonnet y Dresch (2001) se analizan los resultados de un experimento de discriminación de la ubicación de enrejados sinusoidales. Cinco sujetos fueron utilizados para realizar dicho experimento: uno de los sujetos era albino y tenía visión disminuida y fofobia, otro de los sujetos era mayor de edad (63 años) con visión normal y, por último, tres sujetos jóvenes con visión normal (Saleh y Bonnet, 1998). El análisis de los TR realizado a través de las funciones de acumulación pone de manifiesto las diferencias de sensibilidad existentes entre el sujeto albino y los otros cuatro sujetos. Asimismo, resulta muy interesante observar cómo, si bien los TR del sujeto mayor de edad son claramente más elevados que los TR de los sujetos jóvenes, sus datos “caen” en la misma función lineal que se ajusta con los TR de los jóvenes. Esto no es lo que sucede con los TR del sujeto albino que quedan “fuera” de las funciones ajustadas con los datos de TR de los cuatro sujetos con visión normal (figura 4.3).

A partir del modelo aquí esbozado podemos extraer algunas conclusiones sobre el significado de los parámetros de la función de Piéron. Los factores decisionales determinan el criterio de respuesta del sujeto y, por tanto, el valor de la asíntota de la función hiperbólica (función de Piéron) que corresponde al valor de t_0 en la ecuación 4.1 se relaciona con el criterio (aunque también representa un tiempo mínimo que corresponde a las características particulares de cada modalidad sensorial). Asimismo, el detallado análisis de diferentes

resultados experimentales llevado a cabo por Bonnet y Dresp (2001) permite afirmar que el valor absoluto del exponente de la función de Piéron (γ) se encuentra estrechamente relacionado con la respuesta sensorial del sistema ante la tarea, fundamentalmente si consideramos el exponente de la función reconstruida a partir de las funciones de acumulación de varios sujetos⁶⁰. El parámetro β en la ecuación 4.1, resulta en la mayoría de los casos un parámetro de ajuste.

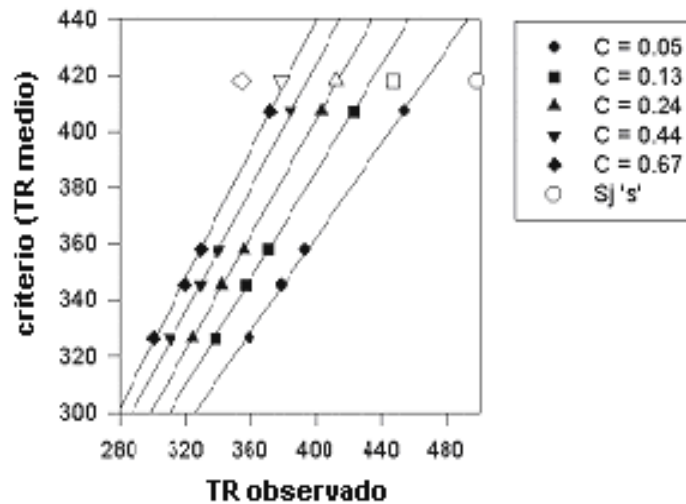


Figura 4.3 (reproducida de Bonnet y Dresp, 2001): Datos de TR para un experimento de discriminación de la ubicación de enrejados sinusoidales. El sujeto “s” es albino y tiene visión disminuida. A juzgar por los resultados de las funciones de acumulación, la respuesta sensorial del sujeto “s” es diferente a la respuesta sensorial del resto de los sujetos.

El modelo descrito permite separar los componentes sensoriales de los cognitivos (decisionales) en los resultados sobre TR. Más allá de que el modelo necesita de mayor desarrollo en cuanto a que se encuentra aún en fase de elaboración y validación empírica de sus predicciones, nos permite suponer que las variaciones inter e intra individuales detectadas habitualmente en los TR, responden fundamentalmente a cambios en el criterio de respuesta y no a variaciones de la sensibilidad. Asimismo, debemos tener en cuenta que todos los sistemas sensoriales o perceptivos utilizan procesos estocásticos para el procesamiento de la información y que, por tanto, la variabilidad es una constante de su funcionamiento. En este sentido, la variabilidad de los TR, tradicionalmente considerada como un problema en el estudio de los TR, resulta más bien – y siempre que podamos conocer su dinámica interna- un elemento relevante para el conocimiento del funcionamiento del sistema (en este caso, sensorial). El modelo propuesto por Bonnet y Link pretende ahondar en el conocimiento de dicha variabilidad.

⁶⁰ En principio y de manera preliminar (pero véase apartado 5.2.3 y 6.2.3), la relación entre el exponente y la sensibilidad determina que cuanto mayor es el valor absoluto del exponente menor es la capacidad discriminativa de la respuesta.

