

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departament d'Òptica i Optometria

Nuevas evidencias sobre la anisotropía del espacio visual y la influencia del entorno en el rendimiento visual

Tesis presentada para obtener el título de Doctora por la Universitat Politècnica de Catalunya

Aurora Torrents Gómez

Departamento de Óptica y Optometría (DOO), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Campus Terrassa, Edif. TR8, C/. Violinista Vellsolà 37, 08222 Terrassa, Spain

Codirectores: Dr. José Antonio Aznar-Casanova (Universitat de Barcelona) y Dra. Núria Lupón i Bas (Universitat Politècnica de Catalunya)

Programa de Doctorado en Ingeniería Óptica
Departamento de Óptica y Optometría, Facultad de Óptica y Optometría

Terrassa, Noviembre de 2011

Nuevas evidencias sobre la anisotropía del espacio visual y la influencia del entorno en el rendimiento visual

RESUMEN

Desde hace años se han realizado múltiples investigaciones que tratan sobre la fiabilidad de la percepción de las distancias en profundidad y la influencia del entorno. En ocasiones, las pistas presentes en el espacio visual entran en conflicto y/o su interpretación conduce a sesgos y errores, produciendo efectos ilusorios al no corresponder las medidas físicas con las percibidas.

El objetivo global de esta tesis doctoral ha sido poner de manifiesto nuevas evidencias de la anisotropía del espacio visual y de la influencia del entorno en relación al juicio de distancias entre objetos. Para ello, se han diseñado y ejecutado tres grupos de experimentos cuyos objetivos parciales fueron:

- Analizar el rol de las disparidades verticales en tareas de juicio de distancias relativas entre objetos situados en diferentes planos de profundidad, en función de la orientación del estímulo.
- Determinar la influencia del fondo y de la orientación del estímulo en tareas de juicio de distancias relativas entre objetos, situados en un mismo plano frontoparalelo o en diferentes planos de profundidad.
- Verificar la naturaleza neural de la anisotropía del espacio visual desde un enfoque psicofísico no invasivo mediante el uso de SIRDS.

Los resultados obtenidos en esta tesis contribuyen a la comprensión sobre la integración de claves en Visión Binocular y los sesgos visuales perceptivos en la percepción de distancias.

ABSTRACT

Recent decades have witnessed multiple studies investigating the accuracy of our visual system in depth perception, as well as the influence of environmental factors during depth judgment tasks. It is not uncommon for Virtual Space cues to offer contradictory or conflicting information, thus leading to bias and error, which in turn originate illusory effects resulting from discrepancies between real and perceived dimensions.

Our research in the integration of cues in Binocular Vision aimed at determining the influence of background characteristics (curved, flat, etc) on the perception of visual stimuli presented over it. Therefore, three different experimental settings were designed and conducted, with partial objectives defined as follows:

- To evaluate the influence of vertical disparities in depth judgment tasks when stimuli were located at different depth planes and presented different orientations.
- To determine the influence of background configuration and stimulus orientation on depth judgment tasks, both with stimuli at the same frontoparallel plane or at different depth planes.
- To evidence the neural origin of the Visual Space anisotropy from a non invasive psychophysical approach with the use of SIRDS.

The findings of the present PhD thesis contribute to our understanding of the integration of cues in Binocular Vision, as well as of the nature of visual bias in depth perception.

"Lo maravilloso de aprender algo es que nadie puede arrebatárnoslo"

B.B. King

A les meves filles

Agradecimientos

Ha arribat el moment d'escriure els agraïments de la tesi i, com ja esperava, no em resultarà fàcil. Em vénen al cap molts noms de persones que han de sortir a la primera línia i sense les quals aquest treball no hauria estat possible. Així doncs, començo disculpant-me per si l'ordre no és el més adient o per si em descuido algú.

Vull expressar la meva sincera gratitud al meu codirector de tesi, Antonio Aznar, per la confiança que va dipositar en mi i la seva dedicació i paciència en tot moment. L'Antonio, a distància, sempre m'ha aconsellat, inspirat i animat i jo he après molt al seu costat. També vull agrair a la meva codirectora de tesi, Núria Lupón, els seus assenyats consells i la seva empenta quan les meves energies ja flaquejaven. Però, especialment, agraeixo la seva AMISTAT perquè, en més d'una ocasió, m'ha demostrat que puc comptar amb ella.

No trobo les paraules adients per agrair al Miquel Ralló l'assessorament estadístic que sempre, i de forma immediata, clara i generosa, he rebut per part seva. Miquel, tinc un deute de gratitud amb tu que difícilment podré amortitzar.

És un luxe compartir despatx amb dues persones tan intel·ligents com en José Luis Álvarez i la Montse Tàpias. Portem més de vint anys junts i sempre m'han ajudat en TOT el que els he demanat. Això no té preu. Gràcies als dos per les estones compartides de riure, de frustració i de complicitat. Més concretament, agraeixo a en José Luis la seva participació en tots els experiments de la tesi amb una bona predisposició increïble (a sobre, ho ha fet tan i tan bé que s'ha guanyat el títol d'observador patró del Departament!). I aprecio l'inestimable ajut que la Montse em va proporcionar amb el càlcul de les disparitats verticals. Si no fos per ella, jo sola no me n'hagués sortit.

Al Jaume Pujol li agraeixo l'impuls que, ja fa molts anys, em va donar per finalitzar els estudis de Psicologia en un moment en què no pensava fer-ho, i els ànims que sempre m'ha transmès quan hem parlat sobre la tesi.

Vull agrair també a en Genís Cardona la seva valuosa aportació en la redacció dels articles relacionats amb aquesta tesi, així com el seu impagable sentit de l'humor.

Expresso la meva gratitud “infinita” als subjectes experimentals de la meva tesi. Cal dir que els experiments eren llargs i feixucs, pel que tots ells han hagut de passar moltes hores amb mi a la sala negra. Així doncs, apart dels que ja he citat, gràcies a Montse Aguirre, Lluïsa Quevedo, Rosa Borràs, Nina Piris, Gemma Costea, Alba Rodríguez, Joan Gispets, Núria Vila, Joan Carles Ondategui, Joan Antoni Martínez, Núria Tomàs, David Castañer, Francesc Torrents, Siscu Torrents, Josep Maria Llaquet i Carme Blasi a qui, a més, he d’agrair el seu ajut com a conillet d’índies en llargues sessions de proves per ajustar estímuls i aparells, sempre amb bona cara.

Al Juan Minguenza i a en Xavi Múrcia, gràcies pel seu suport logístic en la construcció dels prototips dels aparells de Howard Dolman.

A tots els amics i companys de feina que, en algun moment, m’heu demanat com anava la tesi, gràcies pel vostre interès.

Sense el suport del meu marit Josep Maria, aquesta tesi no s’hauria acabat encara. M’ha donat totes les facilitats que ha pogut, fent-se càrrec de les nostres filles i endolcint amb serenor la meva crispació.

Agraeixo als meus pares, Francesc i Aurora[†] la seva educació en la cultura de l’esforç i haver-me ensenyat que res no és gratis. I al meu germà Siscu, el seu afecte immens i el seu exemple d’optimisme i vitalitat.

I, finalment, gràcies a les meves filletes Judit i Emma per ser tan bones nenes i haver-me facilitat tant les coses. En molts moments, no han rebut tota l’atenció per part meva que mereixen (són molt petites) i, per això, els dedico aquesta tesi.

1. <i>Introducción, objetivos y estructura de la tesis</i>	1
2. <i>Antecedentes generales</i>	5
2.1 Fundamentos teóricos de visión binocular	7
2.1.1. Dirección visual. Puntos correspondientes	7
2.1.2. Disparidad binocular	8
2.1.3. Estereopsis	12
2.2. Procesamiento de la información visual	13
2.3. Espacio físico y espacio visual	19
2.4. Fundamentos metodológicos de la visión binocular: Psicofísica	21
2.4.1. La Psicofísica clásica. La función psicométrica	21
2.4.2. La Psicofísica de Stevens	25
3. <i>El rol de las disparidades verticales en el juicio de distancias en profundidad</i>	27
3.1. Introducción	29
3.1.1. El efecto oblicuo	29
3.1.2. La disparidad vertical en relación a los juicios de profundidad	31
3.2. Objetivo	33
3.3. Metodología	35
3.3.1. Participantes	35
3.3.2. Estímulos y aparatos	35
3.3.3. Procedimiento	38
3.3.4. Análisis de datos	39
3.4. Resultados	41
3.5. Discusión	49
4. <i>Influencia del fondo y de la orientación en tareas de alineamiento y en la percepción de profundidad</i>	51
4.1. Introducción	53
4.1.1. Influencia del entorno en las tareas visuales	53
4.1.2. Experimentación en entornos virtuales versus reales	56

4.2. Objetivos	59
4.3. Influencia del fondo y de la orientación en el rendimiento visual de juicios de distancias relativas realizados en un entorno virtual	61
4.3.1. Metodología	61
4.3.1.1. Sujetos	61
4.3.1.2. Estímulos y aparatos	61
4.3.1.3. Procedimiento	67
4.3.1.4. Análisis de datos	68
4.3.2. Resultados	68
4.3.2.1. Análisis de la exactitud	68
4.3.2.2. Análisis de la precisión	71
4.3.3. Discusión	79
4.4. Influencia del fondo y de la orientación en el rendimiento visual de juicios de distancias relativas realizados en un entorno real	83
4.4.1. Metodología	83
4.4.1.1. Sujetos	83
4.4.1.2. Estímulos y aparatos	83
4.4.1.3. Procedimiento	87
4.4.1.4. Análisis de datos	88
4.4.2. Resultados	89
4.4.2.1. Análisis de la exactitud	89
4.4.2.2. Análisis de la precisión	93
4.4.3. Discusión	100
4.5. Discusión general	103
5. Origen de las anisotropías del espacio visual desde un enfoque psicofísico	107
5.1. Introducción	109
5.1.1. La anisotropía vertical-horizontal	109
5.1.2. Autoestereogramas de puntos aleatorios SIRDS	110
5.2. Objetivos	117
5.3. Metodología	119
5.3.1. Participantes	119
5.3.2. Estímulos y aparatos	119
5.3.3. Procedimiento	122
5.3.4. Análisis de datos	123
5.4. Resultados	125
5.4.1. Análisis de la exactitud	125
5.4.2. Análisis de la precisión	126
5.5. Discusión	129

<i>6. Conclusiones finales y trabajos futuros</i>	131
6.1. Juicios de distancia entre objetos situados en distintos planos frontoparalelos	131
6.1.1. Influencia de la orientación	132
6.1.2. Influencia del fondo	133
6.2. Juicios de distancia entre objetos situados en el mismo plano frontoparalelo	134
6.2.1. Influencia de la orientación	134
6.2.2. Influencia del fondo	134
6.3. Comparación de juicios de distancias entre objetos situados en un mismo plano respecto a juicios de distancias entre objetos situados en distintos planos	135
6.4. Comparación de juicios de distancias entre objetos realizados en un entorno virtual y en un entorno real	136
6.5. Trabajos futuros	136
<i>7. Referencias bibliográficas</i>	139

1. Introducción, objetivos y estructura de la tesis

La visión es el sentido dominante del ser humano. A través de él obtenemos la mayor parte de la información del mundo que nos rodea, como colores, texturas, detalles de los objetos o distancias relativas en una escena. Las personas y la mayoría de animales poseemos dos ojos, lo que aporta numerosas ventajas respecto a la visión monocular si ambos actúan de forma coordinada. Las más relevantes son, por ejemplo, la conservación de la visión en el caso que uno de los ojos pierda sus funciones, el aumento del campo visual que se obtiene cuando trabajan ambos simultáneamente y, además, una mejora funcional en la percepción de posiciones y distancias relativas a las que se hallan los estímulos en nuestro campo visual. Aunque con un solo ojo es posible tener una aceptable precisión en la percepción del entorno, la calidad es mayor si ambos ojos trabajan coordinadamente.

Es decir, para poder desempeñar eficazmente todas sus funciones, es necesario que el sistema visual sea capaz de alcanzar una buena *Visión Binocular*, definida como la integración en una percepción única de la sensación producida por los estímulos luminosos que llegan a cada ojo. Esta tarea requiere una organización muy coordinada de aspectos sensoriales, cognitivos y motores que empieza en los ojos y culmina en el cerebro.

Concretamente, para que exista Visión Binocular se deben verificar cuatro condiciones básicas (Howard y Rogers, 2002): la primera es que los dos campos visuales monoculares deben solaparse en una región suficientemente amplia para obtener un campo binocular extenso, la segunda exige que los ojos se muevan de forma coordinada para que los ejes visuales se crucen sobre un mismo punto de fijación, la tercera condición requiere que las imágenes de ambas retinas se transmitan a regiones asociadas de la corteza visual y, finalmente, es necesario que el cerebro fusione ambas imágenes neuronales para obtener una representación única.

Cuando, además de cumplirse las condiciones citadas se consigue la percepción en tres dimensiones, se dice que la persona posee *estereopsis*, definida como una mejora cualitativa y cuantitativa en la percepción de profundidades y distancias relativas entre objetos del campo visual. Así, tener visión binocular es una condición necesaria para la estereopsis, pero no suficiente.

Desde hace muchos años se han realizado múltiples investigaciones que tratan sobre la fiabilidad de la percepción de las distancias en profundidad. ¿Cómo se codifica la percepción tridimensional del mundo a partir de dos imágenes retinianas planas? Para realizar esta función, es necesario que diversas claves y pistas (algunas monoculares y otras binoculares) se integren para reconstruir en el cerebro un modelo del mundo físico, al cual nos referiremos como Espacio Visual. Estas claves y pistas pueden entenderse como soluciones adaptativas para reconstruir de la mejor manera posible

las relaciones espaciales existentes en él (Riener y Proffitt, 2002). En ocasiones, las diversas pistas presentes en el espacio visual entran en conflicto y/o su interpretación conduce a sesgos y errores en la reconstrucción del mundo tridimensional, produciéndose efectos ilusorios al no corresponderse las medidas físicas con las percibidas.

En este sentido, es ampliamente conocida la influencia de la orientación del estímulo visual en relación a la percepción del mismo. El “efecto oblicuo” (Appelle, 1972), extensamente documentado, describe cómo los observadores obtienen un rendimiento superior en un amplio abanico de tareas visuales cuando los estímulos están alineados en orientaciones cardinales que cuando están orientados oblicuamente. La causa de este efecto no ha sido explicada completamente todavía, ni desde el enfoque psicofísico ni desde el neurofisiológico.

Otro efecto perceptual relativo a la orientación del estímulo es la Anisotropía Vertical-Horizontal, también conocida como la Ilusión Vertical-Horizontal (IVH), según la cual la longitud de líneas orientadas verticalmente es a menudo sobrestimada respecto a la de líneas horizontales de la misma longitud (Avery y Day, 1969).

En este trabajo doctoral se aportan nuevos datos sobre ambos efectos perceptuales, para una mejor comprensión de los mismos.

La percepción visual ha sido explicada históricamente según múltiples enfoques teóricos (Rock, 1985). Uno de ellos es el denominado “reduccionismo biológico”, basado en que cualquier aspecto de la sensación del observador se acompaña de un proceso fisiológico correspondiente. El enfoque de la “percepción directa” postula que toda la información necesaria para formar la percepción se halla en los estímulos que llegan a nuestros receptores. Dentro de esta corriente se hallan los psicólogos de la Gestalt, como el psicólogo americano J.J. Gibson, quien fue uno de los especialistas en percepción visual más relevantes del siglo XX. El “enfoque computacional”, cuyo máximo representante fue David Marr, describe el proceso de interpretación a partir de cálculos y diversas etapas de análisis en la percepción. Sin embargo, un enfoque más antiguo y aún activo es el de la “percepción inteligente”, donde se supone que, además de la información disponible para los órganos sensoriales, podemos usar la información de la experiencia previa o de las expectativas. Irvin Rock es uno de sus más conocidos seguidores.

En el panorama actual existe un cierto eclecticismo teórico en el que se incorporan rasgos de todas las corrientes, de modo que muchos autores reconocen el papel de la experiencia pasada en la percepción, el rol de la organización y de efectos configurativos no reducibles a la suma de las partes y, naturalmente, el necesario papel de la información contenida en el estímulo (Coren, Ward y Enns, 2001; Goldstein, 2006).

Respecto a la influencia del entorno en la percepción visual, el matemático, físico y astrónomo Alhazén (965-1040) propuso, hace ya un milenio, que la percepción de la distancia a la que se hallan los objetos depende de la relación entre dicho objeto y el fondo sobre el que se observa. Más recientemente, Gibson (1904-1979) enfatizó en

sus numerosos y referenciados trabajos el rol del “entorno” en el que se desarrollan las tareas visuales. Describía el *entorno* como un conjunto de superficies situado a diferentes distancias y con diferentes inclinaciones. Tales superficies pueden contener elementos de textura, como granos de arena, ladrillos o briznas de hierba, que no son idénticos pero presentan una regularidad en su distribución espacial, o bien objetos dispersos fijos (como un árbol) o en movimiento (como un pájaro).

En cualquier caso, es indiscutible que la influencia del entorno es capital a la hora de juzgar distancias y profundidades entre objetos situados dentro del campo visual, y que el alcance de dicha influencia ha sido, y sigue siendo, objeto de numerosos trabajos científicos realizados tanto en entornos naturales como en condiciones de laboratorio. El nombre genérico que suele utilizarse para referirse a este campo de estudio es el de “integración de claves en Visión Binocular” (cue integration) y el de “sesgos e ilusiones visuales perceptivas” (bias error). Es precisamente dentro de este campo teórico donde se enmarcan los trabajos que han dado lugar a esta tesis.

La motivación principal que nos condujo a trabajar en la integración de pistas en Visión Binocular surgió al intentar responder la cuestión sobre de qué modo influyen, en la percepción del espacio visual, las características del fondo (curvado, plano, etc.) sobre el que se realizan tareas perceptivas. Tras la lectura de diversos trabajos de la literatura científica relacionados con este aspecto, pensamos que podíamos aportar algunas ideas nuevas estudiando el rol del fondo al realizar juicios de distancias relativas entre objetos.

En definitiva, el objetivo global de esta tesis doctoral, desarrollada dentro del programa de Doctorado en Ingeniería Óptica del Departamento de Óptica y Optometría de la Universitat Politècnica de Catalunya, es el de poner de manifiesto nuevas evidencias de la influencia del fondo y de la anisotropía del espacio visual en relación al juicio de distancias entre objetos, desde el punto de vista perceptual y, en menor medida, también neurofisiológico.

Todo ello se concreta en el diseño y ejecución de tres grupos de experimentos para dar respuesta a los objetivos de este trabajo doctoral:

1. Analizar el rol de las disparidades verticales en tareas de juicio de distancias relativas entre objetos situados en distintos planos de profundidad (3D), en función de la orientación del estímulo.
2. Determinar la influencia del fondo y de la orientación del estímulo en tareas de juicio de distancias relativas entre objetos situados en un mismo plano (2D) o en distintos planos de profundidad (3D).
3. Localizar el lugar de la ruta visual donde se originan de las anisotropías del espacio visual desde un enfoque psicofísico no invasivo.

La tesis se estructura en siete capítulos.

Esta introducción constituye el primero de ellos. A continuación, el capítulo 2 (antecedentes generales) resume algunos conocimientos relacionados con la Visión Binocular, el procesamiento de la información visual y la Psicofísica.

Los capítulos 3, 4 y 5 describen los tres grupos de experimentos diseñados para conseguir los objetivos del trabajo doctoral. Cada uno de estos capítulos presenta una introducción donde figura una revisión de la literatura científica sobre investigaciones y trabajos publicados en relación con los del experimento, la metodología utilizada (participantes, estímulos y aparatos, procedimiento, análisis de datos), los resultados y la discusión.

El capítulo 6 describe las principales aportaciones y conclusiones obtenidas en los tres bloques de experimentos y, finalmente, el capítulo 7 presenta la lista de las referencias bibliográficas mencionadas a lo largo de la memoria, para facilitar su consulta.

2. Antecedentes generales

Este capítulo expone cuestiones diversas con el objetivo de establecer el marco en el que se encuadra nuestro trabajo y de introducir aquellos conceptos teóricos a los que se va a hacer referencia, directa o indirectamente, a lo largo de los capítulos posteriores.

El capítulo consta de cuatro partes. En la primera de ellas se presenta un resumen de conceptos básicos relacionados con la visión binocular; la segunda parte trata resumidamente sobre el procesamiento de la información visual; en tercer lugar, se abordan las diferencias existentes entre el espacio físico y el espacio visual y, finalmente, en la cuarta parte se exponen conceptos básicos sobre Psicofísica y el análisis de datos que se realizará en los experimentos que componen esta tesis.

2.1. Fundamentos teóricos de visión binocular

El estudio de la observación binocular de una escena se realiza a partir de una serie de conceptos y parámetros. En este capítulo queremos destacar los siguientes:

2.1.1. Dirección visual. Puntos correspondientes

Una de las misiones más relevantes de la visión es el de obtener información suficiente para tener un correcto *sentido espacial* o, lo que es lo mismo, un correcto *sentido de la posición*. Esta facultad es la que permite *localizar* cada uno de los puntos objeto del espacio en relación a uno mismo o respecto a otros puntos del espacio. Las tareas básicas en la percepción del espacio son la *orientación* del observador hacia un determinado punto de fijación y, por otra parte, la *localización* de los objetos que se encuentran dentro del campo visual del observador. La *orientación* establece un sistema de referencia respecto el cual el observador asigna la dirección y la posición de los objetos que le rodean.

Un sistema EGOCÉNTRICO de referencia es aquel que toma como origen al propio sujeto para determinar relaciones espaciales entre observador y entorno. Un sistema EXOCÉNTRICO de referencia define distancias relativas entre objetos del campo visual. Este sistema de localización cambia cada vez que varía el punto de fijación y su principal ventaja es que la precisión en el posicionamiento es mejor que la del sistema egocéntrico (Aznar-Casanova, Matsushima, Da Silva, J. A. y Ribeiro-Filho, 2008; Santillán, Marques y da Silva, 2011) (figura 2.1).



Figura 2.1. (a) Sistema egocéntrico de referencia (www.economia.unam.mx, última consulta 15/04/2011). (b) Sistema exocéntrico de referencia (www.intereconomia.com, última consulta 15/04/2011)

La localización de direcciones visuales de forma monocular se realiza a partir de la imagen retiniana. El mapa que se forma en la retina es una representación punto a punto del campo visual. De este modo, en función del fotorreceptor sobre el que se

forma la imagen, el sistema visual asocia a cada punto del campo visual una dirección espacial concreta según las leyes de la óptica geométrica. Este fenómeno es denominado *signo local*.

Desde el punto de vista binocular, la percepción de direcciones visuales debe estar definida por la aparición de dos signos locales, uno en cada ojo, que el sistema visual unirá posteriormente para proporcionar una única percepción. Para ello, el sistema visual utiliza un sistema en el que cada retina está mapeada y existe una correspondencia, de modo que cada punto de la retina derecha (asociado a una dirección visual concreta) tiene un punto homólogo en la retina izquierda (con la misma dirección visual asociada). A esta pareja de puntos se les denomina *puntos retinianos correspondientes* (o simplemente *puntos correspondientes*). Así, si la percepción de un punto en el espacio es haplópica (única), se debe a que sus imágenes retinianas están conectadas a lo largo de las vías neuronales visuales y se interpreta que las dos proyecciones monoculares coinciden en el mismo punto. Se define entonces la *correspondencia retiniana* como la relación entre puntos retinianos que, al ser estimulados simultáneamente, dan lugar a una percepción haplópica.

2.1.2. Disparidad binocular

Para describir los conceptos que vienen a continuación, el sistema de referencia utilizado es el indicado en la figura 2.2, donde la nomenclatura de los ejes es: eje transversal (x), eje vertical (y) y eje sagital (z). Este sistema de ejes tiene como origen de coordenadas el centro de proyección del ojo que, en función de los autores, puede ser el punto nodal del ojo o el centro pupilar.

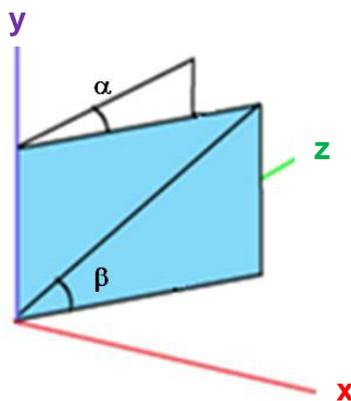


Figura 2.2. Sistema de referencia utilizado para definir los ejes y planos

Un *plano azimutal* es cualquier plano que contiene el eje vertical y, mientras que el *plano azimutal cero* es el plano azimutal que contiene el eje visual en posición primaria de mirada (posición del ojo cuando la línea de mirada es perpendicular al plano frontal de la cara, estando ambos meridianos verticales de las córneas paralelos al plano medio de la cabeza).

Por otra parte, se define el *plano frontoparalelo* como el plano paralelo a la sección frontal del individuo (figura 2.3) que contiene el punto de fijación.

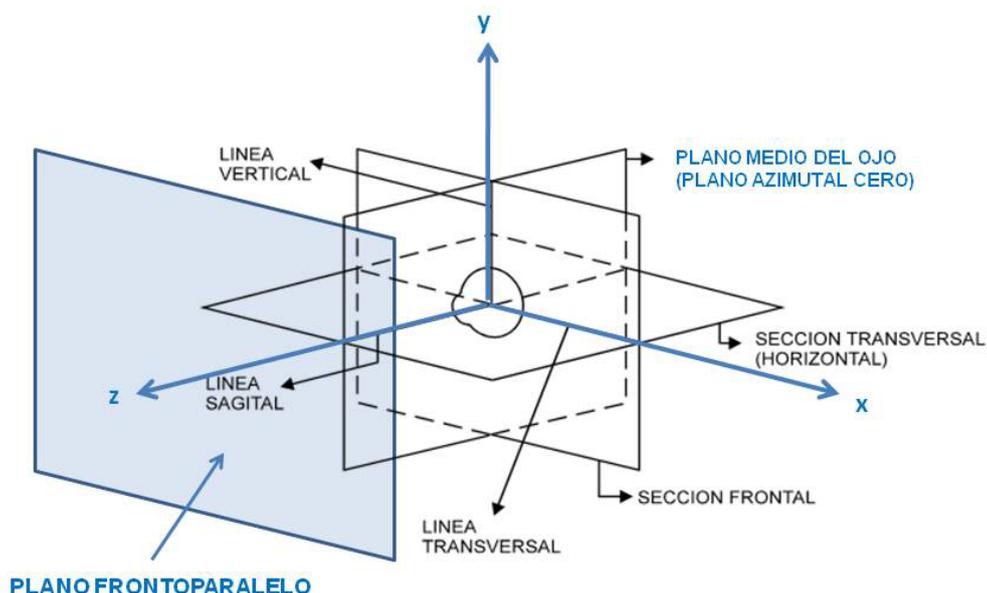


Figura 2.3. Nomenclatura de los planos y secciones del ojo

Para definir la dirección de un estímulo P en el espacio se especificarán 2 ángulos según el siguiente criterio:

- *Ángulo azimutal (α):* es el formado entre el plano azimutal cero y el plano azimutal que contiene el punto P.
- *Ángulo de elevación (β):* se mide sobre el plano azimutal que contiene el punto P. Es el formado entre el plano transversal (contiene los ejes x,z) y la recta que une el origen de coordenadas con el punto P.

En la figura 2.4, P_1 es el punto de fijación y P_2 es otro punto del campo visual. Se define la *disparidad binocular horizontal absoluta* como la diferencia de ángulos azimutales absolutos para un punto dado. En este caso, sería $\phi_1 = \alpha_{1I} - \alpha_{1D}$ para el punto P_1 y $\phi_2 = \alpha_{2I} - \alpha_{2D}$ para P_2 . Por otra parte, la *disparidad binocular horizontal relativa* o simplemente *disparidad binocular horizontal DBH* se define como la diferencia entre las disparidades horizontales absolutas de cada punto:

$$DBH = \phi_2 - \phi_1$$

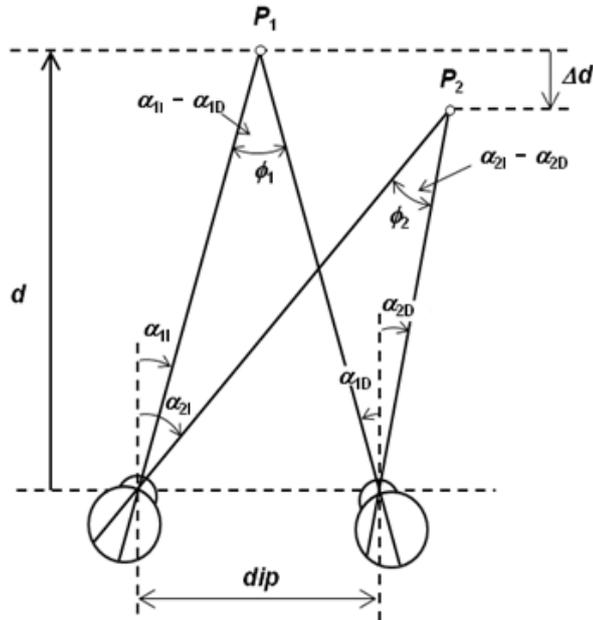


Figura 2.4. Disparidad binocular horizontal DBH entre dos puntos P_1 y P_2 . DIP es la distancia interpupilar

La DBH indica, por tanto, la diferencia en posición entre dos proyecciones retinianas de un punto en el espacio. A partir de la figura 2.4 es fácil deducir de la geometría de la escena, dado que d^2 es mucho mayor normalmente que Δd , una nueva expresión de la DBH que proporciona el resultado en radianes:

$$DBH(rad) \approx \frac{DIP \cdot \Delta d}{d^2}$$

Sin embargo, la DBH normalmente se expresa en minutos o en segundos de arco.

Puesto que la retina es bidimensional, la disparidad tiene dos componentes independientes: horizontal y vertical.

Análogamente, por tanto, se define la *disparidad binocular vertical* DBV como la diferencia entre los ángulos de elevación formados por dos puntos P_1 y P_2 , medidos separadamente en cada ojo. La figura 2.5 muestra cómo surge la disparidad vertical al observar dos objetos situados a diferente altura: el punto de fijación (P_1) y otro punto cualquiera P_2 . En cada retina aparece marcado un sistema de coordenadas centrado en la fovea. El plano de color rosa contiene las líneas que unen el punto de fijación P_1 con cada fovea. Los rayos azul y rojo muestran las proyecciones en la retina de P_2 . Comparando las posiciones en que tales rayos cruzan en cada retina, es evidente que el objeto se proyecta más abajo en la retina del ojo derecho que en la del izquierdo, lo que causa la disparidad vertical.

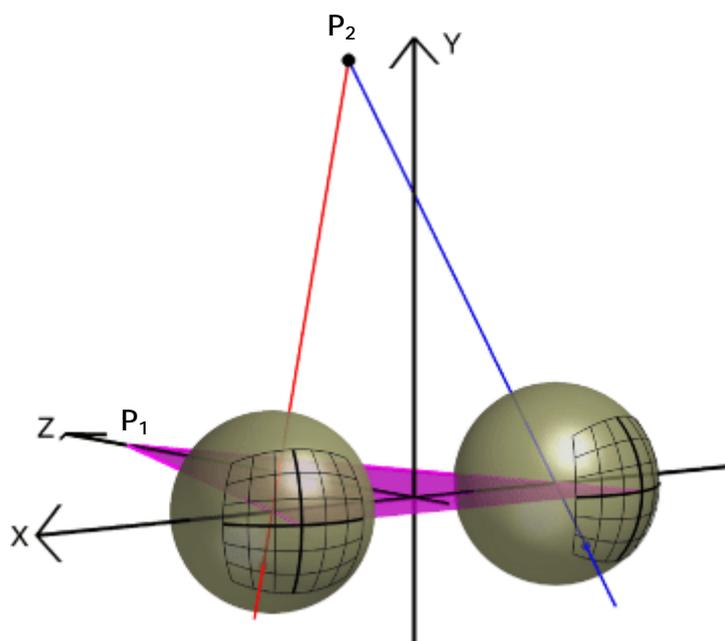


Figura 2.5. Disparidad vertical provocada por dos puntos situados a diferente altura, P_1 y P_2 (<http://calendar.arvo.org/10/3/2/article.aspx>, última consulta 1/6/2011)

Aunque el grado en el que el sistema visual puede fusionar imágenes que no se encuentran en puntos retinianos correspondientes depende de varios factores, diversos autores reportan que, en la fóvea, el área en la que sí es posible la fusión tiene forma de óvalo horizontal, cuyo tamaño oscila entre los 9 y los 26 minutos de arco en horizontal y entre los 6 y 7.5 minutos de arco en el eje vertical (Pons y Martínez-Verdú, 2004). Así pues, el sistema visual tolera una mayor disparidad horizontal que disparidad vertical, y ello es debido a la distancia interpupilar.

En 1838, Wheatstone fue el primero en demostrar empíricamente que la DBH está relacionada con la sensación de profundidad y, por lo tanto, con la visión en tres dimensiones. Inventó el *estereoscopio*, instrumento que permite estimular el ojo izquierdo y el derecho de manera independiente. A este tipo de estimulación se la denomina *dicóptica*. Wheatstone demostró que una ligera diferencia en las posiciones de las imágenes correspondientes al ojo izquierdo y al derecho producía una fuerte sensación de profundidad.

La DBH es la que tiene un peso mayor en la visión tridimensional aunque, como se tratará en el capítulo 3, la componente de disparidad vertical también influye en la percepción de profundidad.

2.1.3. Estereopsis

La DBH está en la base de la *estereopsis*, grado superior de la visión binocular, definida como la percepción de distancias relativas en profundidad entre objetos basada en la DBH. La agudeza visual estereoscópica (AVE) es la mínima disparidad binocular que da lugar a una sensación de profundidad, es decir, el mínimo umbral de discriminación de profundidad expresado angularmente. Si dos objetos se hallan a las distancias d y $d+\Delta d$ del observador, la AVE se calcula como:

$$AVE = DBH \text{ mínima} = DIP \cdot \frac{\Delta d \text{ mínima}}{d^2}$$

donde DIP es la distancia interpupilar. Esta expresión, coincidente con la de la DBH, proporciona un resultado en radianes.

En general, la mayoría de los estudios reportan valores de AVE de la población entre los 2 y 6 segundos de arco en condiciones óptimas de observación. Existen diversos sistemas para la medida de la AVE, siendo el más preciso el aparato de Howard Dolman, una adaptación del cual será utilizada en este trabajo doctoral. El aparato de Howard Dolman consiste en dos varillas verticales del mismo diámetro, separadas una distancia fija y que se observan a una distancia determinada a través de una apertura horizontal que evita ver el inicio y final de las varillas (figura 2.6).

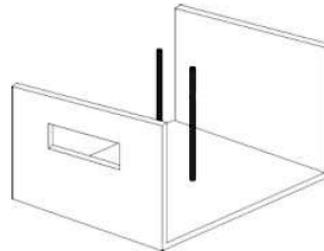


Figura 2.6. Aparato de Howard Dolman

(www.uv.es/~ponsa/docencia/tema11transparencias.pdf, última consulta 2/6/2011)

La tarea del observador consiste en mover una de las dos varillas, manteniendo la otra fija, hasta que ambas parezcan estar alineadas. La mínima diferencia de profundidad existente entre ambas varillas corresponde al valor de estereoagudeza y la disparidad binocular se calcula a partir del ángulo subtendido entre las dos varillas. Este test es el más sencillo y de mayor precisión a la hora de determinar la AVE. Sin embargo, dada la envergadura del montaje mecánico, este aparato no se acostumbra a utilizar en la práctica clínica.

Gracias a la disparidad binocular y a la estereopsis, el sistema visual es capaz de localizar con precisión objetos situados a diferente profundidad en el campo visual.

2.2. Procesamiento de la información visual

El sistema visual de los humanos es la parte del sistema nervioso central que permite a los organismos la construcción de una representación del mundo que los rodea a partir de dos imágenes retinianas (figura 2.7). Resumidamente, está formado por:

- La retina del ojo
- El nervio óptico
- El quiasma óptico
- El núcleo geniculado lateral
- Las radiaciones ópticas
- La corteza visual

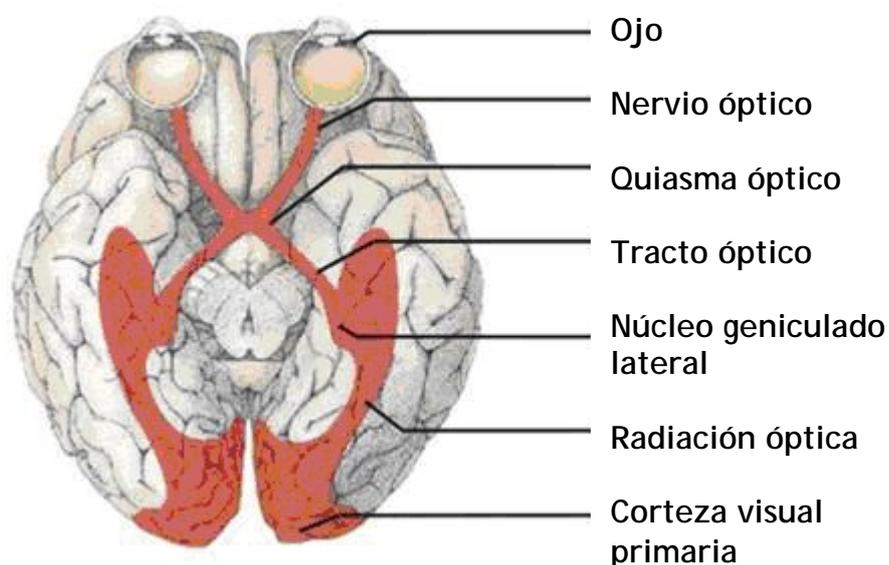


Figura 2.7. Esquema del sistema visual (adaptado de www.cg.tuwien.ac.at, última consulta 20/7/2011)

Los conos y los bastones, células fotorreceptoras de la luz, sinaptan directamente con las células bipolares, las cuales sinaptan a su vez con las células ganglionares. Los axones de estas células conducen los potenciales de acción hacia el cerebro. Se calcula que unos 130 millones de fotorreceptores captan la luz, pero sólo 1.2 millones de células ganglionares conducen la información hacia el cerebro, por lo que cada célula ganglionar recibe información de varias células bipolares a la vez, lo que se conoce como *convergencia*.

En la retina humana existen tres tipos morfológicos de células ganglionares: las ganglionares difusas grandes, las ganglionares difusas pequeñas y las ganglionares enanas. Otros autores simplifican esta clasificación distinguiendo sólo ganglionares pequeñas o "tipo P" y ganglionares grandes o "tipo M". Las células ganglionares

responden a la estimulación de un área visual relativamente grande, lo que conduce al concepto de campo receptivo. El *campo receptivo* de una célula ganglionar es el área de la retina en el que la luz incidente influye sobre los impulsos producidos por tal célula. Estos campos receptivos se dividen en dos áreas concéntricas y antagonistas, que son el centro y la periferia. Las células de tipo ON producen máxima respuesta cuando la luz incide en el centro de su campo receptivo, mientras que las de tipo OFF presentan la máxima tasa de descarga cuando la luz incide en su periferia (figura 2.8).

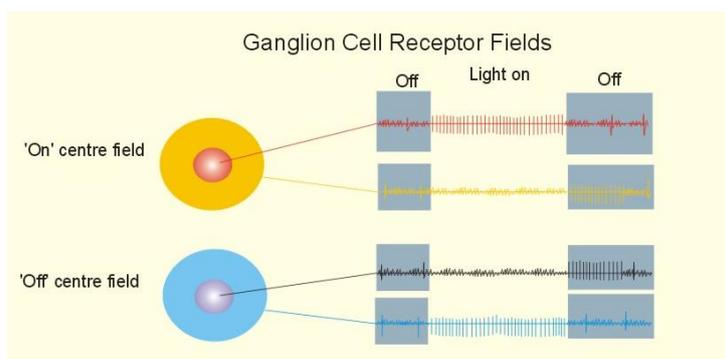


Figura 2.8. Campos receptivos de células ganglionares y respuesta proporcionada (<http://www.zuniv.net/physiology/book/chapter5.html>, última consulta 30/3/2011)

La información sobre la imagen es transmitida al cerebro a través del nervio óptico de cada ojo. Estos nervios se entrecruzan en el quiasma óptico, de modo que la información proveniente de ambos ojos se combina y se separa posteriormente para conseguir la conexión de cada ojo con su hemisferio cerebral homolateral.

Posteriormente, los tractos ópticos (continuación de los nervios ópticos a partir del quiasma) conducen la información hacia los núcleos geniculados laterales (NGL), que son la estación de relevo principal entre la retina y el cerebro. Sus funciones principales son dos: transferir la información visual hacia la corteza visual y filtrar la transmisión de los impulsos hacia la corteza visual, es decir, controlar qué parte se deja pasar. Esta función de relevo presenta una gran precisión durante todo el trayecto, desde la retina hasta la corteza visual (Stidwill y Fletcher, 2011).

Las células ganglionares de tipo M proceden en su mayoría de la retina periférica y se proyectan principalmente en las magnocélulas del NGL, constituyendo el denominado sistema MAGNOCELULAR. En cambio, las ganglionares de tipo P se proyectan en las parvocélulas del NGL y constituyen el sistema PARVOCELULAR. El sistema magnocelular está relacionado con el bosquejo de la imagen y el movimiento, mientras que el sistema parvocelular se relaciona con el detalle y el color.

Los campos receptores de las células del NGL son del mismo tipo que los de las células ganglionares retinianas, aunque las respuestas tipo ON y OFF son más intensas que en la retina, lo que aumenta el efecto de contraste al pasar un punto luminoso de una zona OFF a una ON, por ejemplo. En la década de 1960 Hubel y Wiesel

demonstraron que las neuronas del NGL se comportan prácticamente del mismo modo que las células ganglionares de la retina.

Posteriormente, los axones de las células de los NGL se dirigen a la corteza visual a través de las radiaciones ópticas.

El término Corteza visual o Córtex visual se refiere a la corteza visual primaria (también conocida como corteza estriada o V1) y a las áreas visuales corticales extra estriadas (V2, V3, V4, V5 o MT, V7, V8 y VP) (figura 2.9).

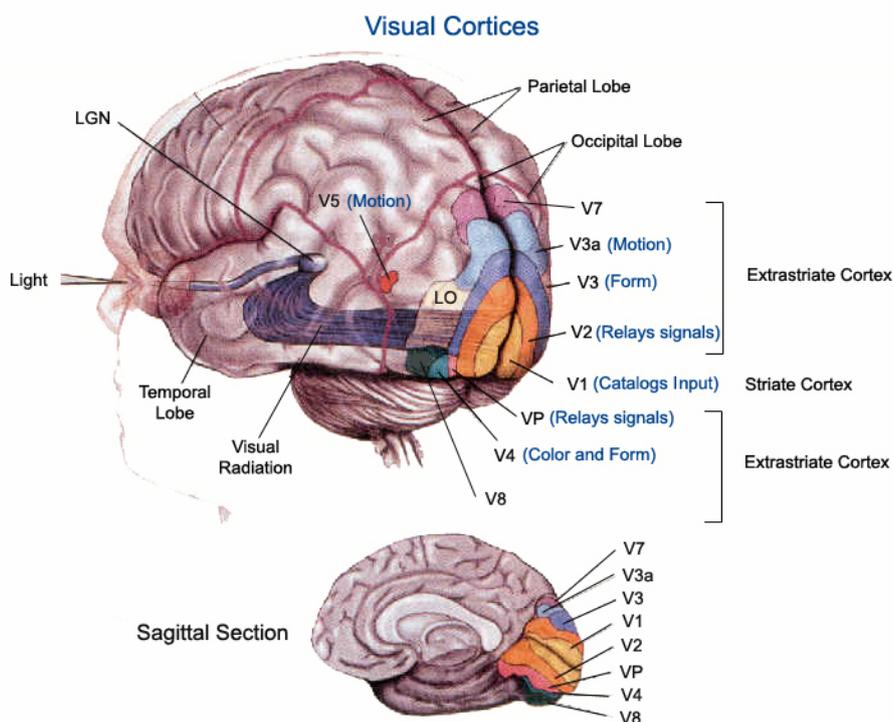


Figura 2.9. Corteza visual humana (adaptado de www.colorado.edu, última consulta 30/3/2011)

La corteza visual primaria V1 se divide en seis capas, numeradas del 1 al 6 (en números árabes o romanos). La capa 4 es la que recibe la mayor entrada de señal visual proveniente de los núcleos geniculados laterales y, a su vez, se divide también en capas etiquetadas como 4A, 4B y 4C (subdividida en 4C α y 4C β).

La proyección topográficamente ordenada de la imagen retiniana se mantiene a lo largo de los nervios ópticos, del quiasma y de los núcleos geniculados laterales hasta llegar al área V1. Este fenómeno se conoce como *organización retinotópica*.

La mayoría de las señales del NGL llegan a la capa 4C de V1. 4C α recibe la mayor parte de la entrada magnocelular proveniente del NGL, lo que se conoce como *vía M* (magnocelular). Los campos receptivos de estas células pierden su forma circular y pasan a ser oblongos. Las células en la capa 4C α se proyectan en las neuronas de la capa 4B que, a menudo, responden a los estímulos de ambos ojos, por lo que es aquí

donde se inicia el proceso de integración necesario para la visión binocular. Las células en la capa 4B también son selectivas a la dirección, pero sólo si el estímulo se mueve en una dirección particular. Por esta razón, el canal M se cree que está especializado en el análisis del movimiento de los objetos.

En resumen, la corteza visual primaria descompone el mundo visual en segmentos de líneas de varias orientaciones, lo que supone un paso inicial para el análisis de la forma y del movimiento. Asimismo, combina la información de ambos ojos (paso inicial para la visión binocular) y realiza el primer paso del análisis cromático.

A continuación, V1 transmite información hacia el resto de la corteza visual a través de dos rutas, denominadas dorsal y ventral, según la teoría de Ungerleider y Mishkin (Stidwill y Fletcher, 2011). La *ruta dorsal* comienza en V1, cruza a través de V2, pasa por V5-MT y llega a la corteza parietal posterior. Esta ruta está involucrada en la atención espacial y se comunica con áreas que controlan los movimientos oculares y de cabeza. Por eso, esta ruta se conoce como “ruta dónde” para enfatizar su rol en los comportamientos que nos guían en la localización espacial. Por otra parte, la *ruta ventral* comienza en V1, atraviesa V2, V4, y finaliza en la corteza temporal inferior. La ruta ventral es llamada a menudo “ruta qué” porque se asocia con el reconocimiento, la identificación y la categorización de los estímulos visuales (figura 2.10).

Existen conexiones “feedforward” entre las distintas zonas de la corteza visual e, igualmente, también se producen fuertes conexiones “feedback” entre ellas, de modo que el resultado del procesamiento en V2 o V3 retrocede hasta V1. Adicionalmente, los NGL reciben muchas conexiones de retroalimentación de la corteza visual primaria.

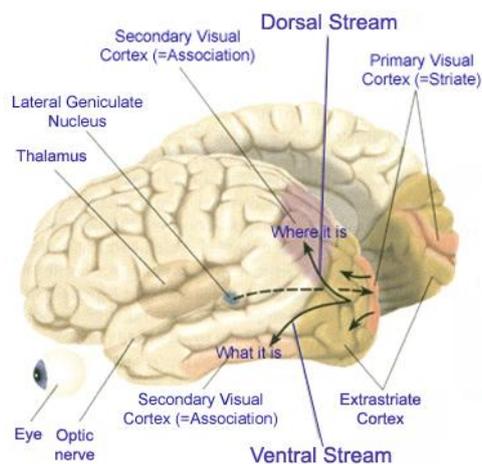


Figura 2.10. Rutas dorsal y ventral de la corteza visual (adaptado de www.colorado.edu, última consulta 30/3/2011)

En relación con la percepción tridimensional, cabe destacar que los inputs procedentes de los dos ojos alcanzan la corteza visual en rutas separadas. Esta segregación se mantiene hasta la capa 4 de V1. Sin embargo, diversos estudios electrofisiológicos (Pettigrew, Nikara y Bishop, 1968; Poggio y Fischer, 1977) han mostrado que la mayoría de células de la corteza visual estriada y preestriada del gato y del mono reciben inputs de ambos ojos, por lo que son *neuronas binoculares*. Ello implica que los inputs procedentes de ambos ojos deben converger en otras capas. Hubel y Wiesel (1968) fueron los primeros en encontrar células sintonizadas a la disparidad binocular en primates en la zona V2.

Las neuronas binoculares responden en función de la disparidad horizontal de las dos imágenes en ambos ojos. Diversos estudios revelan que los campos receptivos derecho e izquierdo de una neurona binocular pueden estar en correspondencia topográfica en ambos ojos o bien tener diferentes posiciones relativas (Poggio, 1991).

La binocularidad cortical es un prerrequisito para la percepción de las pistas estereoscópicas de profundidad puesto que, en condiciones de fijación convergente binocular, diferentes neuronas corticales pueden ser selectivamente activadas por objetos situados a diferente profundidad relativa.

Recientemente, Fang y Grossberg (2009) han propuesto un modelo que explica las interacciones existentes entre V1, V2 y V4 para generar la representación tridimensional final. Por otra parte, diversos autores (Tsao et al, 2003; Tsutsui, Taira y Sakata, 2005; Katsuyama et al, 2011) confirman con sus estudios neurofisiológicos que las áreas V3A, V7, V4 y también el área caudal intraparietal (ACI) juegan un papel importante en la visión estereoscópica y que determinadas áreas de la unión parieto-occipital están especializadas en la estereopsis. De hecho, diversas observaciones clínicas de pérdidas de la visión tridimensional tras lesiones cerebrales sugieren que la corteza parietal es una estructura clave para la percepción 3D y que la vía ventral no puede dar lugar a una visión 3D normal si no es con una corteza parietal intacta. En esta misma línea, Tsutsui, Taira y Sakata (2005) afirman que la mayoría de las neuronas implicadas en el proceso de la detección de disparidad retiniana absoluta (disparidad de bajo nivel) se hallan principalmente en la corteza occipital, mientras que las neuronas implicadas en la detección de gradientes de disparidad (disparidad de alto nivel) se encuentran mayoritariamente en el área caudal intraparietal (ACI) de la corteza parietal.

2.3 Espacio físico y espacio visual

Una cuestión que ha atraído el interés de diversos investigadores ha sido comprobar el ajuste que existe entre el espacio físico (real) y el espacio visual (percibido). Las distancias en el espacio físico son de métrica euclidiana, de modo que las dimensiones de los objetos son constantes con independencia de donde se sitúen, por citar un ejemplo. Sin embargo, el espacio visual no presenta la misma métrica, por lo que una misma distancia o tamaño puede ser sobreestimado o subestimado en función de la posición de los objetos. El estudio de la geometría del espacio visual ha sido, y sigue siendo, un tema de gran interés científico.

Hasta la década de los años 1960 aproximadamente, este campo estuvo dominado por la *conjetura de Luneburg* (Luneburg, 1950), según la cual el espacio visual tiene una geometría riemanniana de curvatura constante. Sin embargo, a pesar de los numerosos intentos realizados para hallar esta curvatura, diversos hallazgos muestran que ésta varía en función de los observadores (Battro, di Pierro y Rozestraten, 1976), de las distancias (Koenderink, van Doorn, Kappers y Lappin, 2002), de las tareas (Koenderink, Van Doorn y Lappin, 2000) y de las condiciones de observación (Wagner, 1985), razones por las que hoy día la conjetura de Luneburg ha quedado desfasada.

Indow y Watanabe (1998) introdujeron una importante variación en este campo al estudiar, además de los tradicionales planos de profundidad, el *plano frontoparalelo*. Los autores concluyeron que el espacio visual en el plano o sección horizontal es hiperbólico, mientras que en el plano frontoparalelo es euclidiano, lo que revela la existencia de una anisotropía en el espacio visual. Por lo tanto, no es posible extrapolar los resultados obtenidos sobre el plano frontoparalelo 2D a un espacio 3D sin más. Las investigaciones realizadas concluyen que el espacio visual se comprime a medida que aumenta la distancia de observación (da Silva, Aznar-Casanova, Ribeiro-Filho y Santillán, 2006; Loomis y Philbeck, 1999).

Finalmente, es interesante tener en cuenta que en la percepción espacial no sólo van a influir las características físicas del entorno, sino también el comportamiento que ese entorno le permita ejecutar al individuo. Por lo tanto, algunos animales (como los primates) son capaces de percibir tanto la composición de su entorno como las oportunidades o competencias que éste le permite ejercer (Sedgwick, 2001).

2.4. Fundamentos metodológicos de la visión binocular: Psicofísica

A continuación se van a describir algunos aspectos relacionados con la Psicofísica y con el análisis de datos realizado en todos los experimentos de este trabajo doctoral, que se expondrán en capítulos posteriores.

2.4.1. La Psicofísica clásica. La función psicométrica

La Psicofísica es la disciplina científica que estudia la conexión entre un estímulo físico y la sensación que éste provoca (Schwartz, 2004). En Psicofísica se utilizan dos paradigmas de investigación: el de *detección* y el de *discriminación*.

En el *paradigma experimental de detección* se presenta un único estímulo y se le pide al sujeto una respuesta binaria (sí/no) respecto a su presencia, para una cierta intensidad estimular dada. Ello permite obtener una aproximación al *umbral absoluto*, concepto propuesto por primera vez en la década de 1820 por Johan Friedrich Herbart, para referirse a la mínima intensidad que un estímulo debe tener para ser perceptible el 50% de las veces que se presenta. Posteriormente, Gustav Fechner desarrolló tres métodos psicofísicos clásicos para calcular dichos umbrales: el método de los límites, el método de ajuste y el método de los estímulos constantes.

- En el *método de los límites*, el experimentador presenta al sujeto los estímulos en orden ascendente o descendente, mientras que el observador responde si percibe o no percibe el estímulo. Por ejemplo, si ante una intensidad del estímulo concreta el sujeto responde que la percibe, el experimentador irá disminuyéndola hasta que no pueda distinguirla. El cambio de “sí” a “no” es el denominado punto de paso, que se toma como valor del umbral. Repitiendo este procedimiento varias veces, comenzando la mitad de las ocasiones por encima y la otra mitad por debajo del umbral, el promedio de todos los puntos de paso es considerado el valor del umbral.
- En el *método de ajuste* el observador ajusta la intensidad del estímulo de manera constante hasta que apenas lo distingue. El procedimiento se repite varias veces y se toma el promedio de los valores como valor umbral.
- Finalmente, el *método de los estímulos constantes* es considerado uno de los más precisos en Psicofísica. En este método, el examinador selecciona un conjunto fijo de valores del estímulo (normalmente, entre 5 y 9) dentro de un rango, de manera que el valor inferior debería hallarse ligeramente por debajo del umbral mientras que el valor superior debería estar ligeramente por encima del umbral (Norton, Corliss y Bailey, 2002). Tras la presentación de cada estímulo, se pregunta al sujeto si ha percibido o no el estímulo y se anotan las respuestas. Cada estímulo es presentado diversas veces en orden

aleatorio al observador, por lo que es posible calcular el porcentaje de ocasiones en las que el sujeto lo ha percibido. El umbral absoluto corresponde, entonces, al valor del estímulo que ha sido percibido el 50% de las veces que se ha presentado.

Por otra parte, en el *paradigma experimental de discriminación*, se presentan dos estímulos y se pide al sujeto una respuesta binaria del tipo “mayor que/menor que” o “igual/diferente” con el objetivo de obtener una aproximación estadística al umbral diferencial o umbral de discriminación, usando una versión adaptada de los tres métodos psicofísicos clásicos propuestos por Fechner. Así, en este caso, la tarea a realizar es discriminar la mínima diferencia entre dos estímulos en un parámetro (intensidad, tono, etc.), donde uno de ellos es el estímulo de referencia y el otro, el de comparación.

Hoy en día, en ambos paradigmas (detección y discriminación), una gran parte de los datos psicofísicos de los experimentos son obtenidos mediante el método de estímulos constantes y acaban transformándose en la denominada *función psicométrica*, que describe la relación entre la magnitud de un estímulo y la probabilidad de que una persona pueda detectarlo o discriminarlo de otro. Para construir esta función se requiere la adquisición de una respuesta binaria del observador (“sí/no” o “mayor que/menor que”) a la percepción de un estímulo. A continuación se explica el proceso de adquisición de datos que permiten la construcción de esta función, en un ejemplo ubicado en el paradigma de detección.

Para determinar el umbral de detección correspondiente a un estímulo, una vez conseguidos los datos experimentales mediante el método de los estímulos constantes, se representa gráficamente el porcentaje de veces que el sujeto ha detectado el estímulo (el porcentaje de respuestas “sí” o “visto”) en el eje de ordenadas, mientras que en el eje de abscisas se sitúa la magnitud física del estímulo (o una normalización de sus valores). Es de esperar que, cuando la magnitud del estímulo sea la menor de todas (subumbral), el sujeto no perciba casi nunca ese estímulo, mientras que si la magnitud es la mayor de todas (supraumbral), el observador pueda distinguirlo la mayoría de veces que le sea presentado. Entre ambos extremos se halla la zona de transición donde el sujeto no siempre responderá correctamente. Esta representación gráfica es la función psicométrica (figura 2.11).

El punto de la función psicométrica donde el porcentaje de detecciones correctas es del 50% se suele tomar como umbral sensorial.

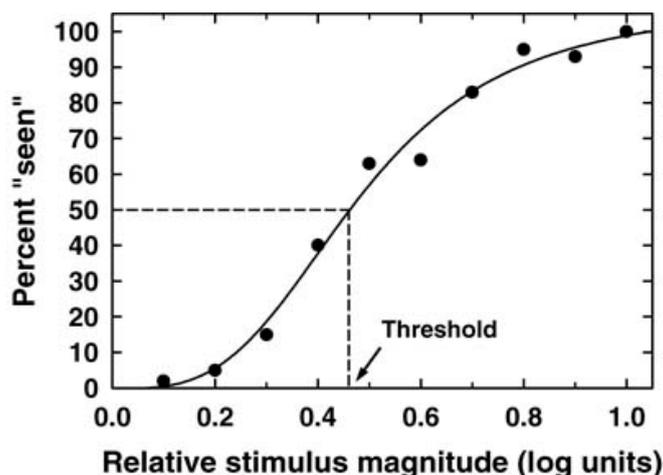


Figura 2.11. Ejemplo de función psicométrica (www.cognet.mit.edu, última consulta 22/6/2011)

La función psicométrica tiene una forma sigmoidea parecida a la de diversas funciones matemáticas conocidas, como la función de Weibull, la función logística o la integral de la distribución normal de probabilidad, también denominada gaussiana acumulativa (figura 2.12), entre otras. Por ello, muchas veces se ajusta la función psicométrica a estas funciones matemáticas conocidas para utilizar el tratamiento matemático asociado a ellas y extraer así parámetros informativos acerca de su forma.

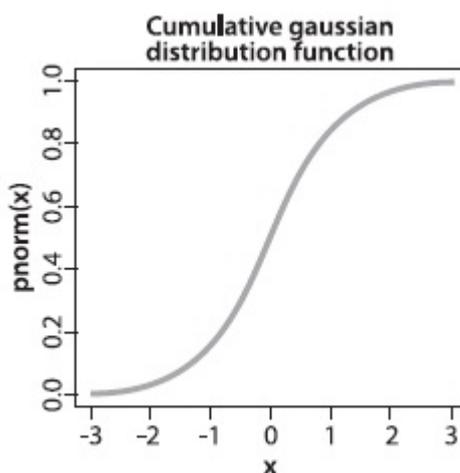


Figura 2.12. Representación gráfica de la función gaussiana acumulativa, que es una de las más utilizadas como función psicométrica

La selección del rango de valores entre los que varía el estímulo (eje x) es de vital importancia en el método de los estímulos constantes ya que, si la tarea resulta demasiado fácil debido a que el intervalo escogido es excesivamente grande, la forma de la función se asemejaría a un escalón. Igualmente, la representación de los resultados en el caso de que la dificultad de la tarea fuese excesiva no se asemejaría a una función psicométrica, sino que sería una recta de poca pendiente. Por ello, es

necesario realizar algunos ensayos previos con el observador para decidir el rango de valores entre los que oscilará el estímulo y que, de este modo, los datos se ajusten a una función psicométrica.

Dentro del paradigma experimental de discriminación para hallar umbrales, una posibilidad para la presentación de los estímulos es el uso del método de la *elección forzada entre dos alternativas*. En este caso, el sujeto observa dos estímulos ligeramente diferentes en una de sus características y la tarea consiste en elegir cuál de los dos estímulos es mayor (o menor), aunque los perciba iguales.

El rendimiento de una tarea psicofísica suele medirse mediante dos parámetros, que son la *exactitud* y la *precisión*. La obtención de su valor está determinada por el proceso experimental de registro de datos, que puede estar diseñado en el marco de distintos paradigmas. Para cada paradigma experimental se debe utilizar el método de análisis de datos más adecuado y tanto la *exactitud* como la *precisión* pueden cuantificarse mediante algunos parámetros de la función psicométrica (Blanco, 1996).

La *exactitud* (accuracy o fidelidad) expresa el grado en que el valor estimado se diferencia del verdadero valor físico; es decir, muestra si existe algún sesgo en la respuesta de los sujetos, ya sea hacia la sobre-estimación o hacia la subestimación del valor. La *precisión*, por otra parte, indica la finura discriminativa o sensibilidad.

Respecto a la *exactitud*, se define el punto de igualdad subjetivo (PIS) como la magnitud del estímulo que se corresponde con el porcentaje del 50% de detección en la función psicométrica; en otras palabras, en experimentos de detección, es la magnitud del umbral absoluto del estímulo. Este punto no tiene por qué coincidir con el punto de igualdad objetivo (PIO) correspondiente al valor medio de todos los estímulos presentados. En el ejemplo ficticio de la figura 2.11, el PIS corresponde a 0.45 unidades logarítmicas (2.82) mientras que el PIO es de 0.5 unidades logarítmicas (3.16). A partir de ambas magnitudes, puede calcularse el error constante (EC) como la diferencia del PIS menos el PIO. Tanto el PIS como el EC son ampliamente utilizados en Psicofísica como indicadores de exactitud. Otro índice que puede utilizarse en lugar del PIS para cuantificar la exactitud es el punto de inflexión de la función psicométrica.

La *precisión* puede ser cuantificada mediante diversos índices. Uno de ellos es la pendiente de la función psicométrica ajustada a una función sigmoidea, o bien la inversa de tal pendiente, parámetro que suele denominarse *dispersión* (spread).

Otro índice es el *umbral diferencial UD*, que se calcula como la semidiferencia intercuartílica; es decir, la mitad de la diferencia entre el percentil 25 y el percentil 75 de la función psicométrica:

$$UD = \frac{P_{75} - P_{25}}{2}$$

Un valor pequeño de UD indica una mejor discriminación entre dos estímulos diferentes por parte del sistema visual.

Finalmente, otro índice para evaluar la precisión es la fracción de Weber (KWeber), calculada como el cociente entre el UD y el PIS.

$$K\text{ Weber} = \frac{UD}{PIS}$$

La Kweber aporta, por tanto, la misma información que el UD pero de forma adimensional (independiente de las unidades de medida de cada escala).

2.4.2. La Psicofísica de Stevens

Uno de los objetivos principales de la Psicofísica es expresar la relación entre estímulos y sensaciones y calcular umbrales absolutos (mínima magnitud que debe presentar un estímulo para que sea detectado) y umbrales diferenciales (mínima diferencia que debe existir entre una misma característica de dos estímulos para que se perciban como diferentes). Sin embargo, en múltiples ocasiones interesa medir las sensaciones de estímulos cuya magnitud física está por encima del umbral. Por ejemplo, al duplicar la intensidad de una luz, ¿se percibirá ésta dos veces más intensa?.

La primera relación matemática que se estableció entre la magnitud del estímulo E y la sensación S que éste provocaba data del siglo XIX fue de tipo logarítmico y se conoce como ley de Weber-Fechner: $S = k \cdot \log E$, donde k es una constante. Sin embargo, a mediados del siglo XX, el psicólogo americano Stanley Smith Stevens realizó múltiples aportaciones en la Psicofísica partiendo de que la relación entre sensación y magnitud del estímulo no es logarítmica, sino potencial: $S = k \cdot E^n$, donde S es la sensación, E es la magnitud del estímulo, k es una constante que depende del observador y de las condiciones experimentales y n es la pendiente de la recta que relaciona $\log S$ versus $\log E$. El valor “ n ” indica el grado de constancia en la sensación percibida, de manera que ésta es función lineal de la magnitud física si $n=1$. Por otra parte, un valor del exponente “ n ” menor a 1 es indicativo de una aceleración negativa o de una subestimación de las magnitud física, mientras que un valor de “ n ” superior a 1 indica aceleración positiva o sobreestimación de la magnitud física. Esta ley es conocida como *ley potencial de Stevens* y ha sido muy utilizada, puesto que diversas sensaciones se ajustan razonablemente bien con la magnitud del estímulo según esta relación matemática. Como ejemplo, para indicar el grado de compresión del espacio se puede utilizar el exponente n de la función potencial: $D' = k \cdot D^n$, donde D' es la distancia juzgada, D es la distancia real y k es la constante. En este caso, el exponente n indica la tasa de compresión de la distancia percibida en relación a la distancia física (Da Silva, Aznar-Casanova, Ribeiro-Filho y Santillán, 2006).

Stevens creó nuevos métodos psicofísicos para realizar experimentos de escalamiento y publicó multitud de trabajos utilizándolos. Son muy conocidos sus experimentos de producción y de estimación de magnitud o de proporción (Stevens, 1986).

En los experimentos de *producción*, el sujeto debe ajustar un estímulo a una proporción o a una magnitud determinada. Por ejemplo, se muestra un estímulo con una luminancia de referencia y se pide al observador que ajuste la claridad de otro estímulo hasta que la sensación que le provoque sea de $\frac{1}{4}$ respecto la de referencia, del doble o de cualquier otra proporción. Esta sería una tarea de *producción de proporción*. La tarea también puede consistir en ajustar un estímulo respecto a otro de referencia, equivalente, por ejemplo, a 100 unidades arbitrarias de claridad, de modo que la sensación del estímulo ajustable sea de 30, 40 o cualquier otro valor respecto la misma escala arbitraria. En este caso, el experimento es de *producción de magnitud*.

Por otra parte, en los experimentos de *estimación*, el observador debe valorar la sensación de un estímulo respecto a otro de referencia, otorgando una respuesta en forma de proporción o de magnitud. Por ejemplo, ante el mismo estímulo de referencia de antes (con una sensación arbitraria de claridad de 100), se muestra un segundo estímulo al que el sujeto debe asignar una claridad mediante un número (*estimación de magnitud*) o mediante una proporción (*estimación de proporción*).

En Psicofísica de Stevens, el parámetro más utilizado para evaluar la *precisión* de la respuesta de los sujetos es el valor del exponente n .

3. El rol de las disparidades verticales en el juicio de distancias en profundidad

Este capítulo, subdividido en 5 apartados, se centra en el primer experimento que compone este trabajo doctoral. En la introducción se reseñan los estudios de la literatura científica relacionados más directamente con nuestro trabajo, concretamente sobre el efecto oblicuo y sobre la influencia de la disparidad vertical en la percepción estereoscópica. En la segunda parte se expone el objetivo del experimento para, seguidamente, dar paso a la metodología (participantes, estímulos y aparatos, procedimiento y análisis de datos). La cuarta parte muestra los resultados obtenidos y, finalmente, la discusión constituye el apartado final de este capítulo.

3.1. Introducción

Este experimento examinó la influencia de la orientación del estímulo sobre el rendimiento en una tarea de juicio de distancias en profundidad. Además, se intentó relacionar dicho rendimiento con la disparidad vertical asociada al estímulo.

3.1.1. El efecto oblicuo

Desde hace tiempo se han realizado estudios con seres humanos que han revelado el bien conocido efecto oblicuo (Appelle, 1972; Howard, 1982 para una revisión). Se refiere al hecho de que el rendimiento en una gran variedad de tareas visuales es significativamente mejor alrededor de los ejes cardinales (horizontal o vertical) que en los ejes oblicuos. Este efecto se ha obtenido al evaluar la agudeza visual mediante enrejados sinusoidales (figura 3.1) o mediante el optotipo C de Landolt, en la agudeza Vernier, en la sensibilidad al contraste, en la discriminación de orientación o en la dirección de movimiento, por ejemplo. Sin embargo, a día de hoy el origen de tal efecto no ha podido ser todavía explicado en su totalidad, ni psicofísica ni neurofisiológicamente.



Figura 3.1. Enrejados sinusoidales de luminancia orientadas a 0°, 45° y 90°. El efecto oblicuo vaticina que la red orientada a 45° será peor discriminada que las otras dos

Los primeros informes sobre el efecto oblicuo fueron descritos por Mach en 1891 y por Jastrow en 1893 (Pons y Martínez-Verdú, 2004), quienes pidieron a diversos observadores que copiasen unas líneas presentadas visualmente o que las ajustasen a una orientación específica. Tres décadas después, Emsley encontró que el punto de mejor agudeza visual se hallaba en las orientaciones horizontales y verticales, en comparación con estímulos orientados a 45° o entre 110° y 140°. Este efecto se atribuyó inicialmente al astigmatismo, pero incluso después de neutralizarlo con lentes, el fenómeno se mantuvo y fue llamado "astigmatismo residual". Curiosamente, un experimento realizado por Higgins y Stultz (1948) reveló que la inclinación de la cabeza del observador hasta hacer coincidir el campo visual con la orientación de las líneas del estímulo mejoraba la agudeza visual. Estos resultados

indicaron que la orientación de la imagen retiniana es más importante que la orientación de los objetos. Sin embargo, estudios ulteriores han sido ambiguos en este punto (Luria, 1963; Attneave y Olson, 1967; Horn y Hill, 1969). Posteriormente, muchos estudios realizados igualmente desde un enfoque psicofísico han aportado pruebas sólidas que sugieren que la percepción humana de líneas oblicuas presenta mayor dificultad que la percepción de líneas horizontales y verticales (Davidoff, 1974; Essock, 1990; Zlaskova, 1993). Investigaciones realizadas utilizando rejillas sinusoidales como estímulos han mostrado que la exactitud y la precisión para las altas frecuencias espaciales es peor para las orientadas oblicuamente que para las orientadas cardinalmente (Bowker y Mandler, 1981). Asimismo, Westheimer y Beard (1998) realizaron un experimento presentando fovealmente líneas con ocho diferentes orientaciones a un grupo de sujetos y midieron su rendimiento ejecutando diferentes tareas visuales. Los autores hallaron el efecto oblicuo, así como otras anisotropías. Más recientemente, Westheimer (2005) ha medido la agudeza Vernier para líneas que varían en orientación y ha hallado que el umbral es 2.29 veces mayor (menor sensibilidad) para las líneas presentadas oblicuamente con respecto a las orientaciones cardinales.

Desde el enfoque neurofisiológico, la investigación sobre el efecto oblicuo se ha centrado en aportar pruebas sobre los mecanismos neuronales subyacentes, aunque los resultados hallados muestran una mayor diversidad. Se comenzó con el descubrimiento de los detectores de orientación en la corteza visual de gatos y monos por Hubel y Wiesel (1959, 1977), y Pettigrew, Nikara y Bishop (1968). Desde entonces, diversos estudios han demostrado que en la corteza visual de monos y gatos hay más células capaces de responder a la orientación horizontal y vertical que a la orientación oblicua (DeValois, Yund, y Hepler, 1982; Kennedy et al, 1985; Mansfield y Ronner, 1978; Coppola et al, 1998). Sin embargo, otras investigaciones realizadas igualmente en monos y gatos no han revelado diferencias significativas en el número de células sintonizadas a la orientación (Hubel y Wiesel 1968; Poggio et al. 1977). Más recientemente, Matthew, Peterson y Freeman (2003) analizaron una gran cantidad de células de la corteza estriada del gato, hallando que tanto la cantidad de células como el ancho de banda de la orientación de ajuste variaban en función de la orientación, de manera que la mayoría de las células presentaban orientaciones horizontales y verticales.

En lo que respecta a estudios realizados en seres humanos, diversas investigaciones asumen que el efecto oblicuo se origina en V1. Maffei y Campbell (1970) no pudieron hallar el efecto oblicuo a nivel retiniano a partir de electroretinogramas. Tres décadas más tarde, Furmanski y Engel (2000), utilizando la técnica de la resonancia magnética funcional, mostraron que el efecto oblicuo se producía sólo en V1, mientras que no aparecía en otras áreas visuales. Sin embargo, otros estudios (Liu y Pettigrew 2003; Wang, Ding y Yunokuchi, 2003; Orban y Vogels 1998) han mostrado que las anisotropías de orientación pueden ser halladas más allá de V1. Paralelamente, un estudio realizado por Vidyagar y Henry (1990) concluyó que el núcleo geniculado lateral del gato mostraba preferencia por las orientaciones cardinales, lo que sugiere que las conexiones “feedforward” entre neuronas podrían jugar un rol importante en la preferencia por las orientaciones cardinales en V1.

Así pues, el efecto oblicuo todavía no ha sido explicado completamente desde un punto de vista neurofisiológico, aunque su existencia es incuestionable como han mostrado numerosos experimentos psicofísicos. Una posible explicación de su causalidad sería la presencia de un mayor número de neuronas disponibles para el procesamiento de las orientaciones horizontal y vertical con respecto a las oblicuas. Paralelamente, algunos autores consideran que el origen primario del efecto oblicuo se encuentra en las características del espacio donde nos desenvolvemos, donde las orientaciones horizontal (el suelo) y vertical (árboles, edificios...) son habitualmente las de referencia. Debido a ello, la corteza visual se habría desarrollado evolutivamente priorizando la discriminación en las orientaciones cardinales en detrimento de las oblicuas (Nundy et al, 2000; Keil y Cristóbal, 2000).

3.1.2. La disparidad vertical en relación a los juicios de profundidad

Aunque habitualmente la percepción de la profundidad se explica a partir de la disparidad horizontal, Ogle (1955) demostró que la disparidad vertical también interviene en dicho proceso perceptual, hallando que la visión estereoscópica disminuía hasta un valor nulo con el aumento del ángulo de excentricidad del estímulo. De acuerdo con Ogle, la presencia de intervalos con límites definidos en las disparidades horizontales y verticales sin que desaparezca la profundidad estereoscópica sugiere la existencia de estructuras neuroanatómicas limitantes.

El papel de la disparidad vertical también ha sido resaltado en relación a la percepción de la inclinación de superficies. En efecto, se ha demostrado que es necesario poseer información sobre la convergencia o sobre las disparidades verticales para que la percepción sea precisa, ya que la disparidad horizontal por sí sola es ambigua (Backus et al, 1999). Al parecer, sólo se atiende a la convergencia cuando no es posible disponer de información sobre la disparidad vertical en la percepción de la inclinación.

El ejemplo mejor conocido de percepción de profundidad a partir de la disparidad vertical lo constituye el *efecto inducido* (Ogle, 1955; Gillam y Lawergren, 1983), producido cuando existe una diferencia en el tamaño relativo entre las imágenes de ambos ojos, mediante amplificación de un estereograma. Ello provoca que el plano frontoparalelo se perciba inclinado alrededor de un eje vertical hacia el ojo cuya imagen está aumentada. El efecto inducido es causado por las disparidades verticales que surgen debido a las diferencias en la perspectiva ocular del objeto, y parece producirse a partir del modo en que el patrón de disparidades verticales es utilizado para calibrar información proveniente de la disparidad horizontal (Backus et al, 1999; Garding et al, 1995; Rogers y Bradshaw, 1993). Con independencia del mecanismo exacto, el efecto inducido constituye una fuerte evidencia de que el sistema visual detecta la disparidad vertical y la utiliza para modular la percepción de profundidad.

Es conocido que el rol de la disparidad vertical es esencialmente diferente del de la disparidad horizontal. De hecho, la disparidad vertical es mayor para grandes

excentricidades (Ogle, 1955), su efecto es más notable utilizando estímulos de gran tamaño (Howard y Kaneko, 1994) y parece que se calcula a partir del promedio de un área del campo visual (Kaneko y Howard, 1997). Por eso, la mayoría de autores piensan que la disparidad vertical actúa globalmente, mientras que la disparidad horizontal actúa localmente (Howard y Rogers, 2002).

En las últimas décadas se han propuesto una gran variedad de teorías sobre las disparidades verticales. Según Mayhew y Longuet-Higgins (1982), las disparidades horizontales entre un par de imágenes retinianas son insuficientes para computar la estructura tridimensional de una escena a menos que sean complementadas por información independiente sobre la distancia y la dirección del punto de fijación. Tradicionalmente, se ha asumido que esta información proviene de fuentes como el ángulo de vergencia de los ojos, pero estos investigadores sugieren que tal información suplementaria sea proporcionada por las disparidades verticales de algunos puntos de la imagen. Siguiendo el razonamiento de Longuet-Higgins, las disparidades verticales se comprenden mejor como consecuencia de la perspectiva desde dos puntos panorámicos distintos. Parece ser que el sistema visual humano es capaz de usar las disparidades verticales para escalar la profundidad percibida y el tamaño de las superficies estereoscópicas, si el campo de visión es suficientemente grande (Rogers y Bradshaw, 1993).

Más recientemente, Matthews et al (2003) han propuesto una teoría de la percepción de profundidad a partir de la disparidad vertical basada en la orientación de los campos receptivos de las células corticales binoculares. Esta teoría integra la medición e interpretación de la disparidad vertical, explica el efecto inducido y sugiere un marco unificado para entender la relación entre las disparidades verticales y horizontales.

Serrano-Pedraza y Read (2009) han investigado recientemente los mecanismos neuronales relacionados con la disparidad vertical y la visión tridimensional. La conclusión de su trabajo fue que la disparidad vertical debe ser codificada explícitamente en la percepción 3D, lo que va en contra del modelo unidimensional propuesto por Read y Cumming (2002), según el cual la información sobre la disparidad vertical podía ser conocida a partir de los sensores de la disparidad horizontal.

3.2. Objetivo

Este experimento profundizó sobre la influencia de la orientación del estímulo en el rendimiento de una determinada tarea visual y se intentó relacionar dicho rendimiento con la disparidad vertical asociada al estímulo. La tarea visual propuesta consistió en juicios de distancia en profundidad (ΔZ) entre dos segmentos paralelos, situados en planos frontoparalelos distintos. La orientación de los segmentos se varió desde 0° respecto la horizontal hasta 90° , en incrementos de 15° . Con ello, se esperaba poner de manifiesto un efecto oblicuo en relación a la percepción de profundidad, aportando como novedad una posible explicación de dicho efecto a partir de las disparidades verticales asociadas a los estímulos. El objetivo del experimento se resume, pues, del siguiente modo:

- Analizar el rol de las disparidades verticales en el rendimiento visual de juicios de distancias en profundidad, en función de la orientación

Los estímulos visuales tridimensionales se presentaron a los observadores en un entorno virtual. El rendimiento de la tarea visual propuesta se analizó mediante métodos psicofísicos a partir de la exactitud y de la precisión alcanzadas por un grupo de observadores al realizar dicha tarea.

3.3. Metodología

3.3.1. Participantes

Doce sujetos (seis mujeres y seis hombres) con edades comprendidas entre 21 y 40 años (media 26, desviación estándar 9.34) participaron en el experimento. Once de los participantes eran ajenos a los objetivos del experimento y todos tenían como mínimo una agudeza visual estereoscópica de 60 segundos de arco (medido con el test T.N.O.) y agudeza visual igual a 1 con o sin neutralización. Los observadores participaron voluntariamente en el estudio y firmaron el consentimiento informado. El estudio siguió los principios de la declaración de Helsinki de 1975 (revisados en Tokio en 2004) y se ajustó a las normas éticas de la Universitat Politècnica de Catalunya.

3.3.2. Estímulos y aparatos

Los estímulos fueron generados y presentados mediante un ordenador Pentium IV con tarjeta gráfica Nvidia Quadro FX 3500. Las pruebas se realizaron mediante un monitor Samsung Syncmaster 1100 DF de 22 pulgadas (CRT), con una tasa de refresco de 120 Hz y una resolución espacial de 1024 x 768 píxeles. La generación de los estímulos y el control de la secuencia experimental fueron programados en C++ usando la librería GLUT32 (Graphic Utilities) de OpenGL (Open Graphics Library), que es una interfaz de programación para escribir aplicaciones que contienen gráficos en 2D y en 3D. Los sujetos observaron los estímulos apoyados en una mentonera situada a 1 metro del monitor y se requirió la utilización de unas gafas estereoscópicas de cristal líquido (LCD) Crystaleyes. La montura, que posee unos sensores de infrarrojos, se conectó inalámbricamente con el ordenador gracias a un emisor de infrarrojos situado enfrente del observador. Las gafas estereoscópicas de cristal líquido alternan la presentación de las imágenes correspondientes a los ojos derecho e izquierdo a una frecuencia superior a 60 Hz, de modo que el ojo izquierdo no percibe nada (fondo opaco) cuando aparece la imagen correspondiente al ojo derecho, y viceversa.

El estímulo base generado constó de dos segmentos rojos paralelos de 1 mm de grosor y 50 mm de longitud sobre fondo negro. Estos segmentos presentaron una separación horizontal (ΔH) de 150 mm, un desalineamiento vertical (ΔV) de 160 mm y una separación en profundidad (ΔZ) de 20 mm (figura 3.2), según el sistema de referencia que aparece en la figura 2.3 del capítulo 2.

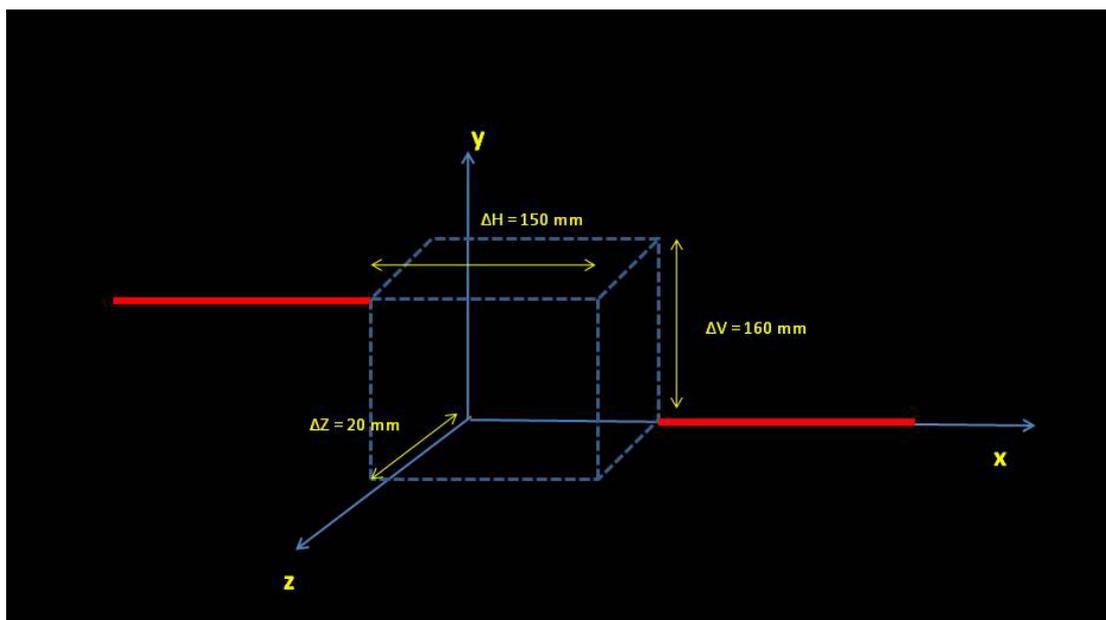


Figura 3.2. Estímulo base generado para la realización del experimento. Las direcciones x , y , z de los ejes de coordenadas se corresponden con las indicadas en la figura 2.3 de esta tesis, en relación a la parametrización del campo visual de los observadores

Efectuando una rotación del estímulo base, se obtuvieron los estímulos para las siete diferentes orientaciones, que fueron de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° y 90° (figura 3.3).

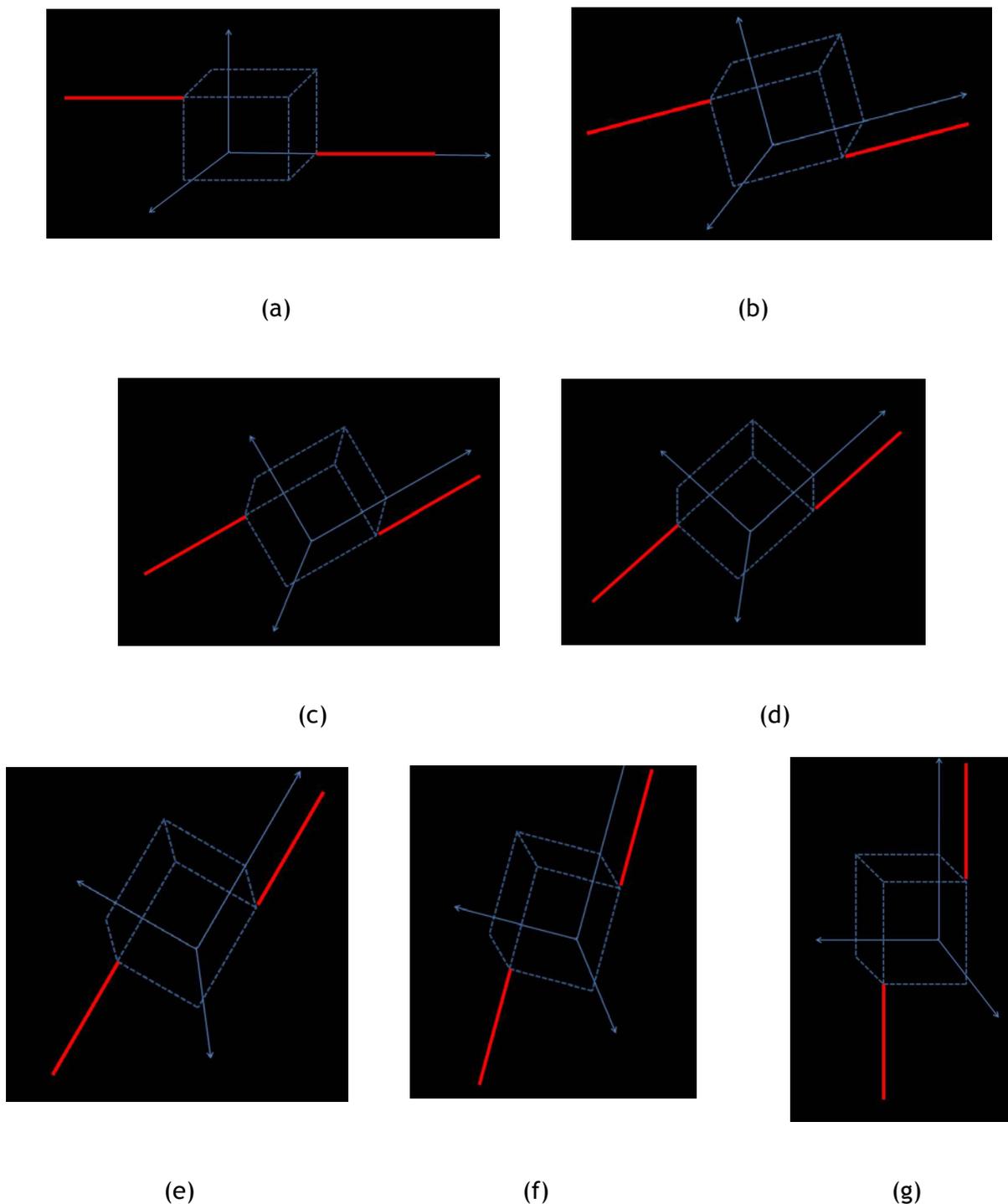


Figura 3.3. Estímulo base del experimento correspondiente a las orientaciones de (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° y (g) 90°

El experimento utilizó el método psicofísico de los *estímulos constantes*, por lo que requería, como se describirá más adelante, la comparación de un estímulo *de referencia* con otros estímulos denominados *de comparación*. Todas las variantes de los estímulos fueron generados a partir del estímulo base. El estímulo de referencia presentaba una separación horizontal (ΔH) de 150 mm, una separación vertical (ΔV) de 160 mm y una separación en profundidad (ΔZ) de 20 mm, mientras que los

estímulos de comparación, que eran 9, variaban respecto al de referencia en la separación en profundidad (ΔZ), cuyo valor osciló entre 12 y 28 mm en incrementos de 2 mm (12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 y 28 mm respectivamente).

Este experimento fue realizado en el laboratorio de Psicofísica de la Facultad de Psicología (Universitat de Barcelona) y en el laboratorio de Neurofisiología de la Visión de la Facultad de Óptica y Optometría (Universitat Politècnica de Catalunya). La luminancia ambiental fue de 4-7 cd/m² en ambos casos (medida con un fotómetro Minolta LS-100). La figura 3.4 ilustra el montaje experimental.

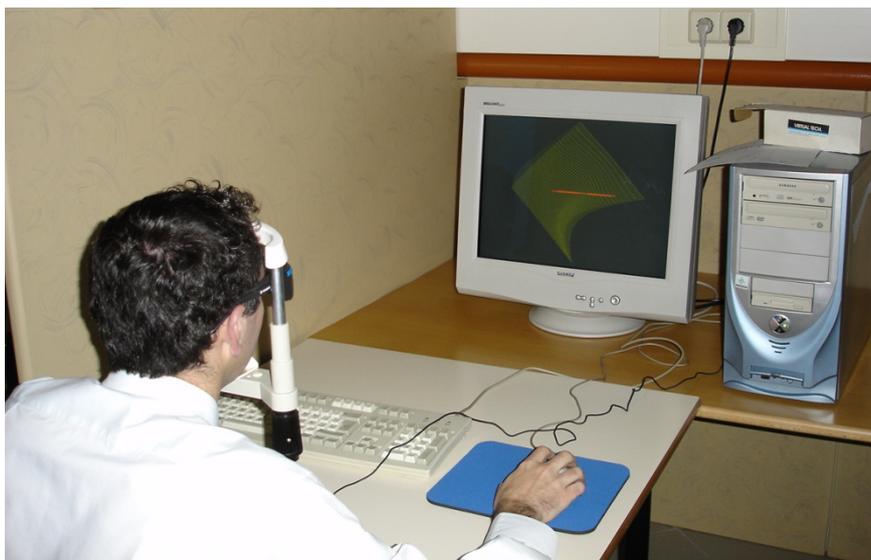


Figura 3.4. Montaje experimental para la realización de los experimentos A2 (en la imagen, fondo cóncavo y orientación 0°)

3.3.3. Procedimiento

El sujeto, en primer lugar, realizó al menos 10 juicios de profundidad a modo de entrenamiento. El método psicofísico utilizado fue el de los estímulos constantes con el paradigma experimental de elección forzada entre dos alternativas. La secuencia de cada ensayo comenzaba mostrando, primero, el estímulo de referencia (E_{ref}) y seguidamente el estímulo de comparación (E_{comp}). Los observadores debían responder lo antes posible si el ΔZ del E_{ref} era mayor o menor que el ΔZ del E_{comp} . Para ello, los observadores pulsaban el botón izquierdo o derecho del ratón, respectivamente. En ningún momento se proporcionó feedback a los participantes acerca de su rendimiento en la tarea. El tiempo de presentación de los estímulos (referencia y comparación) fue de 1500 ms, separados entre sí por una pantalla negra durante 500 ms.

Se registraron datos relativos a juicios de distancia relativa en profundidad correspondientes a las siete diferentes orientaciones de los segmentos (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°). Cada participante se sometió a la totalidad de las orientaciones, las cuales fueron aplicadas en orden aleatorio.

Cada uno de los nueve valores diferentes de la separación (ΔZ) entre los segmentos que componían los estímulos se presentó 24 veces (repeticiones). Ello implica que cada observador realizó 216 juicios por orientación, lo que se traduce en un total de 1512 juicios válidos por observador. Para evitar un descenso del rendimiento en la tarea por fatiga visual y disminución de la atención, los 216 juicios de cada orientación se fraccionaron en tres bloques de 72 juicios. Los observadores realizaron sesiones en las que se tomaron datos correspondientes a un máximo de 6 bloques por día. El tiempo empleado en realizar cada bloque fue de unos 9 minutos en promedio y cada sesión tuvo una duración aproximada de unos 90 minutos (hay que tener en cuenta que, después de cada bloque, se realizaba una pausa de unos 3 minutos).

3.3.4. Análisis de datos

El análisis de datos fue realizado a partir de la función psicométrica (apartado 2.5.1). Los datos obtenidos para cada sujeto y condición experimental permitieron construir funciones psicométricas donde, en el eje de abscisas, aparecía la magnitud física de los diferentes estímulos presentados (la separación en profundidad ΔZ , expresada en milímetros, del estímulo de comparación), mientras que en el eje de ordenadas se representaba el porcentaje de veces que el sujeto respondía que el estímulo de comparación era mayor que el de referencia (figura 3.5).

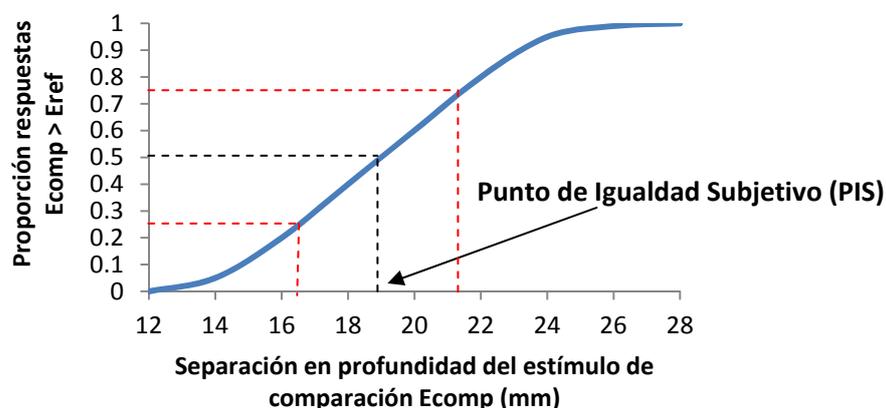


Figura 3.5. Ejemplo de función psicométrica obtenida en el experimento A2

Para evaluar el rendimiento de la tarea visual realizada por los observadores, en este trabajo se decidió tomar el valor absoluto del error constante (EC) como base para calcular un índice de exactitud, y la fracción de Weber como índice de precisión (véase apartado 2.5.1). En concreto, se calculó el *error constante relativo* (ECR) como el porcentaje del valor absoluto del EC respecto del punto de igualdad objetivo (PIO), y éste fue el parámetro considerado como indicador de la exactitud.

$$ECR = \frac{EC}{PIO} \times 100$$

Así pues, para cada sujeto y cada bloque, se registró la proporción de respuestas $E_{comp} > E_{ref}$. Posteriormente, se promediaron los datos de los 3 bloques de medidas por condición experimental y observador para obtener una única función psicométrica con todos los datos mediante programas creados “ad-hoc” en Matlab. Por tanto, se construyeron siete funciones psicométricas por observador, cada una de ellas calculada a partir de 216 juicios.

Para detectar las posibles diferencias en el rendimiento visual de los observadores debidas a la orientación del estímulo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con los datos correspondientes al ECR y a la fracción de Weber. En este caso, el análisis pertinente es una ANOVA de un factor (la orientación). El análisis estadístico se realizó mediante el software SPSS versión 17 y el grado de significación establecido en todos los análisis fue del 95% ($p < 0.05$).

3.4. Resultados

Para cada sujeto, se obtuvo una medida del error constante relativo ECR como indicador de la exactitud de la tarea visual realizada, así como un valor de la fracción de Weber como indicador de la precisión. Se esperaba que la variabilidad del conjunto de valores obtenidos pudiera ser justificada por la variación en orientación. La tabla 3.1 muestra los valores medios obtenidos por los observadores, tanto en *exactitud* (ECR) como en *precisión* (fracción de Weber), en función de la orientación del estímulo, junto con el error típico asociado a cada índice.

Tabla 3.1. Valores medios del error constante relativo (ECR) y de la fracción de Weber, junto con el error típico asociado a cada magnitud, en función de la orientación del estímulo

Orientación	ECR (%)	Error típico ECR	Fracción Weber	Error típico fracción Weber
0	4.525	0.22	0.164	0.005
15	5.377	0.27	0.229	0.004
30	6.027	0.32	0.246	0.007
45	7.001	0.44	0.300	0.007
60	6.798	0.36	0.255	0.005
75	5.855	0.27	0.185	0.004
90	4.087	0.20	0.093	0.002

Aunque los valores de ECR mostrados están en valor absoluto, es destacable comentar que se produjo una subestimación de las distancias percibidas en todos los casos.

La tabla 3.1 muestra que el error máximo se halló a 45° mientras que la mayor exactitud apareció a 90°. Además, el error típico fue menor a 90°, lo que implica que los sujetos presentaron una menor variabilidad en sus respuestas para esta orientación.

Los resultados del ANOVA de un factor (orientación) aplicado a los datos del ECR revelaron que las diferencias fueron estadísticamente significativas al 95% de nivel de confianza ($F_{6,77} = 12.505$, $p < 0.001$). Se aplicó un análisis post-hoc (HSD de Tukey) para averiguar entre qué orientaciones aparecieron las diferencias estadísticamente significativas. La tabla 3.2 muestra los subconjuntos homogéneos resultantes del análisis post-hoc.

Tabla 3.2. Resultados del análisis post-hoc (test HSD de Tukey) aplicado a los datos del error constante relativo

Orientación (°)	Subconjuntos homogéneos para $\alpha = 0.05$		
	1	2	3
90	4.0875		
0	4.5250		
15	5.3775	5.3775	
75		5.8550	5.8550
30		6.0275	6.0275
60			6.7988
45			7.0016
<i>Significación (valor p)</i>	<i>0.059</i>	<i>0.748</i>	<i>0.130</i>

Dentro de cada subconjunto, los datos presentan un alto grado de parecido entre sus medias, de modo que entre ellos no existen diferencias estadísticamente significativas (ver los valores p, todos ellos superiores a 0.05). Las orientaciones 0° y 90° resultaron ser claramente diferentes al resto, y lo mismo sucede con las orientaciones más alejadas de las cardinales, especialmente 45° y 60°. Así, en relación a la exactitud de juicios de profundidad, se puso de manifiesto, una vez más, el efecto oblicuo.

Al igual que ocurría con el ECR, se obtuvo la menor precisión (fracción de Weber mayor) para la orientación de 45°, mientras que a 90° los resultados han sido de mayor precisión (menor fracción de Weber).

Los resultados del ANOVA de un factor (orientación) aplicado a los datos de la fracción de Weber revelaron que las diferencias fueron estadísticamente significativas al 95% de nivel de confianza ($F_{6,77} = 157.85$, $p < 0.001$). Contrastes a posteriori (HSD de Tukey) mostraron qué diferencias entre orientaciones fueron estadísticamente significativas. La tabla 3.3 muestra los subconjuntos homogéneos del análisis post-hoc de Tukey.

Tabla 3.3. Resultados del análisis post-hoc (test HSD de Tukey) aplicado a los datos de la fracción de Weber

Orientación (°)	Subconjuntos homogéneos para $\alpha = 0.05$				
	1	2	3	4	5
90	0.093				
0		0.164			
75		0.185			
15			0.229		
30			0.246	0.246	
60				0.255	
45					0.300
Significación (valor p)	1.000	0.113	0.314	0.909	1.000

A diferencia de lo que ocurría con los datos de exactitud, la fracción de Weber mostró una mayor variabilidad entre orientaciones, de modo que fue más difícil organizar los datos en subconjuntos homogéneos. De todos modos, puede apreciarse que aparecieron diferencias notables entre la orientación de 45° y las de 0° y 90°, ya que se clasificaron en subconjuntos diferentes. Por tanto, la influencia de la orientación fue mayor en la precisión que en la exactitud de los sujetos.

La figura 3.6 muestra simultáneamente las funciones psicométricas medias de la muestra de participantes, en función de la orientación. La pendiente de estas funciones corresponde, aproximadamente, a la inversa de la fracción de Weber y es, por tanto, indicadora de la precisión de modo que, a mayor pendiente, mayor finura discriminativa. La figura 3.6 corrobora que en la orientación de 90° los observadores presentaron la mayor precisión, como ya se comentó en el análisis de los datos de la fracción de Weber. Por otra parte, puede observarse que se produjo una subestimación en la percepción de profundidad, ya que el punto de igualdad subjetiva PIS fue, para todas las orientaciones, menor a 20 mm (que era el punto de igualdad objetivo PIO).

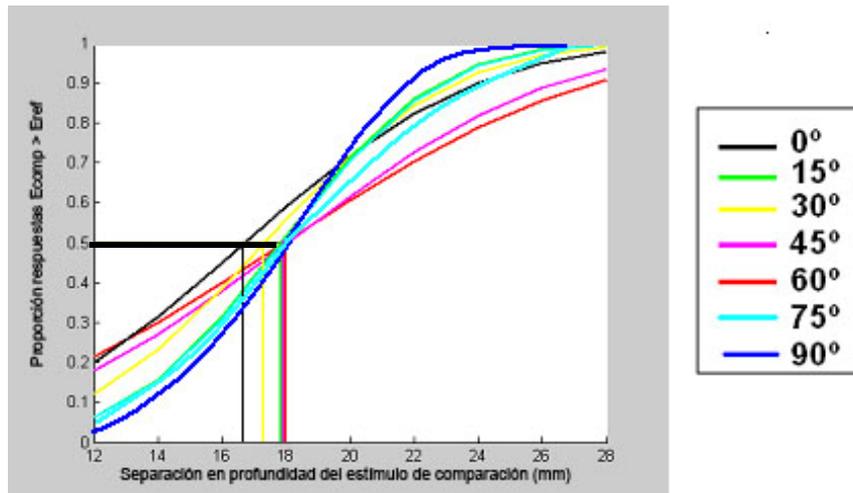


Figura 3.6. Funciones psicométricas medias obtenidas por los observadores en función de la orientación

Con la finalidad de estudiar la posible correlación entre el rendimiento visual de los observadores y la disparidad vertical asociada a los estímulos presentados, se diseñó el estímulo de manera que, para un valor de ΔZ dado, la disparidad binocular horizontal entre los extremos más cercanos de los segmentos del estímulo fuese independiente de la orientación (figura 3.7, marcado en azul), ya que los observadores mantenían la fijación en el punto medio situado entre ambos segmentos (marcado con una cruz negra) para realizar los juicios de profundidad. Así, las posibles variaciones del rendimiento visual no podrían ser debidas a la disparidad horizontal.

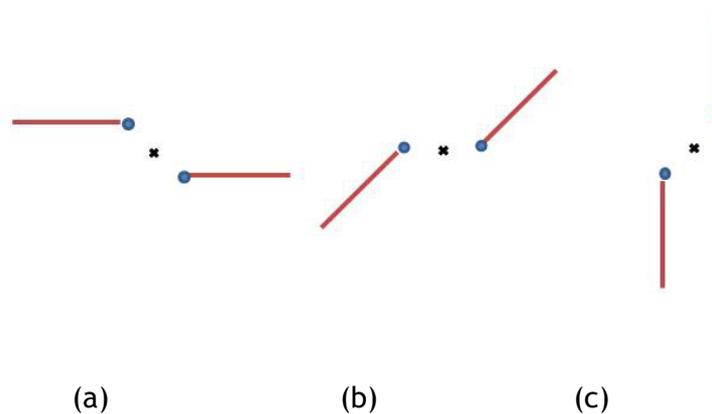


Figura 3.7. Extremos de las varillas de los estímulos (marcados en azul) en función de la orientación: (a) 0°, (b) 45° y (c) 90°. El punto de fijación de los observadores se hallaba en el centro de ambas varillas (marcado con una cruz negra)

La figura 3.8 muestra un esquema genérico con la geometría de la escena para calcular la disparidad vertical entre dos puntos P_1 y P_2 situados en planos frontoparalelos distintos respecto el observador.

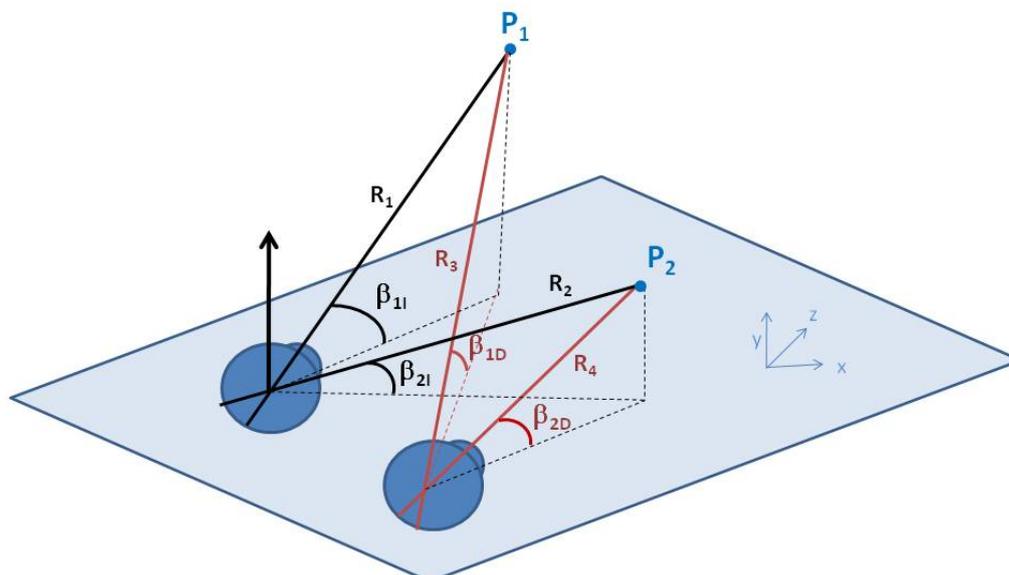


Figura 3.8. Esquema geométrico para calcular la disparidad vertical de dos puntos en el espacio P_1 y P_2 situados en distintos planos, donde se indican los ángulos de elevación β y las distancias R desde cada ojo hasta los puntos P_1 y P_2

De acuerdo con lo explicado en el capítulo 2, la expresión utilizada para el cálculo de la disparidad binocular vertical DBV es análoga a la de la disparidad horizontal:

$$DBV = \Delta\beta_2 - \Delta\beta_1 = \beta_{21} - \beta_{2D} - (\beta_{11} - \beta_{1D})$$

donde β son los ángulos de elevación de los puntos P_1 y P_2 respecto cada ojo (figura 3.8).

Se calculó el valor absoluto de la DBV entre los puntos extremos centrales de los segmentos que componen el estímulo (figura 3.7). En la figura 3.9 se muestra la tabla de valores y la representación gráfica resultantes de este cálculo.

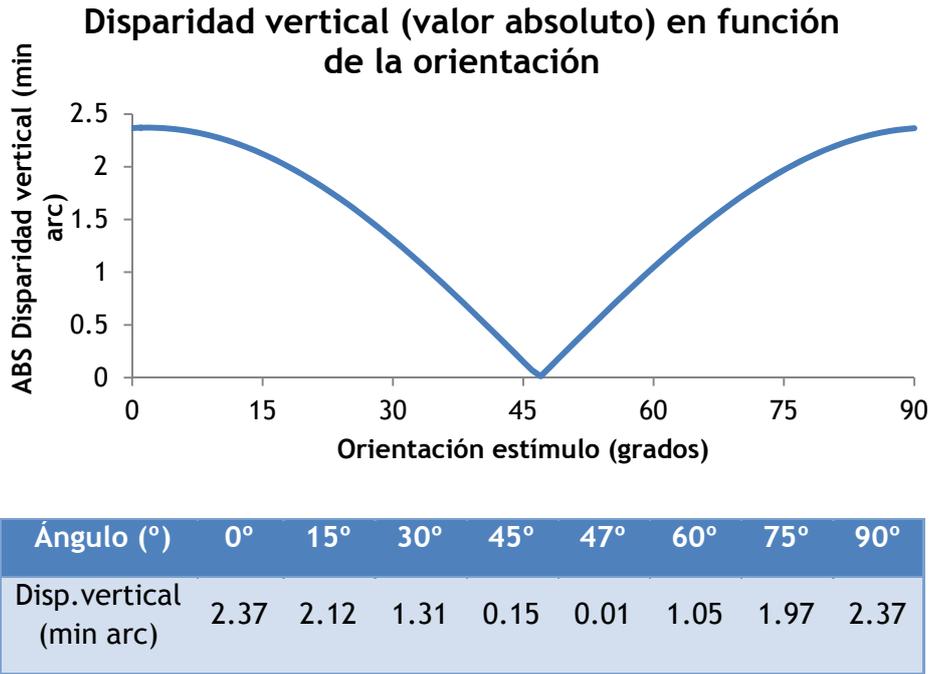
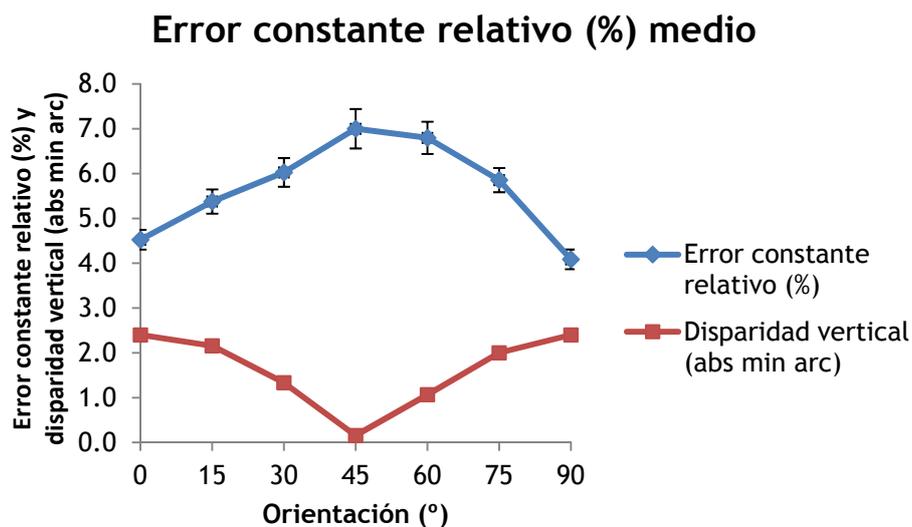


Figura 3.9. Valor absoluto de la disparidad vertical (en minutos de arco) en función de la orientación del estímulo, para dos puntos de coordenadas P_1 (-75, 80, 1020) y P_2 (75, -80, 1000), expresadas en milímetros

El motivo por el que no se obtuvo la mínima disparidad a 45° sino a 47° aproximadamente fue que la separación longitudinal ΔH entre ambos puntos no era igual a la transversal ΔV (150 y 160 mm respectivamente).

La figura 3.10 muestra la media del ECR obtenido por los participantes en función de la orientación, junto con las barras del error típico y el valor absoluto de la disparidad vertical. Dado que el valor numérico de ambas magnitudes es del mismo orden, se ha utilizado un eje de ordenadas común.

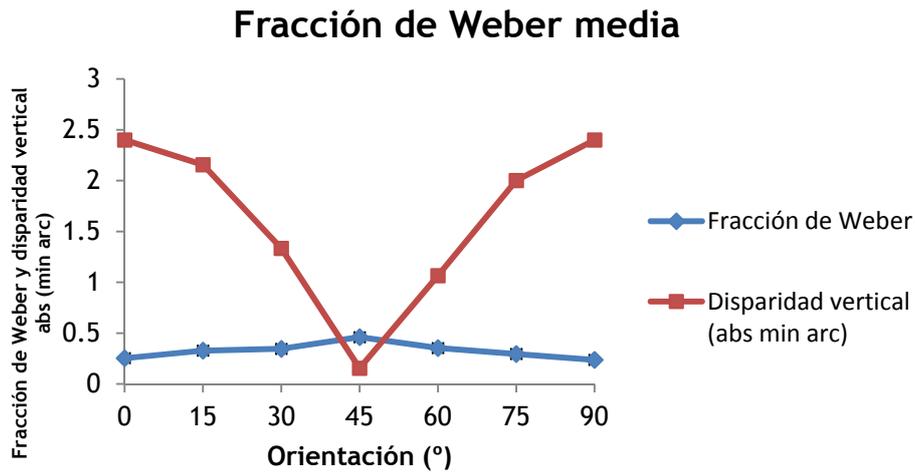


Orientación	Error constante relativo (ECR) medio (%)	Error típico ECR (%)	Disparidad binocular vertical (DBV) (abs min arc)
0	4.525	0.22	2.37
15	5.377	0.27	2.12
30	6.027	0.32	1.31
45	7.001	0.44	0.15
60	6.798	0.36	1.05
75	5.855	0.27	1.97
90	4.087	0.20	2.37

Figura 3.10. Error constante relativo medio obtenido por la muestra en función de la orientación, junto con el error típico y la disparidad vertical asociada a cada orientación

La correlación lineal entre los valores del ECR y los de la DBV para cada una de las orientaciones resultó ser estadísticamente significativa con un valor $p < 0.006$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.805$.

Respecto a la precisión, en la figura 3.11 se representan los valores medios de la fracción de Weber correspondientes a los sujetos de la muestra en función de la orientación, junto a los valores correspondientes de la DBV, utilizando el mismo eje de ordenadas para las funciones. Las barras del error típico de la fracción de Weber no son visibles debido a su pequeño tamaño.



Orientación	Fracción Weber	Error típico fracción Weber	Disparidad binocular vertical (DBV) (abs min arc)
0	0.164	0.005	2.37
15	0.229	0.004	2.12
30	0.246	0.007	1.31
45	0.300	0.007	0.15
60	0.255	0.005	1.05
75	0.185	0.004	1.97
90	0.093	0.002	2.37

Figura 3.11. Fracción de Weber media obtenida por la muestra en función de la orientación, junto con el error típico y la disparidad vertical en minutos de arco asociada a cada orientación

La correlación lineal entre los valores de la fracción de Weber y los de la DBV para cada una de las orientaciones fue estadísticamente significativa, con un valor $p < 0.014$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.731$.

3.5. Discusión

Los resultados obtenidos en este experimento han mostrado que el efecto oblicuo se manifiesta también en los juicios de profundidad, ya que el rendimiento del conjunto de observadores ha sido claramente superior cuando los segmentos del estímulo se presentaban orientados cardinalmente. Además, para la orientación de 45° (la más alejada de las cardinales), se ha obtenido el rendimiento inferior. Aunque el efecto oblicuo ha sido estudiado en múltiples tipologías de tareas visuales, nos parece interesante resaltar que también se ha observado en relación a la percepción de profundidad, ya que se trata de un resultado novedoso en la literatura científica.

Westheimer (2005) halló que el umbral de la agudeza Vernier de un grupo de observadores era 2.29 veces más alto para las orientaciones oblicuas que para las cardinales, lo que es indicativo de un rendimiento inferior. En nuestro estudio, el ECR hallado ha sido 1.7 veces superior a 45° respecto a 0° , mientras que la fracción de Weber ha sido 3.2 veces superior a 45° respecto a 90° . Teniendo en cuenta que los umbrales obtenidos por Westheimer se asemejan más a las medidas de exactitud de nuestro estudio, el orden de magnitud de las diferencias halladas ha sido algo menor (1.7 frente a 2.29), aunque ambos valores no pueden ser directamente comparables debido a las diferencias metodológicas existentes.

Por otra parte, el hecho de que el rendimiento visual del conjunto de observadores, tanto por lo que se refiere al ERC como a la fracción de Weber, correlacione significativamente con la DBV asociada a los estímulos, aporta una nueva evidencia de la contribución de dicha disparidad a la percepción de profundidad. La DBV puede explicar en parte el efecto oblicuo hallado en este trabajo, dado que se obtuvieron la menor precisión y exactitud a 45° , coincidiendo con el valor de DBV mínimo. Sin embargo, para las orientaciones de 0° y de 90° el valor de DBV asociado fue el mismo, pero se obtuvo un mayor rendimiento de los sujetos a 90° . Por lo tanto, a tenor de los resultados, no es posible justificar las diferencias en exactitud y de precisión entre 0° y 90° a partir de las disparidades verticales.

Matthews et al (2003) pusieron a prueba, mediante experimentos psicofísicos realizados con una muestra reducida de sujetos (cuatro), su teoría sobre la percepción en profundidad basada en la disparidad vertical, según la cual las células sensibles a la orientación en el córtex visual consideran la disparidad vertical como equivalente a una débil disparidad horizontal. Sus resultados confirmaron que la profundidad elicitada por la disparidad vertical dependía de la orientación. A pesar de que su teoría está basada en las propiedades de los campos receptivos binoculares de V1, los autores señalan que ello no implica que la percepción de profundidad ocurra necesariamente allí, sino que procesamientos posteriores pueden refinar las respuestas generadas en V1. De hecho, procesos generados en los circuitos feedforward de V2 y en V3 pueden contribuir a la extracción de la disparidad vertical y, posteriormente, tal información retornaría a V1 a través de circuitos feedback para generar la percepción de profundidad.

Nuestros resultados están de acuerdo con esta teoría y aportan una nueva evidencia psicofísica a sus hipótesis. En efecto, el estudio que hemos desarrollado aporta información complementaria que da soporte al sesgo de orientación radial hipotetizado por el modelo de Matthews et al, afirmando que la disparidad vertical asociada a la orientación de los estímulos correlaciona significativamente con el rendimiento de los sujetos.

Por otra parte, es destacable que se ha producido una *subestimación* en la percepción de profundidad, como se observa en la figura 3.7. Diversos estudios realizados en entornos reales indican la misma tendencia, hallándose que las personas subestiman las distancias en profundidad. Por ejemplo, Loomis et al (1992) realizaron un experimento en el que un grupo de sujetos debía ajustar la distancia relativa entre dos objetos situados a distinta profundidad respecto a una distancia relativa entre dos objetos visualizada en el plano frontoparalelo. Los resultados revelaron que los incrementos de profundidad eran considerablemente mayores que las distancias en el plano frontoparalelo. Del mismo modo, Teye (1986) encontró un ratio de 0.85 entre juicios de profundidad y juicios en el plano frontoparalelo; es decir, los participantes juzgaban las distancias relativas en profundidad como si fuesen de un 85% respecto a las mismas distancias orientadas frontalmente.

Respecto a otros estudios de la literatura científica realizados en entornos virtuales como el nuestro, el hallazgo de una subestimación en la percepción de distancias también está bien documentado (Loomis y Knapp, 2003; Thompson et al., 2004; Willemsen y Gooch, 2002), aunque otros trabajos han mostrado una comprensión escasa de la distancia (Witmer y Sadowski, 1998; Interrante, Anderson y Lies, 2004). Por lo tanto, nuestros resultados son congruentes con la tendencia a una subestimación en la percepción de distancias en un entorno virtual, que aumenta con la lejanía.

4. Influencia del fondo y de la orientación en tareas de alineamiento y en la percepción de profundidad

Este capítulo se subdivide en 5 apartados para explicar con detenimiento el segundo conjunto de experimentos de esta tesis, que es también el más amplio y complejo. En el primero de ellos (introducción) se informa de las contribuciones más relevantes de diversos estudios científicos relacionados con el trabajo que queremos desarrollar. Estos estudios tratan de examinar la influencia del fondo sobre el que se realizan las tareas visuales en el rendimiento de las mismas y, por otra parte, analizan la conveniencia de utilizar entornos virtuales en la realización de experimentos relacionados con la visión. En el segundo apartado se exponen los objetivos del trabajo, para dar paso al desarrollo de los experimentos que se agrupan según el entorno en el que fueron realizados. El tercer apartado contiene dos experimentos realizados en un entorno virtual y, el cuarto, dos experimentos complementarios realizados en un entorno real. En ambos apartados, la estructura de la exposición es la habitual: metodología (participantes, estímulos y aparatos, procedimiento y análisis de datos), resultados y discusión. Finalmente, la discusión global de los resultados de todos los experimentos constituye el quinto y último apartado de este capítulo.

4.1. Introducción

Este experimento examinó la influencia de la orientación del estímulo, así como del fondo sobre el que se desarrolló una tarea visual, en el rendimiento de un grupo de sujetos que realizaron juicios de distancias entre objetos situados en el mismo plano frontoparalelo y en distintos planos de profundidad.

4.1.1. Influencia del entorno en las tareas visuales

En las últimas décadas, diversos investigadores se han interesado en comprender el rol que juegan las características de las superficies del fondo y del terreno sobre los que se realizan tareas visuales en la integración de la información espacial. La cuestión a la que se intenta responder es si la presencia o ausencia de diversos elementos en el campo visual afecta al rendimiento en los juicios de profundidad o de alineamiento realizados por los observadores. ¿Se obtiene igual rendimiento al calcular la distancia relativa entre dos partes de un test si son observadas sobre un terreno carente de información (por ejemplo, un fondo negro), en comparación con otro que presenta diversos elementos (figura 4.1)?.



Figura 4.1. Ejemplo de la influencia que presenta la percepción en el cálculo de distancias relativas entre dos objetos (líneas amarillas)

El entorno cotidiano suele mostrar configuraciones espaciales más complejas que las presentes en los experimentos de laboratorio. En efecto, al contemplar una escena real es extraño que todos los objetos permanezcan estáticos sobre un fondo uniforme. Si el entorno es estático, la mayoría de objetos no comparten una superficie común aunque, en última instancia, todos descansan sobre el suelo. Por tanto, existen diferentes niveles de relación con cierto grado de organización jerárquica entre objetos situados sobre diferentes superficies.

Diversos autores, especialmente H. A. Sedgwick (Sedgwick, 1983, 1990; Sedgwick y Levy, 1985; Meng y Sedgwick, 2001) han desarrollado una serie de trabajos en los que se realizan una descripción del medio ambiente centrada en diseños espaciales complejos, donde las superficies se localizan en relación con el plano del suelo. En el

caso que las superficies no estén directamente en contacto con el suelo, la información respecto a su ubicación se especifica, en primer lugar, a partir de las relaciones de contacto local con las superficies adyacentes. Esta información acerca de la ubicación se propaga a través de una serie de relaciones de contacto que, en última instancia, enlazan cada superficie con otras y, finalmente, con el suelo.

En la misma línea, Sinai, Ooi y He (1998) realizaron un experimento para comprobar la importancia de la continuidad en el plano del suelo. Entre otros resultados, hallaron que los juicios de distancia absoluta se veían comprometidos cuando aparecía una discontinuidad en la textura del suelo, por lo que concluyeron que se incrementaba el error cuando el marco de referencia, provisto por el suelo, se veía perturbado. Este resultado se vio corroborado unos años más tarde por Feria, Braunstein y Andersen (2003), quienes diseñaron un experimento para comprobar el efecto de la discontinuidad de texturas no sólo en el suelo, sino también en el plano frontoparalelo (figura 4.2). Los resultados indicaron que la presencia de discontinuidades en la textura, tanto en el suelo como en el fondo, causaba una subestimación de la distancia percibida.

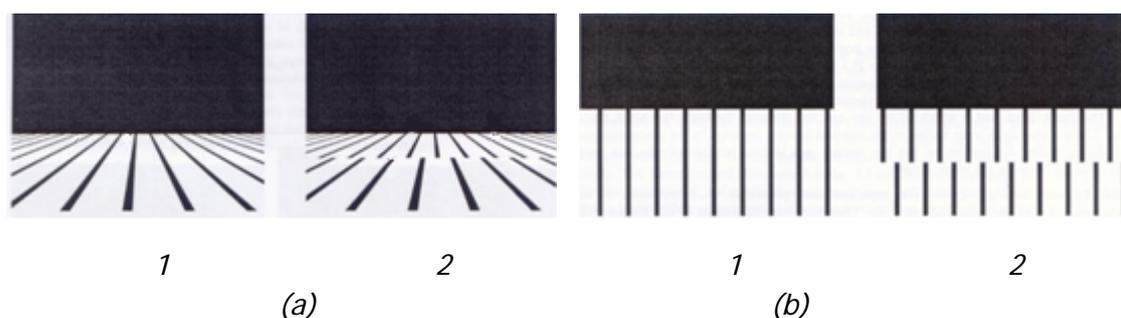


Figura 4.2. Efecto de la discontinuidad en una textura (a) en el suelo o (b) en una superficie de fondo (plano frontoparalelo) (adaptado de Feria, Braunstein y Andersen, 2003). La discontinuidad (presente en a2 y en b2) provoca una subestimación en la distancia percibida

He et al (2004) propusieron la existencia de un proceso secuencial de integración de superficies para explicar el modo en que el sistema visual construye la representación del terreno del campo visual. Los autores hipotetizaron que el sistema visual utilizaba, en primer lugar, las pistas de disparidad y de paralaje de movimiento para construir la representación del campo próximo. Esta representación se utilizaba, posteriormente, como plantilla que se integraba con otras informaciones del campo más lejano proporcionadas, preferentemente, por la textura. Más recientemente, Wu, He y Ooi (2008) plantearon un experimento de juicio de longitudes donde los resultados daban soporte a la hipótesis de selección, según la cual la representación del campo dependía del lugar donde el sistema visual muestreaba el fondo, de modo que los juicios de profundidad o longitud eran más precisos cuando el observador se centraba en el campo próximo. Sin embargo, estos

estudios se basaron en la influencia de las características del terreno más que en la influencia del fondo contra el que se observan los objetos, aunque existe cierta analogía.

Centrándonos más en el papel del fondo sobre el que se realizan tareas visuales, diversos autores (Andrews, Glennerster y Parker, 2001; Glennerster y McKee, 1999, 2004; Petrov y Glennerster, 2004, 2006) analizaron el efecto de la disparidad binocular en relación con un plano de referencia, concluyendo que los juicios de profundidad dependían de la disparidad relativa entre los estímulos presentes (distancia fondo-test), de tal modo que se hallaba una mayor precisión cuando las líneas aparecían próximas al fondo.

En la literatura científica aparecen resultados diversos respecto al papel del entorno en la percepción visual. Un ejemplo en el que la interposición de un fondo en la realización de una tarea contribuyó negativamente al rendimiento de los sujetos lo constituye el trabajo de Daniels y Gordon (1993). Los autores observaron que los sujetos cometían un sesgo en el alineamiento entre dos estímulos menor cuando se percibían aisladamente que cuando existían otros estímulos presentes en el campo visual. Lappin, Shelton y Rieser (2006) realizaron un experimento de juicios de distancias egocéntricas en un vestíbulo, en un pasillo y sobre césped al aire libre. El número de pistas simultáneas presentes era diferente en cada uno de los tres entornos. Los autores hallaron que los sujetos realizaron la tarea con menor exactitud en el entorno que presentaba un mayor número de pistas (el vestíbulo). Por lo tanto, las distancias percibidas se vieron afectadas por el campo visual circundante. Por otra parte, investigaciones recientes sobre la influencia del fondo en el desempeño de tareas visuales ha puesto de manifiesto una contribución negativa de este factor; es decir, un efecto de ruido (McKendrick, Weymouth y Battista, 2010), en el que la separación relativa entre los estímulos y el fondo afecta a la integración del contorno (Hadad, Maurer y Lewis, 2010).

Sin embargo, Doumen, Kappers y Koenderik (2008) realizaron un experimento donde la tarea a realizar consistía en dirigir un puntero hacia una “diana”, mientras aparecían cartulinas de fondo en diferentes zonas del campo visual. Sus resultados indicaron que el fondo afectó positivamente al rendimiento de la tarea cuando el observador utilizaba la cartulina como referencia para orientar el puntero hacia la diana.

Así pues, la influencia del entorno en la ejecución de una tarea constituye un tema de interés en el campo de la integración de pistas en Visión Binocular, ya que éste puede contribuir positivamente en el rendimiento visual de los sujetos o, por contra, entorpecerlo, a tenor de los resultados obtenidos en diversos estudios.

4.1.2. Experimentación en entornos virtuales versus reales

Los entornos virtuales han sido muy utilizados en los últimos años como herramienta para estudiar el comportamiento humano, así como para el entrenamiento de diversas habilidades. En este marco se sitúa, por ejemplo, el estudio de las decisiones comportamentales que toman los niños al cruzar la calle (Plumert, Kearney y Cremer, 2004), las respuestas de los adultos ante determinadas situaciones sociales (Pertaub, Slater y Barker, 2001) o el entrenamiento de médicos, bomberos o personal militar (Johnson y Stewart, 1999) en procedimientos complicados o novedosos antes de ejecutarlos en la vida real durante el ejercicio de su profesión.

En el campo de la percepción visual, la mayoría de los trabajos realizados se han basado en comparar la exactitud y la precisión en la estimación de distancias en entornos reales y en entornos virtuales. Sin embargo, diversas investigaciones han revelado que los resultados de experimentos realizados en entornos virtuales no son iguales a los obtenidos replicando el mismo experimento en entornos reales (Swan et al, 2006; Messing y Durgin, 2005; Creem-Regehr et al, 2005; Loomis y Knapp, 2003). En la misma línea, algunos estudios concluyen que la estereoaquidez evaluada mediante estereogramas difiere sustancialmente de la obtenida en condiciones más reales (Frisby, Buckley y Horsman, 1995; Porrill et al, 2010). El conflicto existente entre el estímulo acomodativo (distancia hasta la pantalla) y el estímulo de convergencia (gobernado por el grado de disparidad simulada) impide que los entornos real y virtual sean considerados equivalentes. En efecto, diversos autores han estudiado la alteración artificial de la relación entre acomodación y convergencia que se produce en la visualización de sistemas virtuales (Bharadwaj y Candy, 2009; Okada et al, 2006; Rushton y Riddell, 1999; Wann, Rushton y Mon-Williams, 1995). La astenopía (molestias visuales) es una de las quejas más frecuentes de los usuarios de dispositivos estereoscópicos, y puede ser inducida por este mismo conflicto. La limitación severa del campo visual, los problemas en la precisión de los sistemas estereoscópicos e incluso la falta de realismo y/o de calidad de las escenas simuladas virtualmente son factores que también influyen en el rendimiento de tareas realizadas mediante estos sistemas. Tal vez por ello, algunos investigadores han mostrado que los observadores logran mayor precisión con estímulos naturales que con estímulos estereoscópicos (Waller, Lippa y Richardson, 2008; Creem-Regehr et al, 2005; Thompson et al, 2004).

Como se citó en las conclusiones del capítulo 3, diversos estudios de la literatura científica realizados en entornos virtuales han hallado una subestimación en la percepción de distancias entre objetos situados en distintos planos frontoparalelos (Loomis y Knapp, 2003; Thompson et al., 2004; Willemsen y Gooch, 2002). Este resultado también se ha hallado consistentemente en estudios realizados en entornos reales. La mayoría de estudios sobre el juicio de distancias relativas entre objetos han utilizado la técnica de caminar en el espacio hacia un objetivo previamente visualizado, sin feedback visual alguno. Esta técnica produce un rendimiento excelente de los sujetos en entornos reales, con porcentajes de error que oscilan sobre el 2% (Loomis et al, 1992; Rieser et al, 1990). Por otra parte, Ziemer et al (2009) han estudiado la influencia de la experiencia previa en las estimaciones de

distancias, tanto en entornos reales como en virtuales, concluyendo que la memoria también juega un rol importante en la percepción de distancias.

No obstante, otros experimentos han hallado resultados opuestos a los expuestos hasta ahora con estímulos reales en escenas naturales (Mohler, Creem-Regehr y Thompson, 2006; Norman et al, 1996), mostrando que los participantes cometen importantes imprecisiones ante estímulos reales en escenas 3D. En cualquier caso, el debate en torno al uso de estímulos virtuales versus naturales y el conflicto inherente que provocan los primeros es todavía una cuestión abierta y objeto de investigación.

4.2. Objetivos

Con el propósito de incrementar el conocimiento en este ámbito, hemos diseñado un amplio estudio cuyos objetivos han sido los siguientes:

- Determinar la influencia del fondo sobre el rendimiento visual obtenido en tareas de juicios de distancias entre objetos situados en el mismo plano frontoparalelo (2D)
- Determinar la influencia del fondo sobre el rendimiento visual obtenido en tareas de juicios de distancias entre objetos situados en distintos planos frontoparalelos (3D)
- Determinar la influencia de la orientación del estímulo sobre el rendimiento visual obtenido en tareas de juicios de distancias entre objetos situados en el mismo plano frontoparalelo (2D)
- Determinar la influencia de la orientación del estímulo sobre el rendimiento visual obtenido en tareas de juicios de distancias entre objetos situados en el distintos planos frontoparalelos (3D)
- Determinar si existen diferencias entre la ejecución de juicios de distancia en un entorno real y la ejecución de juicios de distancia en un entorno virtual

Para ello se han diseñado, puesto a punto y desarrollado cuatro experimentos en los que se analizaron la exactitud y la precisión de un grupo de sujetos realizando juicios binoculares de distancias relativas entre objetos (distancias exocéntricas). Se utilizaron dos segmentos de direcciones paralelas contenidos, respectivamente, en el mismo plano frontoparalelo (2D) o en planos distintos (3D). Estas tareas se realizaron utilizando distintos fondos del campo visual (plano, cóncavo, convexo o ausente) y, para cada fondo, distintas orientaciones de la dirección de los segmentos (0° , 45° y 90° respecto al eje x definido en el sistema de referencia indicado en la figura 2.3 del capítulo 2). A su vez, los estímulos visuales 2D y 3D sobre diversos fondos y con distintas orientaciones se presentaron a los observadores en un entorno real y en un entorno virtual.

Los cuatro experimentos citados se concretan del siguiente modo:

- Experimento A1: Juicios de distancias entre objetos (2D) en un entorno virtual
- Experimento A2: Juicios de distancias entre objetos (3D) en un entorno virtual
- Experimento B1: Juicios de distancias entre objetos (2D) en un entorno real
- Experimento B2: Juicios de distancias entre objetos (3D) en un entorno real

En el mundo real, las personas realizamos juicios de distancias relativas entre objetos con distintas orientaciones que se observan contra fondos diversos, algunos de los cuales pueden producir sensación de concavidad o de convexidad, como muestra la figura 4.4. Por lo tanto, averiguar si la curvatura del fondo o la orientación de los objetos pueden afectar al resultado de determinadas tareas visuales aportará información relevante para la comprensión de los mecanismos que rigen la percepción visual de la distancia relativa: ¿el funcionamiento del sistema visual es independiente de la curvatura del fondo de las escenas? Por el hecho de ser cóncava la retina, ¿la precisión en las tareas visuales realizadas contra fondos cóncavos es mayor que contra fondos convexos? ¿Existe alguna interacción entre algún tipo de fondo y la orientación del estímulo? ¿Se pone de manifiesto el conocido efecto oblicuo en los experimentos diseñados?



Figura 4.4. Escenas visuales que causan (a) sensación de concavidad (www.fullfondos.com, última consulta 5/5/2011) o (b) sensación de convexidad (Casa Fracassi, Rosario, Argentina, www.skyscraper.com, última consulta 5/5/2011)

Los estímulos visuales utilizados en los experimentos A fueron generados por computador mediante programas diseñados “ad hoc” en el seno del grupo de investigación. En el caso de los experimentos B, se ha trabajado con una adaptación del aparato de Howard Dolman, tal y como se describirá más adelante.

4.3. Influencia del fondo y de la orientación en el rendimiento visual de juicios de distancias relativas realizados en un entorno virtual

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, en este apartado se describirán los experimentos A1 y A2 cuyo objetivo es determinar la influencia del tipo de fondo (cóncavo, convexo, plano o negro) sobre el rendimiento de los sujetos realizando tareas de juicios de distancias entre objetos situados en el mismo plano frontoparalelo (2D) y entre objetos situados en diferentes planos de profundidad (3D).

4.3.1. Metodología

4.3.1.1. Sujetos

12 sujetos (siete mujeres y cinco hombres), cuyas edades estaban comprendidas entre 32 y 47 años (media 40.25 años, desviación estándar 7.182), participaron en ambos experimentos (A1 y A2). Once de los sujetos eran ajenos a los objetivos de este experimento y todos ellos poseían una agudeza visual con o sin neutralización óptica igual o superior a 1 y una estereoagudeza de al menos 60 segundos de arco (medida con el test TNO). Los observadores participaron voluntariamente en el estudio y firmaron el consentimiento informado. El estudio siguió los principios de la declaración de Helsinki de 1975 (revisados en Tokio en 2004) y se ajustó a las normas éticas de la Universitat Politècnica de Catalunya.

4.3.1.2. Estímulos y aparatos

El dispositivo utilizado en este experimento fue el mismo que el usado en el experimento expuesto en el capítulo 3 de esta tesis.

En este caso, el estímulo base generado para el experimento A1 estaba compuesto por dos segmentos rojos paralelos de un grosor de 1 mm y de una longitud de 50 mm sobre un fondo negro. Estos segmentos presentaban una separación horizontal (ΔH) de 15 mm y un desalineamiento vertical (ΔV) de 5 mm (figura 4.5).

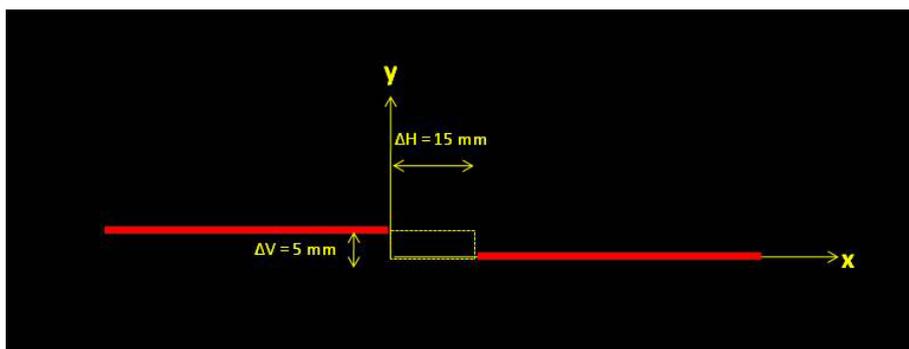


Figura 4.5. Estímulo base generado para la realización del experimento A1. Las direcciones x e y de los ejes de coordenadas se corresponden con las indicadas en la figura 2.3 de esta tesis, en relación a la parametrización del campo visual de los observadores

El estímulo base generado para el experimento A2 constaba también de dos segmentos rojos paralelos con el mismo grosor y longitud que los del experimento A1 (1 mm y 50 mm respectivamente) sobre fondo negro, pero con distinta posición relativa ya que, en este caso, los segmentos presentaban una separación horizontal (ΔH) de 15 mm, una separación vertical (ΔV) de 16 mm y una separación en profundidad (ΔZ) de 20 mm (figura 4.6).

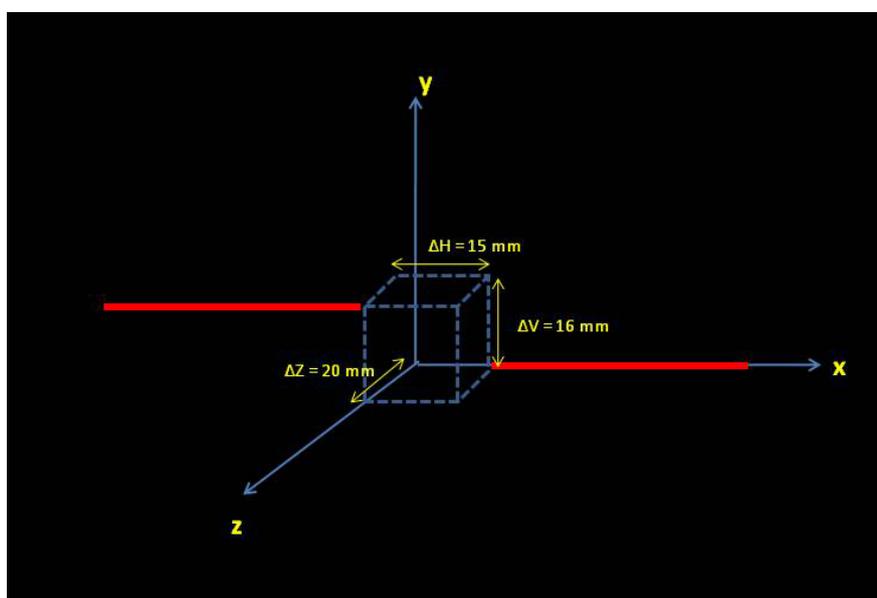
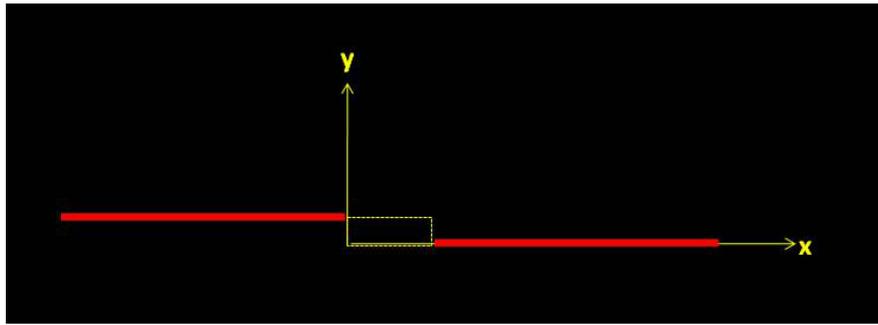
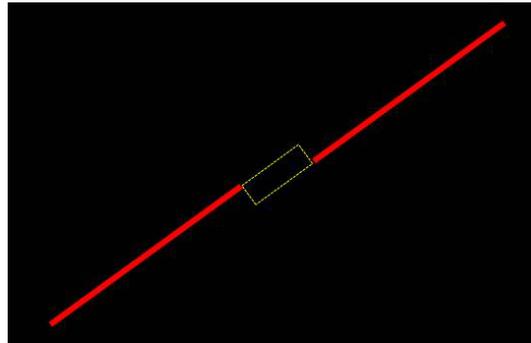


Figura 4.6. Estímulo base generado para la realización del experimento A2. Las direcciones x , y , z de los ejes de coordenadas se corresponden con las indicadas en la figura 2.3 de esta tesis, en relación a la parametrización del campo visual de los observadores

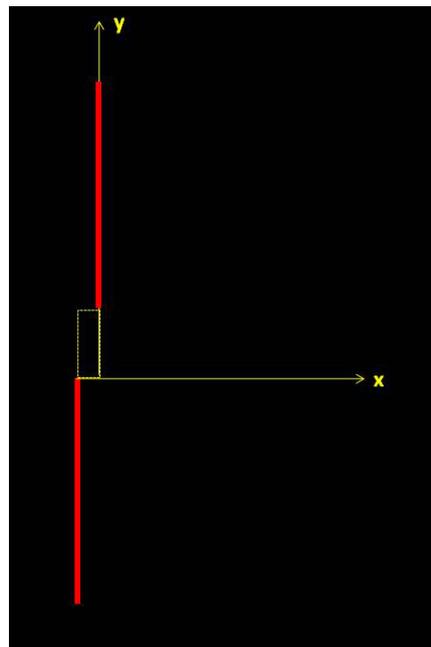
Efectuando una rotación de estos estímulos base se obtuvieron los estímulos para las diferentes orientaciones (figuras 4.7 y 4.8).



(a)

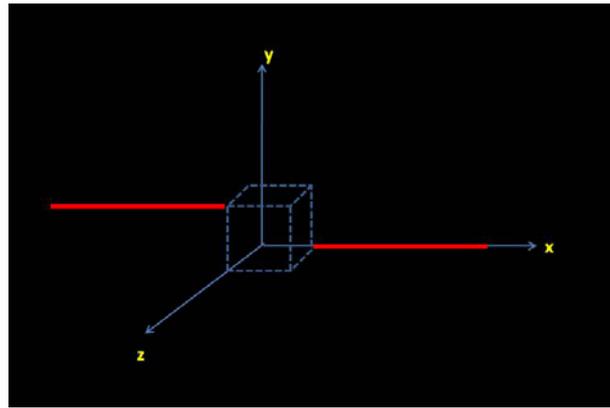


(b)

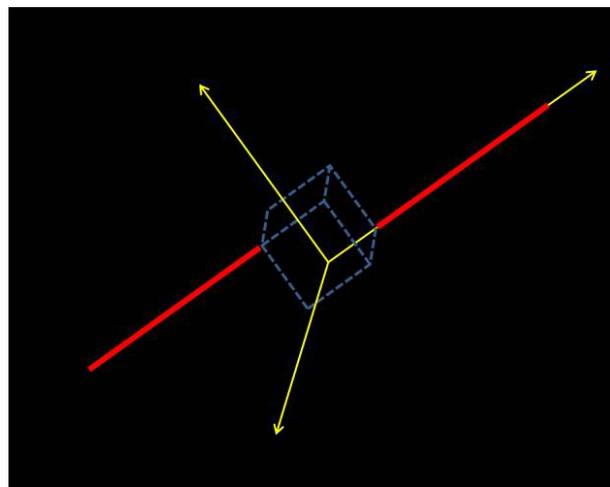


(c)

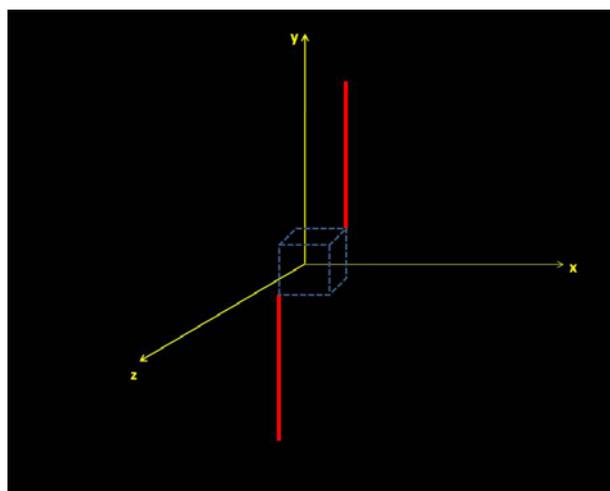
Figura 4.7. Estímulo base del experimento A1 rotado para generar las orientaciones de (a) 0° , (b) 45° y (c) 90°



(a)



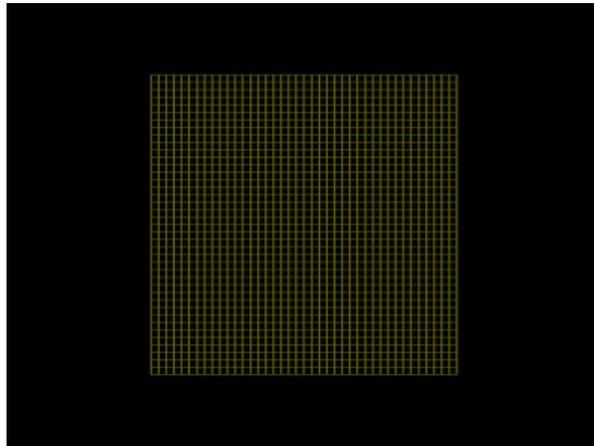
(b)



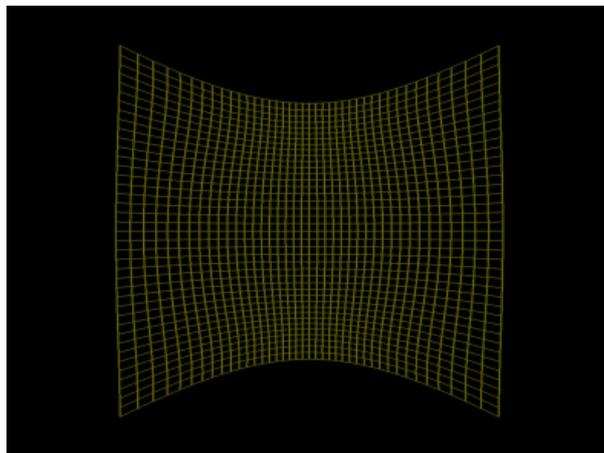
(c)

Figura 4.8. Estímulo base del experimento A2 rotado para generar las orientaciones de (a) 0° , (b) 45° y (c) 90°

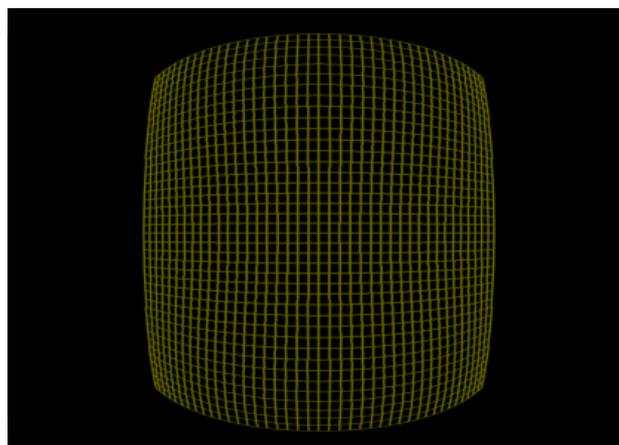
Por otra parte, tanto en el experimento A1 como en el A2, los estímulos se presentaron, además de contra un fondo negro, sobre un fondo plano, un fondo cóncavo y un fondo convexo (figura 4.9).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9. Fondos (a) plano, (b) cóncavo y (c) convexo contra los que se presentaron los estímulos en los experimentos A1 y A2

Los fondos consistieron en una malla cuadrada de idéntica trama en los tres casos. Los fondos cóncavo y convexo fueron superficies de Bézier generadas mediante programación en C++ y OpenGL, curvadas en el eje x . Ambas superficies generadas (cóncava y convexa) tuvieron los mismos puntos de control. Además, los tres fondos (cóncavo, convexo y plano) presentaron el mismo color (amarillo), la misma luminancia media (30 cd/m^2 , medida con un fotómetro Minolta LS-100) y la misma área sobre la pantalla ($250 \times 250 \text{ mm}$). Asimismo, todos ellos fueron presentados a una distancia de 1050 mm respecto el observador según el eje z .

Mientras que en el experimento A2 los fondos, al igual que los estímulos, se percibían tridimensionalmente mediante las gafas de cristal líquido, en el experimento A1 los fondos consistieron en una imagen plana de las superficies, de modo que no se visualizaban en 3D sino que sólo se poseían la sensación de concavidad, convexidad o planicie de modo análogo a como se percibe la figura 4.9. Con la finalidad de comprobar si la tarea se podría ver afectada por el hecho de que el fondo no era realmente tridimensional, se llevó a cabo un estudio paralelo con 3 de los participantes. En este experimento adicional se realizaron juicios de distancias relativas entre objetos situados en un plano (2D), pero utilizando las gafas Crystaleyes para visualizar tales objetos contra un fondo tridimensional idéntico al de los experimentos A2. Los resultados fueron prácticamente los mismos a los obtenidos realizando la tarea contra la imagen plana de las superficies, por lo que se optó por realizar el experimento A1 del modo descrito.

Al igual que ocurrió con el experimento expuesto en el capítulo 3, los experimentos A1 y A2 requerían la comparación de un estímulo *de referencia* (E_{ref}) con otros estímulos denominados *de comparación* (E_{comp}). El estímulo de referencia para el experimento A1 presentaba una separación horizontal (ΔH) de 15 mm y una separación vertical (ΔV) de 5 mm , mientras que los estímulos de comparación, que eran 9, variaban respecto al de referencia en la separación vertical (ΔV), cuyo valor oscilaba entre 4 y 6 mm en incrementos de 0.25 mm ($4, 4.25, 4.5, 4.75, 5, 5.25, 5.5, 5.75$ y 6 mm respectivamente).

El estímulo de referencia del experimento A2 presentaba una separación horizontal (ΔH) de 15 mm , una separación vertical (ΔV) de 16 mm y una separación en profundidad (ΔZ) de 20 mm . Los 9 estímulos de comparación variaban respecto el de referencia en la separación ΔZ , que osciló entre 12 y 28 mm en incrementos de 2 mm ($12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26$ y 28 mm respectivamente).

La elección del rango de valores entre los que osciló el estímulo de comparación fue consecuencia de los resultados obtenidos en unas pruebas previas donde, por ensayo y error, se probaron diferentes incrementos y saltos entre estímulos, con el objetivo que las funciones psicométricas obtenidas fuesen válidas. Además, se decidió utilizar el rango $4\text{-}6 \text{ mm}$ en el caso 2D y el de $12\text{-}28 \text{ mm}$ en el caso 3D porque, al normalizar el eje de abscisas dividiendo los valores físicos por el punto de igualdad objetiva PIO (5 mm en 2D, 20 mm en 3D), se obtienen valores situados dentro de una zona suficientemente comparable (oscilación entre 0.8 y 1.2 en el caso 2D y entre 0.6 y 1.4 en el caso 3D).

Ambos experimentos (A1 y A2) fueron realizados en el laboratorio de Psicofísica de la Facultad de Psicología (Universitat de Barcelona) y en el laboratorio de Neurofisiología de la Visión de la Facultad de Óptica y Optometría (Universitat Politècnica de Catalunya). La luminancia ambiental fue de 4-7 cd/m² en ambos casos (medida con un fotómetro Minolta LS-100).

4.3.1.3. Procedimiento

Se utilizó el método psicofísico de los estímulos constantes con el paradigma experimental de elección forzada entre dos alternativas, igual que en el experimento descrito en el capítulo anterior (apartado 3.3.3). En este caso, los observadores debían responder si el ΔV del Eref era mayor que el ΔV del Ecomp en el caso del experimento A1, o si el ΔZ del Eref era mayor que el ΔZ del Ecomp en el caso del experimento A2.

Los datos obtenidos en ambos experimentos se analizaron conjuntamente y correspondían a 24 condiciones experimentales, resultantes de la combinación de tres factores: condición visual (2D o 3D; es decir, experimento A1 o A2), tipo de fondo (cóncavo, convexo, plano o negro) y orientación de los segmentos del estímulo (0°, 45° y 90°). Cada participante se sometió a la totalidad de las condiciones experimentales presentadas en orden aleatorio (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Esquema de las 24 condiciones experimentales diferentes de los experimentos A1 y A2

Experimento A1												Experimento A2											
Fondo cóncavo			Fondo convexo			Fondo plano			Fondo negro			Fondo cóncavo			Fondo convexo			Fondo plano			Fondo negro		
0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°

La separación (ΔV o ΔZ) entre los segmentos que componían los estímulos presentaba nueve posibles valores diferentes, tanto en el caso 2D como en el 3D. Cada una de estas separaciones se presentó 24 veces (repeticiones). Ello implica que cada observador realizó 216 juicios por condición experimental, lo que se traduce en un total de 5184 juicios válidos por observador. Análogamente al capítulo 3, los 216 juicios de cada condición experimental se fraccionaron en tres bloques de 72 juicios y los observadores realizaron sesiones en las que se tomaron datos correspondientes a un máximo de 6 bloques por día.

4.3.1.4. Análisis de datos

El análisis de datos fue realizado a partir de la función psicométrica (apartado 2.5.1), tomando el valor absoluto del error constante relativo (ECR) como índice de exactitud y la fracción de Weber como índice de precisión, al igual que se realizó en el experimento definido en el capítulo 3 (apartado 3.3.4) de este trabajo doctoral. Para cada sujeto y cada bloque, se registró la proporción de respuestas $E_{comp} > E_{ref}$. Posteriormente, se promediaron los datos de los 3 bloques de medidas por condición experimental y observador para obtener una única función psicométrica con todos los datos mediante programas creados “ad-hoc” en Matlab. Por tanto, se construyeron 24 funciones psicométricas por observador, cada una de ellas calculada a partir de 216 juicios.

El tratamiento de los datos se realizó mediante un ANOVA de medidas repetidas con tres factores. Cada factor tenía un número diferente de niveles: la *condición visual* presentaba 2 niveles (2D o 3D), el *tipo de fondo* presentaba 4 niveles (negro, cóncavo, convexo o plano) y la *orientación del estímulo* presentaba 3 niveles (0°, 45° o 90°). Por otra parte, las variables dependientes sobre las que se aplicó el análisis fueron dos: el error constante relativo ECR y la fracción de Weber. El análisis estadístico se realizó mediante el software SPSS versión 17.

En aquellos casos en que no se cumplía el supuesto de esfericidad del modelo general lineal, se aplicó el corrector epsilon (ϵ) de Greenhouse-Geisser al ANOVA, que corrige los grados de libertad. El grado de significación establecido en todos los análisis fue del 95% ($p < 0.05$).

4.3.2. Resultados

4.3.2.1. Análisis de la exactitud

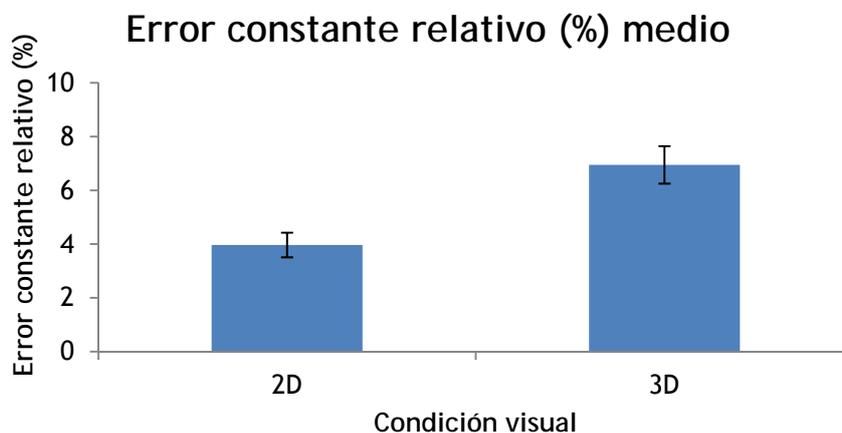
Para cada sujeto y para cada condición experimental se obtuvo una medida del ECR como indicador de la exactitud de la tarea visual realizada. Se esperaba que la variabilidad del conjunto de valores ECR obtenidos pudiera ser justificada por los factores que definen las distintas condiciones experimentales: condición visual (2D o 3D), fondo (negro, cóncavo, convexo o plano) y orientación (0°, 45° y 90°). Con el fin de determinar qué factor o combinación de factores explicaba significativamente ($p < 0.05$) dicha variabilidad, se aplicó una ANOVA de medidas repetidas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resultados de la ANOVA de medidas repetidas “Condición visual x Fondo x Orientación” a partir de los datos de exactitud (error constante relativo). En la tabla aparecen los factores principales, así como las interacciones de segundo y tercer orden entre factores

Factor	Grados libertad	F	Sig.
Condición visual	(1,11)	22.242	0.001
Fondo	(3,33)	0.718	0.527
Orientación	(2,22)	3.499	0.05
Condición visual x Orientación	(2,22)	1.057	0.365
Condición Visual x Fondo	(3,33)	0.222	0.881
Fondo x Orientación	(6,66)	0.619	0.715
Condición Visual x Fondo x Orientación	(6,66)	1.811	0.110

Tan sólo los factores principales *Condición Visual* y *Orientación*, que aparecen marcados en fondo azul, alcanzaron significación estadística, por lo que se van a comentar con más detalle a continuación.

La figura 4.10 muestra la media del error constante relativo ECR obtenido para cada condición visual, junto con las barras indicadoras del error típico correspondiente a cada valor, colapsando los datos correspondientes a los distintos fondos y orientaciones.

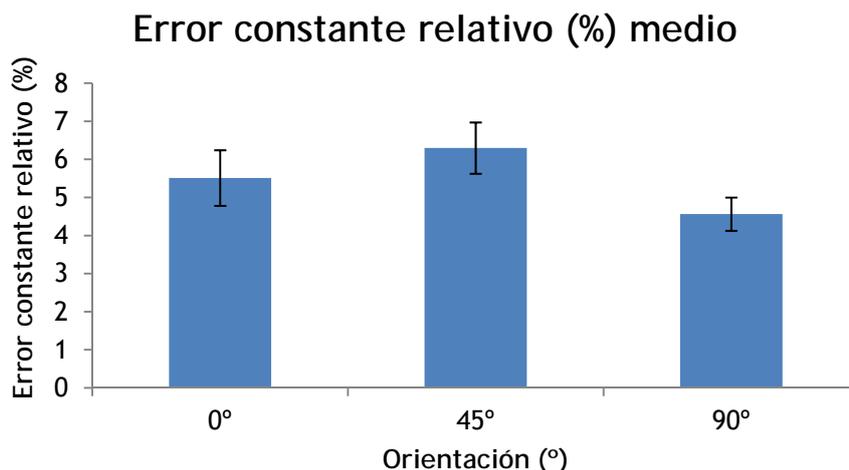


Condición visual	Error constante relativo medio (%)	Error típico (%)
3D	6.947	0.697
2D	3.967	0.459

Figura 4.10. Error constante relativo (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes, en las condiciones visuales 2D y 3D

Así pues, se obtuvo una mayor exactitud en la condición visual 2D que en 3D, ya que los errores obtenidos fueron mayores en este último caso.

La figura 4.11 muestra la media del ECR obtenida en función de la orientación del estímulo, junto con el error típico correspondiente a cada valor. Esta figura muestra el valor medio del ECR colapsando todos los datos correspondientes a las distintas condiciones visuales y orientaciones.



Orientación	Error constante relativo medio (%)	Error típico (%)
0°	5.512	0.731
45°	6.298	0.674
90°	4.562	0.437

Figura 4.11. Error relativo (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes, en función de la orientación

De la figura anterior se infiere que las diferencias significativas en orientación se produjeron sólo entre 45° y 90°, resultado que se vio corroborado por el análisis a posteriori mediante el método de Bonferroni de comparaciones múltiples ($p < 0.05$).

A pesar de que las diferencias no resultaron ser estadísticamente significativas entre 0° y 45°, puede apreciarse que el ECR medio fue mayor para la orientación de 45° que para las demás.

Cabe señalar que, aunque los valores de ECR mostrados están en valor absoluto, en la condición visual 2D se produjo sobreestimación de las distancias percibidas y en la condición visual 3D hubo una subestimación. En efecto, la figura 4.12 muestra un ejemplo de funciones psicométricas obtenidas, en función de la condición visual (2D o 3D).

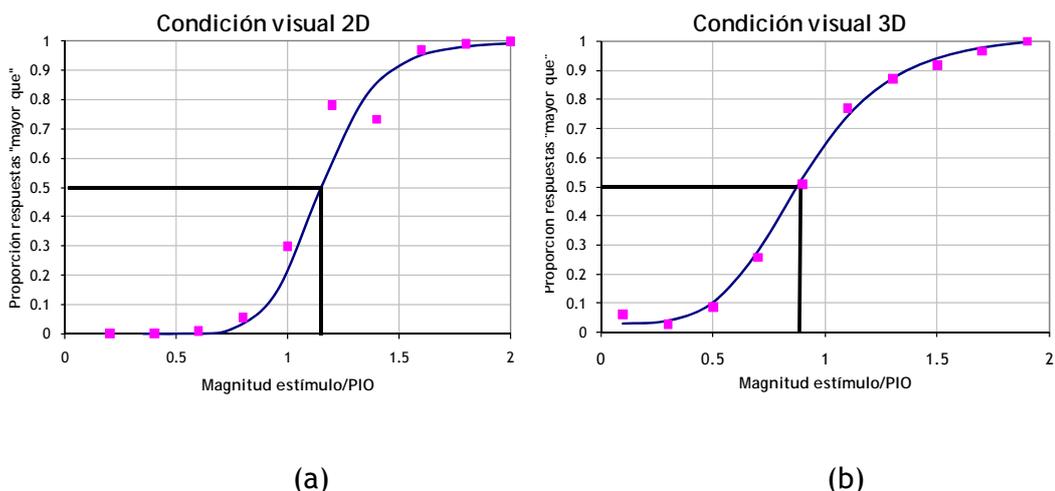


Figura 4.12. Ejemplo de funciones psicométricas obtenidas en (a) la condición visual 2D y (b) en la condición visual 3D

Dicha figura revela que, en la condición visual 2D, el EC mostró una tendencia hacia la sobreestimación de la separación vertical entre los segmentos, ya que el punto de igualdad subjetiva PIS está por encima de 1 en el eje de abscisas (que correspondería a la igualdad entre PIS y PIO). Sin embargo, en el caso 3D la tendencia fue hacia la subestimación, ya que el PIS se halla por debajo de 1.

4.3.2.2. Análisis de la precisión

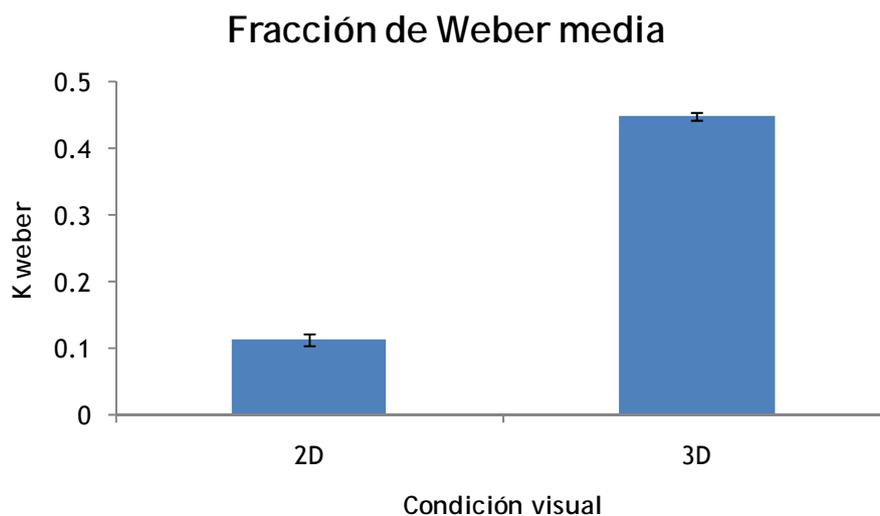
En paralelo al análisis anterior, para cada sujeto y para cada condición experimental se calculó el valor promedio de la fracción de Weber como indicador de la precisión de la tarea visual realizada. La variabilidad de este segundo conjunto de valores en función de los factores que definen las distintas condiciones experimentales se estudió mediante una ANOVA de medidas repetidas. La tabla 4.3 sintetiza los resultados significativos del análisis de varianza.

Tabla 4.3. Resultados de la ANOVA de medidas repetidas "Condición visual x Fondo x Orientación" a partir de los datos de precisión (fracción de Weber). En la tabla aparecen los factores principales, así como las interacciones de segundo y tercer orden entre factores

Factor	Grados libertad	F	Sig.
Condición visual	(1,11)	579.141	0.001
Fondo	(3,33)	6.782	0.002
Orientación	(2,22)	45.778	0.001
Condición visual x Orientación	(2,22)	45.737	0.001
Condición Visual x Fondo	(3,33)	1.115	0.348
Fondo x Orientación	(3,33)	8.446	0.001
Condición Visual x Fondo x Orientación	(6,66)	6.100	0.001

Todos los factores principales e interacciones resultaron estadísticamente significativos, con excepción de la interacción "Condición Visual x Fondo". Las gráficas y comentarios que aparecerán a continuación serán los correspondientes a estos resultados significativos.

El valor medio de la fracción de Weber (K Weber) para ambas condiciones visuales se muestra en la figura 4.13, junto con las barras de error. Esta gráfica muestra el valor medio colapsando todos los datos correspondientes a las distintas orientaciones y fondos. Como ocurría en el caso de la exactitud, los observadores mostraron una mayor precisión al realizar las tareas de alineamiento 2D en comparación a las tareas de juicio de profundidad 3D, ya que la K Weber hallada fue mayor en este último caso (lo que implica una peor precisión).

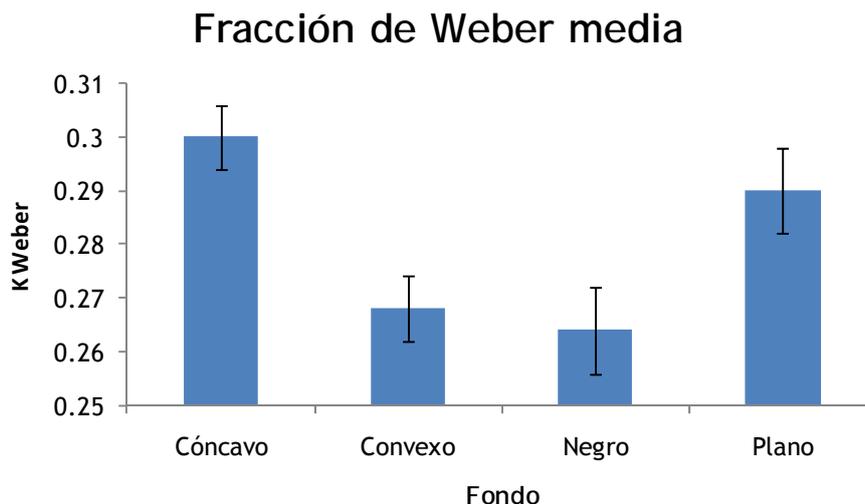


Condición visual	K Weber media	Error típico
2D	0.113	0.009
3D	0.448	0.006

Figura 4.13. Fracción de Weber (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, en las condiciones visuales 2D y 3D

Las pruebas realizadas para diseñar el experimento ya hacía prever que se obtendrían valores menores para la fracción de Weber en el caso 2D que en el caso 3D, dado que el intervalo de oscilación de los estímulos en profundidad era mayor que el intervalo en el plano frontoparalelo. Sin embargo, gracias a este experimento se ha podido cuantificar el deterioro de la precisión en 3D respecto la condición 2D. Concretamente, la magnitud de la fracción de Weber en 3D triplicó a la de 2D.

La figura 4.14 muestra los valores medios de la fracción de Weber obtenida en función del tipo de fondo, colapsando los datos de las condiciones visuales y de las orientaciones. Puede apreciarse que la ausencia de fondo (negro) proporcionó el resultado más alto de precisión, ya que la fracción de Weber fue menor.

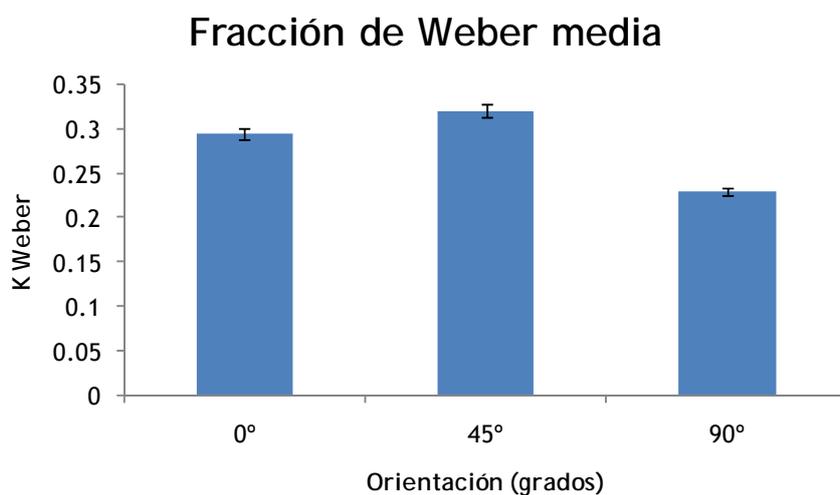


Fondo	K Weber media	Error típico
Cóncavo	0.3	0.006
Convexo	0.268	0.006
Negro	0.264	0.008
Plano	0.290	0.008

Figura 4.14. Fracción de Weber (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, en función del tipo de fondo

Las comparaciones por pares, realizadas a posteriori mediante el ajuste de Bonferroni, corroboraron la misma tendencia que se observa en la figura 4.14 a partir de las barras de error; a saber, que los fondos convexo y negro no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre ellos, del mismo modo que los fondos cóncavo y plano tampoco se diferencian entre sí. La mayor diferencia se encontró entre el fondo cóncavo y el negro ($p < 0.019$). En resumen, se pusieron de manifiesto diferencias estadísticamente significativas entre los fondos cóncavo y plano respecto los fondos convexo y negro, que resultaron ser los más precisos (menor fracción de Weber). La curvatura cóncava es la que más deterioró la tarea visual, aunque la presencia de cualquier fondo parece haber interferido en todos los casos, ya que si la tarea se realizaba sobre fondo negro, la precisión de los observadores era mejor que en el resto de los casos.

La figura 4.15 muestra la fracción de Weber media obtenida en función de la orientación, colapsando los datos de ambas condiciones visuales y de todos los fondos. En este caso, la precisión de los observadores fue significativamente más alta para la orientación de 90° y significativamente inferior para 45°, donde la fracción de Weber fue mayor. Estos resultados muestran el efecto oblicuo, así como una anisotropía entre las orientaciones vertical y horizontal.



Orientación	K Weber media	Error típico
0°	0.295	0.006
45°	0.32	0.007
90°	0.229	0.005

Figura 4.15. Fracción de Weber (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, en función de la orientación

Dado que la interacción de los factores “Condición visual x Orientación” resultó significativa, paralelamente se ha analizado la influencia de la orientación para cada condición visual por separado. La figura 4.16 muestra la fracción de Weber en función de la orientación, para cada condición visual, colapsando los datos correspondientes a los distintos fondos.

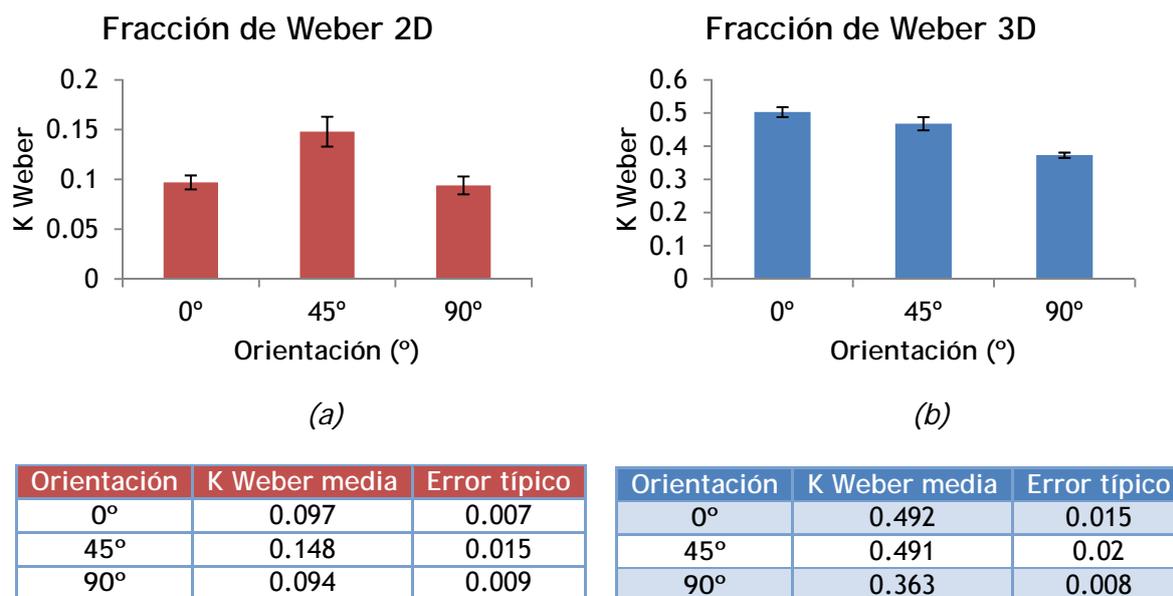


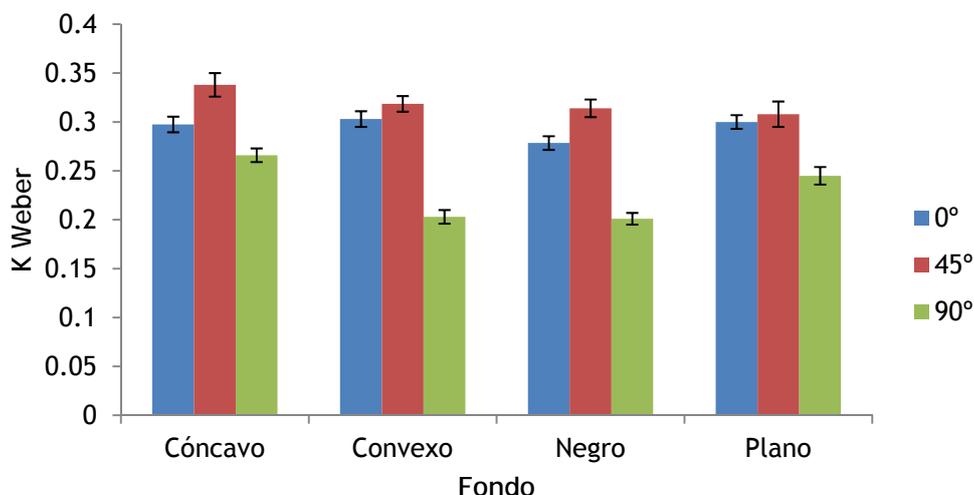
Figura 4.16. Fracción de Weber (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, en función de la orientación, para (a) la condición visual 2D y (b) la condición visual 3D

Dicha figura permite inferir que, en la condición visual 2D, la anisotropía vertical-horizontal no se puso de manifiesto. Por otra parte, el efecto oblicuo fue mucho más evidente que el observado considerando los datos 2D y 3D conjuntamente (figura 4.15). Los datos de la condición visual 3D evidencian la existencia de una anisotropía vertical-horizontal, ya que la precisión de los observadores resultó ser significativamente mayor si las varillas del estímulo se presentaban verticalmente (a 90°) que cuando se presentaban horizontalmente (a 0°). En cambio, el efecto oblicuo no se evidenció, ya que las diferencias en este caso no alcanzaron el grado de significación estadística entre 45° y 0°, como se observa a partir del solapamiento de las barras de error.

Así pues, el análisis de datos por separado aportó matices dignos de mención en relación a la influencia de la orientación.

Puesto que la interacción de los factores “Fondo x Orientación” resultó significativa, la figura 4.17 muestra la fracción de Weber para cada fondo y orientación, colapsando los datos de las condiciones visuales 2D y 3D.

Fracción de Weber en función del fondo y de la orientación (datos 2D y 3D colapsados)

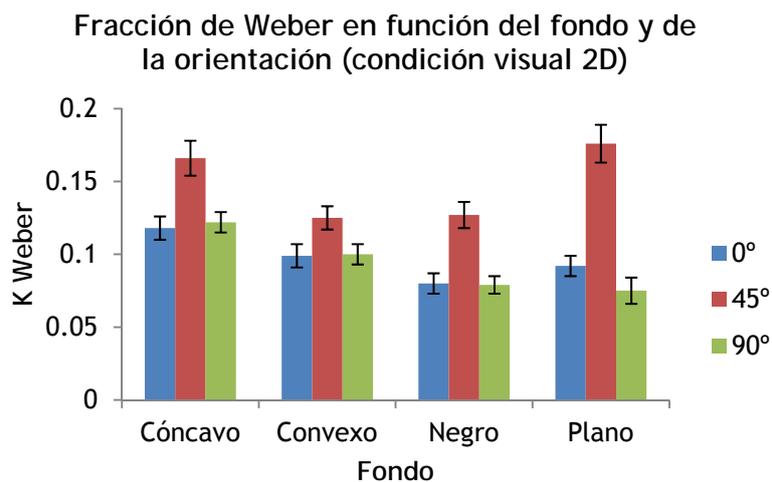


Orientación	Tipo de fondo							
	Cóncavo		Convexo		Negro		Plano	
	KWeber	E. típico	KWeber	E. típico	KWeber	E. típico	KWeber	E. típico
0°	0.2975	0.008	0.303	0.009	0.279	0.008	0.30	0.007
45°	0.338	0.011	0.319	0.008	0.314	0.012	0.308	0.013
90°	0.266	0.009	0.203	0.01	0.201	0.01	0.245	0.013

Figura 4.17. Fracción de Weber (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, para cada fondo y orientación

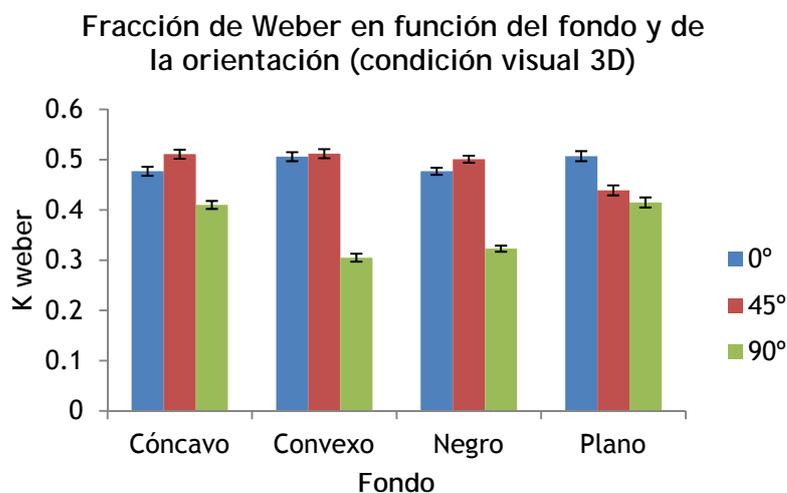
Puede apreciarse que, para cada fondo, en mayor o menor medida se pusieron de manifiesto tanto la anisotropía vertical-horizontal como el efecto oblicuo. El fondo marcó diferencias significativas para la orientación de 90° y, en este caso, la precisión de los observadores fue similar sobre los fondos convexo y negro y mejor que la conseguida sobre fondo plano y cóncavo que, a su vez, fueron también similares entre sí. Para la orientación de 45° no se apreciaron prácticamente diferencias en la precisión de la tarea sobre los diferentes fondos, al igual que a 0°.

Ya que la interacción de tercer orden “Condición visual x Fondo x Orientación” resultó significativa, la figura 4.18 muestra la influencia del fondo y de la orientación en 2D y en 3D separadamente.



Orientación	Tipo de fondo							
	Cóncavo		Convexo		Negro		Plano	
	KWeber	E.típico	KWeber	E.típico	KWeber	E.típico	KWeber	E.típico
0°	0.118	0.008	0.099	0.008	0.080	0.007	0.092	0.007
45°	0.166	0.012	0.125	0.008	0.127	0.009	0.176	0.013
90°	0.122	0.007	0.10	0.007	0.079	0.006	0.075	0.009

(a)



Orientación	Tipo de fondo							
	Cóncavo		Convexo		Negro		Plano	
	KWeber	E.típico	KWeber	E.típico	KWeber	E.típico	KWeber	E.típico
0°	0.477	0.009	0.506	0.009	0.477	0.007	0.507	0.01
45°	0.511	0.009	0.512	0.009	0.501	0.007	0.439	0.01
90°	0.41	0.009	0.305	0.008	0.323	0.006	0.415	0.01

(b)

Figura 4.18. Fracción de Weber (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, en función del fondo y de la orientación, para (a) la condición visual 2D y (b) la condición visual 3D

La figura 4.18 indica que, para la condición visual 2D, surgió de nuevo la manifestación significativa del efecto oblicuo, mientras que la anisotropía vertical-horizontal tuvo una débil o nula incidencia excepto para fondo plano, donde ambos efectos se pusieron de manifiesto significativamente. Sin embargo, en la condición visual 3D aparecieron diferencias significativas entre fondos sólo para la orientación de 90°. En este caso, los comentarios acerca de la precisión coinciden con los realizados respecto a los datos 2D y 3D colapsados (figura 4.17). A 0° no aparecieron diferencias en la precisión en función del fondo y, para la orientación 45°, el fondo plano aportó un mejor resultado que el resto, posiblemente porque su trama cuadrada aportó alguna pista suplementaria a los observadores en el desarrollo de la tarea visual. Puede observarse también que la anisotropía vertical horizontal fue estadísticamente significativa en todos los fondos.

4.3.3. Discusión

Los resultados de los experimentos A1 y A2, cuyos objetivos consistían en explorar la influencia del fondo y de la orientación sobre la exactitud y la precisión de los sujetos realizando juicios de distancias relativas en un entorno virtual, ponen de manifiesto que:

a) Respecto al *diseño experimental*:

- El alineamiento entre las varillas que percibían los sujetos tal vez ha proporcionado una pista adicional a la hora de juzgar las distancias relativas. Esto conduce a pensar que la agudeza visual Vernier puede haber modulado la ejecución de la tarea tanto en la condición visual 2D como en la 3D.

b) Respecto a la *condición visual (2D o 3D)*:

- El efecto principal de este factor fue significativo tanto en *exactitud* como en *precisión*.
- Los juicios de distancias relativas en 3D han sido menos exactos y menos precisos que en 2D, ya que tanto los errores constantes relativos como las fracciones de Weber han sido menores en el segundo caso. Respecto a la exactitud, el orden de magnitud de los errores constantes relativos (medida de exactitud) hallados es del 7% en 3D y del 4% en 2D. En lo que respecta a la fracción de Weber, la magnitud obtenida en la condición visual 3D ha triplicado a la de la condición visual 2D (valores de 0.448 y 0.113 respectivamente). Sin embargo, cabe comentar que el diseño de las pruebas experimentales de nuestro estudio partía de unos intervalos mayores en 3D que en 2D con el objetivo de que las funciones psicométricas obtenidas fuesen válidas y de que los estímulos pudieran ser distinguibles en ambas condiciones visuales, por lo que era esperable que los resultados fuesen algo mejores en 2D que en 3D.

- Los participantes tendieron a *sobreestimar* ΔV en 2D y a *subestimar* ΔZ en 3D, como se deduce de las medidas de *exactitud*. Como se comentó en el apartado 4.1.2, la tendencia a la subestimación en la percepción de la profundidad ha sido ampliamente reportada en entornos virtuales. Respecto a la sobreestimación en 2D, Gilinsky (1955) ya halló este sesgo en el juicio de distancias relativas en el plano frontoparalelo, abogando por la introducción de un factor de corrección de 1.059 a la ley potencial de Stevens en la percepción de distancias. Algunas teorías han tratado de explicar este fenómeno. Una de ellas propone que el ángulo visual comprendido entre el estímulo y los ojos del observador es la fuente de tales diferencias, debido a que las distancias entre objetos situados en el plano frontoparalelo (perpendicular al eje visual) forman ángulos visuales mayores que las distancias entre objetos situados a distinta profundidad (paralelos al eje visual) (Levin y Haber, 1993). Otras teorías se basan en el hecho de que las dimensiones percibidas en profundidad deben ser reconstruidas a partir de la información contenida en dos imágenes retinianas bidimensionales, por lo que tal reconstrucción puede resultar incompleta (Matsushima et al, 2005). Algunos experimentos clásicos que han comparado juicios de distancias relativas en 2D y en 3D (Wagner, 1985; Toye, 1986) han hallado una compresión en la dimensión de la profundidad en comparación con la dimensión frontal. En nuestro caso, se ha obtenido una sobreestimación en 2D y una subestimación en 3D. Por tanto, nuestro trabajo aporta nuevas evidencias acerca de la existencia de este sesgo en entornos virtuales.

c) Respecto al *fondo*:

- El efecto del *fondo* no ha sido estadísticamente significativo en la *exactitud* de los sujetos al realizar las tareas visuales de este experimento, aunque sí lo ha sido en la *precisión*. En este último caso, es destacable señalar que el fondo cóncavo ha aportado los peores resultados de precisión. Una explicación posible para este fenómeno sería que el fondo cóncavo interfiere más con la tarea visual, ya que su imagen se ajusta a la curvatura natural de la retina y, por tanto, se detecta mejor (D'Alessandro, 2008). Sin embargo, es necesario destacar que, en este experimento, la presencia de cualquier tipo de fondo ha provocado una disminución del rendimiento de los sujetos respecto a un fondo negro. Por lo tanto, nuestros resultados aportan una nueva evidencia hacia el efecto negativo que causa el fondo, lo que concuerda con los trabajos de otros autores (Daniels y Gordon, 1993; McKendrick, Weymouth y Battista, 2010; Hadad, Maurer y Lewis, 2010), posiblemente debido a que el fondo añade ruido a la tarea visual.

d) Respecto la *orientación*:

- La influencia del factor *orientación* ha resultado ser estadísticamente significativa tanto en *exactitud* como en *precisión*.
- Respecto a la *exactitud*, sólo han aparecido diferencias estadísticamente significativas entre 45° y 90°, poniendo de manifiesto el conocido efecto oblicuo, ya que es a 45° donde se ha obtenido la peor exactitud. Por otra parte, aunque la diferencia entre las orientaciones 0° y 90° no ha sido significativa, los resultados también apuntan cierta tendencia hacia la existencia de una anisotropía vertical-horizontal, puesto que la orientación de 90° ha proporcionado mejores resultados que la de 0°. Cabe destacar que la anisotropía a la que nos referimos no es la misma que la ilusión vertical-horizontal, según la cual la longitud de las líneas orientadas verticalmente es sobreestimada respecto a misma longitud de líneas horizontales. En este caso, se trata de una anisotropía en los juicios de distancias relativas, lo que constituye un resultado novedoso en la literatura científica.
- Respecto a la *precisión*, se han puesto de manifiesto tanto la anisotropía vertical-horizontal como el efecto oblicuo. Sin embargo, los resultados deben matizarse al analizar por separado la influencia de este factor en función de la condición visual ya que, en la condición 2D, el efecto de la anisotropía vertical-horizontal no ha sido significativo, mientras que en la condición 3D sí lo ha sido. Por otra parte, el efecto oblicuo se ha evidenciado notablemente en 2D, mientras que en 3D no ha alcanzado significación estadística. Una posible explicación sería que, en 2D, los juicios de distancias entre los dos segmentos para la orientación de 90° (varillas verticales) se realizaban sobre el eje *x* (horizontal) mientras que, para la orientación de 0° (varillas horizontales), los juicios se realizaban en el eje *y* (vertical). Por lo tanto, tal vez se ha producido un enmascaramiento entre las direcciones de las varillas y las de los juicios, causando que no haya aparecido la anisotropía. Este fenómeno no se producía en 3D, dado que los juicios de distancias relativas fueron siempre en el eje *z*, con independencia de la orientación de las varillas.

e) Respecto las *interacciones entre factores*:

- Las interacciones entre factores sólo han alcanzado significación estadística en la *precisión*, mientras que en *exactitud* no lo han sido en ningún caso.
- En el caso de la *precisión*, han sido significativas todas las interacciones entre factores, con la excepción de la interacción *Condición Visual x Fondo*, lo que implica que el fondo afectó de la misma manera en 2D que en 3D. Al analizar la interacción *Fondo x Orientación*, una vez más conviene observar separadamente para cada condición visual sus efectos para evitar efectos de enmascaramiento. Así, hemos hallado un resultado novedoso e interesante en la condición visual 3D, donde han aparecido diferencias estadísticamente

significativas entre los distintos fondos tan sólo para la orientación de 90° . Parece, pues, que esta orientación se ve más influenciada que las demás por el tipo de fondo. Una posible explicación se basaría en que la curvatura del fondo sólo afectaba al eje x (figura 4.9). A pesar de que los segmentos presentasen la orientación de 90° , el recorrido visual que debía realizarse entre ambos extremos para juzgar el alineamiento o la separación en profundidad era en el eje x , que era el que presentaba curvatura. Por tanto, según el diseño de este experimento, la orientación de los segmentos de 90° podría ser la más afectada por la curvatura del fondo.

4.4. Influencia del fondo y de la orientación en el rendimiento visual de juicios de distancias relativas realizados en un entorno real

Los experimentos que se presentan a continuación son los descritos en el apartado 4.2 como B1 y B2, llevados a cabo en un entorno real y planteados de manera similar a los que se realizaron en un entorno virtual (A1 y A2). Aunque la primera intención fue replicar en el mundo real los estímulos virtuales utilizados en A1 y en A2, las pruebas iniciales realizadas con tres observadores demostraron que era impracticable, tanto desde el punto de vista visual como desde el punto de vista puramente mecánico. Así pues, en los experimentos B1 y B2 se analiza la influencia del fondo y de la orientación en el rendimiento visual de un grupo de sujetos realizando juicios de distancias en un entorno real, al igual que se hizo en un entorno virtual. No obstante, la metodología experimental utilizada en el caso real difiere claramente de la utilizada en el caso virtual, así como la escala. Aún así, los resultados obtenidos en ambos entornos resultan suficientemente aptos para ser comparados, alcanzando de este modo el último de los objetivos que se perseguían con este conjunto de experimentos (A1, A2, B1 y B2).

4.4.1. Metodología

4.4.1.1. *Sujetos*

Los 12 sujetos participantes fueron los mismos que realizaron los experimentos A1 y A2.

4.4.1.2. *Estímulos y aparatos*

Para realizar el experimento B1 (juicios de distancias entre objetos en 2D) se utilizó una plancha metálica de 220 x 100 cm en la que se adhirió una imagen del fondo plano, cóncavo, convexo o negro impresa sobre una hoja de las mismas dimensiones que la plancha. Estos fondos fueron los mismos que se utilizaron en los experimentos virtuales A. Esta plancha se colgó en una pared frente al observador, situado a 1 metro de ella sobre una mentonera (figura 4.19). Unas cortinas negras situadas en los laterales de la plancha limitaban el campo visual del observador.

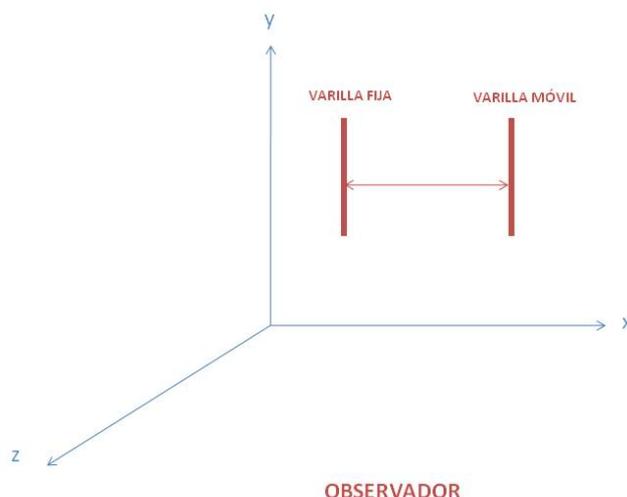


Figura 4.19. Esquema del montaje utilizado en el experimento B1. El observador permanecía a 1 metro de la plancha metálica apoyado en una mentonera

Sobre la plancha se adhirieron dos varillas imantadas de 0.5 cm de ancho por 10 cm de largo. Una de ellas permaneció fija mientras que la otra fue desplazada por el experimentador, de acuerdo con los valores de cada ensayo. Las varillas se colocaron formando un ángulo respecto la horizontal de 0° , 45° y 90° (figura 4.20).

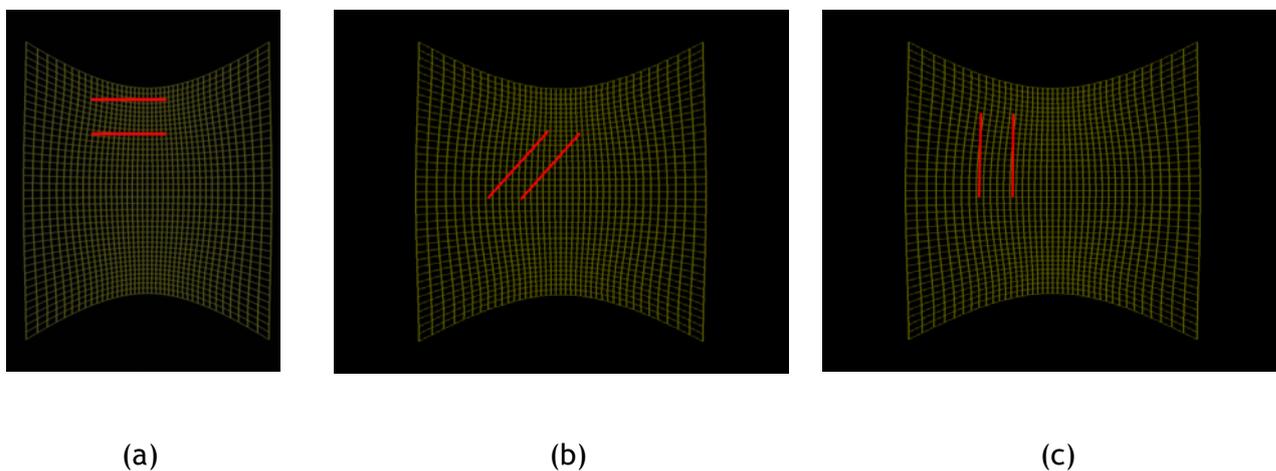


Figura 4.20. Esquema del montaje utilizado en el experimento B1 para fondo cóncavo y orientación de las varillas (a) de 0° , (b) de 45° y (c) de 90°

El dispositivo experimental utilizado para realizar el experimento B2 (juicios de distancias entre objetos en 3D) fue una adaptación del aparato original de Howard Dolman, consistente en una plancha metálica rectangular de 220 x 100 cm que podía ser colocada a 0° , 45° y 90° . Sobre ella había dos varillas metálicas rojas de 0.5 cm

de ancho por 20 cm de largo cada una. Una de las varillas quedaba fija a 100 cm respecto de los ojos del observador, mientras que la otra era desplazada por el observador con la ayuda de una vara extensible a lo largo de un carril adherido a la plancha, en uno de los lados de 220 cm. La separación ΔV entre ambas varillas era de 10 cm y el desplazamiento de la varilla móvil se realizaba en el eje z (ΔZ) (figura 4.21).

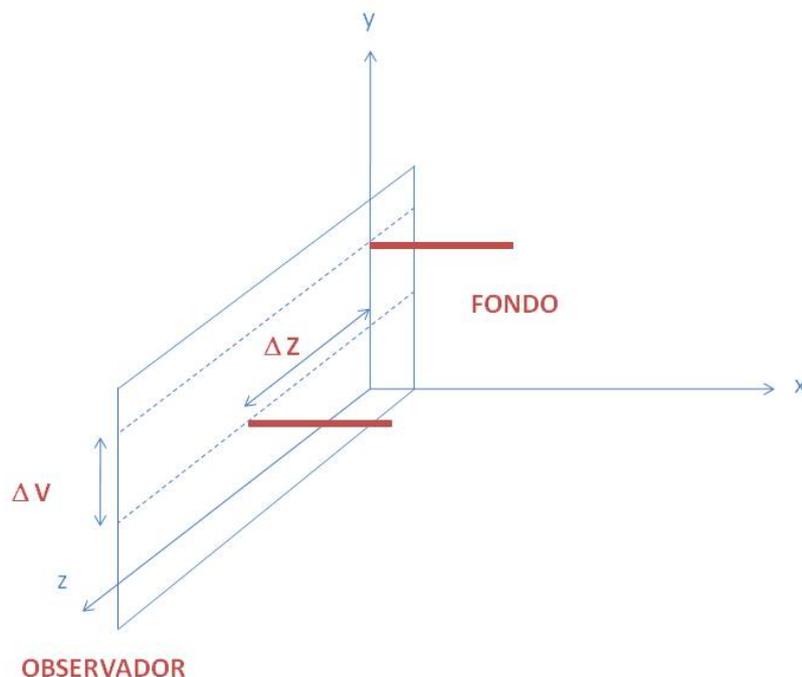


Figura 4.21. Esquema del montaje utilizado en el experimento B2. Una de las varillas permanecía fija a 1 metro del observador, mientras que la otra se desplazaba según ΔZ . ΔV permanecía fijo durante el experimento (10 cm)

En un extremo de la plancha se situó una mentonera y un diafragma circular de 10 cm de diámetro, mientras que en el otro extremo se colocaron unas rejillas metálicas amarillas de malla cuadrada, observadas sobre fondo negro. Para determinar el tamaño óptimo de la trama de la malla, se realizaron unos ensayos preliminares con cinco observadores. Se probaron mallas de tres tramas cuadradas diferentes: 2 mm, 5 mm o 10 mm de tamaño del cuadrado. Con ellas, se construyeron unas superficies cóncavas, convexas y planas que les fueron presentadas a los observadores en el fondo del aparato Howard Dolman. La malla de menor grano (2 mm) y la de mayor grano (10 mm) no produjeron sensación de concavidad ni de convexidad, aún cambiando la curvatura de las superficies. La malla de trama intermedia (5 mm) fue la que mejor rendimiento mostró en los 5 observadores, causando sensación de concavidad y de convexidad sin enmascaramiento, con un radio de curvatura cóncava y convexa de 35 cm en el eje x , por lo que fue la configuración de trama escogida

para el experimento. Todos los fondos fueron colocados en el extremo final de la plancha, por lo que se hallaban a 220 cm del observador. Las figuras 4.22 y 4.23 ilustran el montaje experimental utilizado.

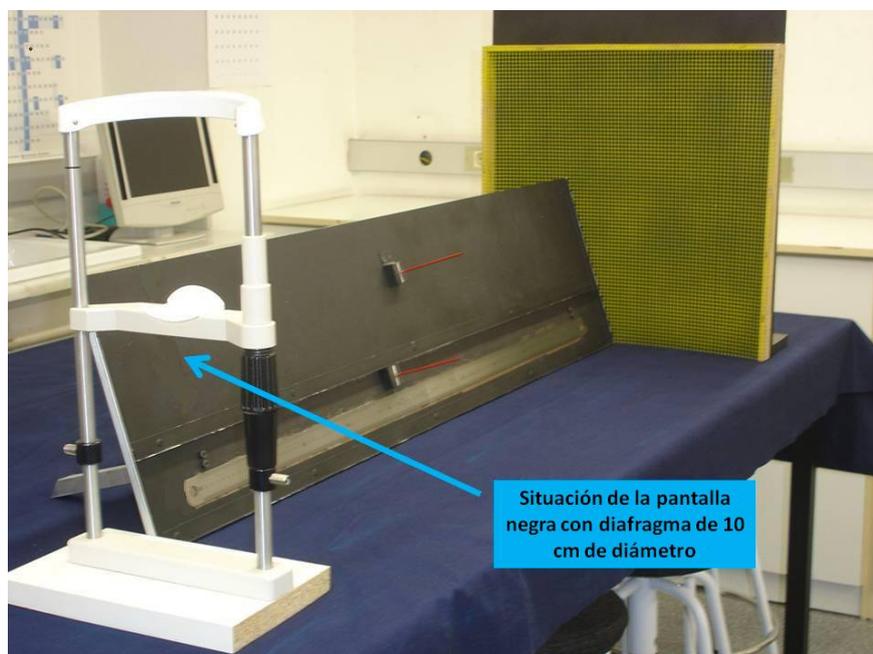
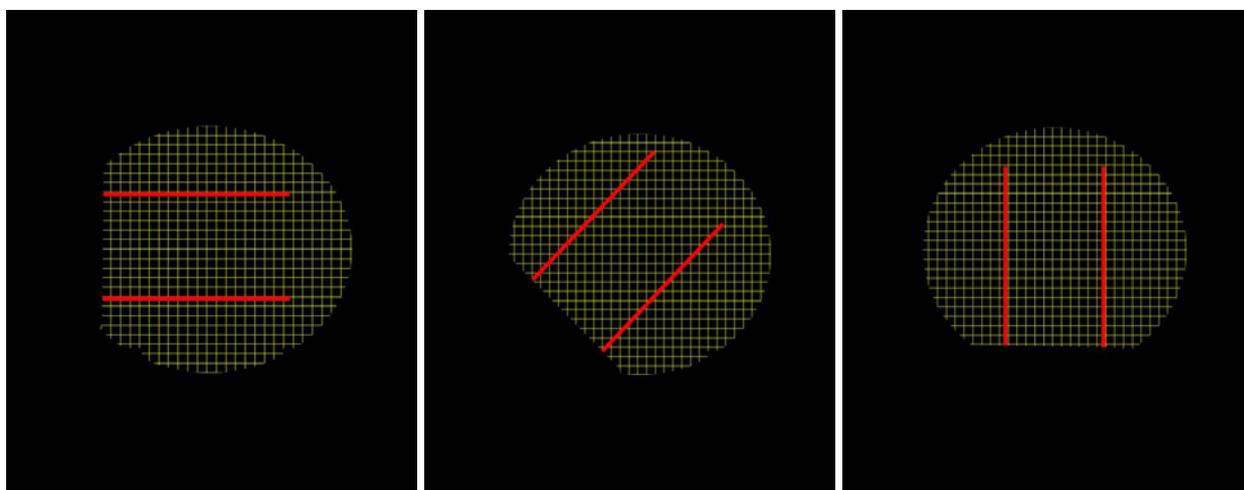


Figura 4.22. Adaptación del aparato de Howard Dolman construido para la realización del experimento B2 (en la imagen, fondo plano y orientación de las varillas de 45°)



(a)

(b)

(c)

Figura 4.23. Aspecto de las varillas del dispositivo de Howard Dolman, tal y como era visualizado por el observador, para el desarrollo del experimento B1 y orientaciones de (a) 0°, (b) 45° y (c) 90°

El montaje estaba rodeado lateralmente por unas cortinas negras que impedían la visualización de otros elementos en el campo visual.

Ambos experimentos (B1 y B2) se realizaron en el laboratorio de Óptica Fisiológica de la Facultad de Óptica y Optometría de Terrassa (UPC), con una luminancia ambiental media de 100 cd/m^2 medida con un fotómetro Minolta LS-100.

4.4.1.3. Procedimiento

En el experimento B1 (condición visual 2D) se requería del sujeto (situado a 1 metro de la varilla fija) que colocara la varilla móvil a 8 distintas distancias relativas a una longitud de referencia, que era la misma que la del lado más corto de la plancha metálica (100 cm). Las 8 distancias fueron:

- 25 cm ($\frac{1}{4}$ de la longitud de referencia)
- 50 cm ($\frac{1}{2}$ de la longitud de referencia)
- 75 cm ($\frac{3}{4}$ de la longitud de referencia)
- 100 cm (longitud de referencia)
- 125 cm ($1 \text{ y } \frac{1}{4}$ de la longitud de referencia)
- 150 cm ($1 \text{ y } \frac{1}{2}$ de la longitud de referencia)
- 175 cm ($1 \text{ y } \frac{3}{4}$ de la longitud de referencia)
- 200 cm (doble de la longitud de referencia)

Dado que el observador se hallaba demasiado lejos de la plancha metálica (a 1 metro) como para poder alcanzar la varilla móvil él mismo, en este experimento la varilla fue desplazada por un ayudante, siguiendo las instrucciones que recibía del observador. Todos los observadores realizaron una serie de ensayos de prueba para que se familiarizaran con la tarea y para asegurar que hubiesen comprendido correctamente el procedimiento.

Las instrucciones para el experimento B1 fueron:

“Tomando como distancia de referencia el lado más corto de la plancha que estás mirando (que es de 1 metro), la tarea consiste en que ajustes una de las varillas hasta que esté colocada, aparentemente, a una proporción respecto la varilla fija que te será especificada en cada ensayo; por ejemplo, a la mitad de distancia o al doble de distancia. Las varillas podrán estar orientadas a 0° , a 45° o a 90° y aparecerán contra un fondo que podrá ser negro o bien una rejilla plana, cóncava o convexa. El ajuste lo realizará el ayudante siguiendo tus indicaciones. Cuando creas que la varilla se halla a la proporción que se te haya pedido, avisa y anotaremos el resultado.”

Los observadores realizaron estas pruebas para 4 fondos distintos (plano, cóncavo, convexo y negro) y para 3 orientaciones (0° , 45° y 90°).

En el experimento B2 (condición visual 3D), al igual que ocurría en el B1, la tarea del sujeto era desplazar la varilla móvil a 8 distintas distancias relativas a una longitud

de referencia, que era de 1 metro (distancia observador-varilla fija). Las ocho distancias fueron:

- 25 cm ($\frac{1}{4}$ de la longitud de referencia)
- 50 cm ($\frac{1}{2}$ de la longitud de referencia)
- 75 cm ($\frac{3}{4}$ de la longitud de referencia)
- 100 cm (longitud de referencia)
- 125 cm ($1 \frac{1}{4}$ de la longitud de referencia)
- 150 cm ($1 \frac{1}{2}$ de la longitud de referencia)
- 175 cm ($1 \frac{3}{4}$ de la longitud de referencia)
- 200 cm (doble de la longitud de referencia)

En este caso, fue el propio sujeto quien desplazó la varilla móvil con la ayuda de una varilla extensible.

Las instrucciones del experimento B2 se expresaron en los siguientes términos:

“Tomando como referencia la distancia que hay entre tus ojos y la varilla fija, la tarea consiste en que ajustes la varilla móvil hasta una distancia respecto la varilla fija que te será especificada en cada ensayo, por ejemplo, a la mitad de distancia o al doble de distancia. Las varillas podrán estar orientadas a 0° , a 45° o a 90° y aparecerán contra un fondo que podrá ser negro o bien una rejilla plana, cóncava o convexa.”

Para cada una de las ocho distancias, los observadores realizaron 3 ajustes tanto en la condición visual 2D como en la 3D, por lo que los bloques de medidas correspondientes a una combinación de orientación (0° , 45° y 90°) y de fondo (cóncavo, convexo, plano o negro) contenían 24 ajustes. Si en algún caso una de las tres medidas repetidas fue claramente distinta a las otras dos, se repitió el proceso una cuarta vez para elegir los tres ajustes menos dispares. El orden de realización de los ajustes para cada proporción fue aleatorio, así como la presentación de las orientaciones y de los fondos. Ello implica que los sujetos realizaron, para cada condición visual (2D o 3D), 288 juicios de comparación válidos, resultado de combinar las 3 repeticiones, las 8 proporciones, las 3 orientaciones y los 4 fondos.

Con el fin de fomentar un alto rendimiento en la tarea y mantener la atención del observador, se dosificaron los ensayos en 4 sesiones de 3 bloques cada una. El tiempo medio empleado en realizar un bloque de 24 ajustes fue de 10 minutos y después de cada bloque se efectuó un descanso de 5 minutos aproximadamente, tiempo necesario también para cambiar las condiciones del montaje experimental (fondo y/o orientación).

4.4.1.4. Análisis de datos

Los descritos en el apartado anterior son experimentos de producción de razones o de proporciones, donde el observador “produce” las distancias que le pide el experimentador y dichas distancias son siempre proporcionales a otra de referencia. Por este motivo, la evaluación de la exactitud y de la precisión de las tareas visuales

realizadas por los observadores se llevó a cabo en el marco metodológico propuesto por la psicofísica de Stevens para este tipo de experimentos. Así, la *exactitud* de la respuesta fue evaluada mediante el *error cuadrático medio* RMSE (Root Mean Square Error), calculado como la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre los valores medios de los juicios realizados por el sujeto (\bar{x}) y el valor físico al cual debía ajustarse la varilla (x_f), dividida por el número de observaciones (n).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x_f)^2}{n}}$$

El RMSE tiene unidades (cm, en nuestro caso) pero, al ser las distancias a la varilla fija iguales en 2D y en 3D (1 metro), los valores que se obtuvieron en ambas condiciones visuales pueden ser directamente comparables.

Por otra parte, la *precisión* de la respuesta fue estimada a partir de la relación exponencial existente entre el valor físico del estímulo E y la sensación S que provoca, según la psicofísica de Stevens.

$$S = k \cdot E^n$$

El valor del exponente “ n ” es la pendiente de la recta que relaciona $\log_{10}S$ con $\log_{10}E$ ($\log_{10} S = k + n \cdot \log_{10} E$) y se utiliza como indicador de la precisión del observador realizando la tarea ya que, cuanto más abrupta sea, mayor precisión presentará el sujeto. Cuando n es igual a 1, la relación entre el estímulo físico y la sensación es proporcional.

Al igual que ocurría en los experimentos A1 y A2, se aplicó un ANOVA de medidas repetidas a los datos correspondientes tanto a exactitud como a precisión. La fórmula del diseño experimental fue $2 \times 4 \times 3$, siendo los factores la condición visual (2D o 3D), el fondo (negro, cóncavo, convexo o plano) y la orientación (0° , 45° y 90°). En aquellos casos en que no se cumplió el supuesto de esfericidad, se aplicó el corrector epsilon (ϵ) de Greenhouse-Geisser al ANOVA, que corrige los grados de libertad. El grado de significación establecido en todos los análisis fue del 95% ($p < 0.05$).

4.4.2. Resultados

4.4.2.1. Análisis de la exactitud

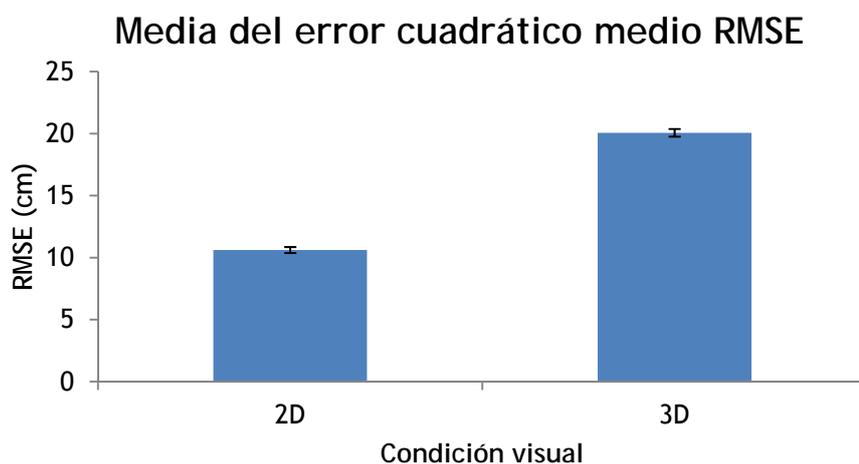
La exactitud de los sujetos se analizó a partir del RMSE. Se esperaba que la variabilidad del conjunto de valores RMSE obtenidos pudiera ser justificada por los factores que definen las distintas condiciones experimentales: condición visual (2D o 3D), fondo (negro, cóncavo, convexo o plano) y orientación (0° , 45° y 90°). Con el fin de determinar qué factor o combinación de factores contribuía a explicar significativamente dicha variabilidad, se aplicó una ANOVA de medidas repetidas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resultados de la ANOVA de medidas repetidas "Condición visual x Fondo x Orientación" a partir de los datos de error cuadrático medio (RMSE.) En la tabla aparecen los factores principales, así como las interacciones de segundo y tercer orden entre factores

Factor	Grados libertad	F	Sig.
Condición visual	(1,11)	1249.234	0.0001
Fondo	(3,33)	34.820	0.0001
Orientación	(2,22)	83.213	0.0001
Condición visual x Fondo	(3,33)	1.664	0.201
Condición visual x Orientación	(2,22)	7.503	0.005
Fondo x Orientación	(6,66)	0.301	0.880
Condición visual x Fondo x Orientación	(6,66)	0.054	0.992

Tan sólo los efectos principales de los factores y la interacción "Condición visual x Orientación" resultaron ser significativos (marcados sobre fondo azul) y se van a analizar con detalle a continuación.

La figura 4.24 muestra el RMSE medio obtenido por los participantes en cada condición visual, colapsando los datos correspondientes a los distintos fondos y orientaciones, junto con las barras del error típico.

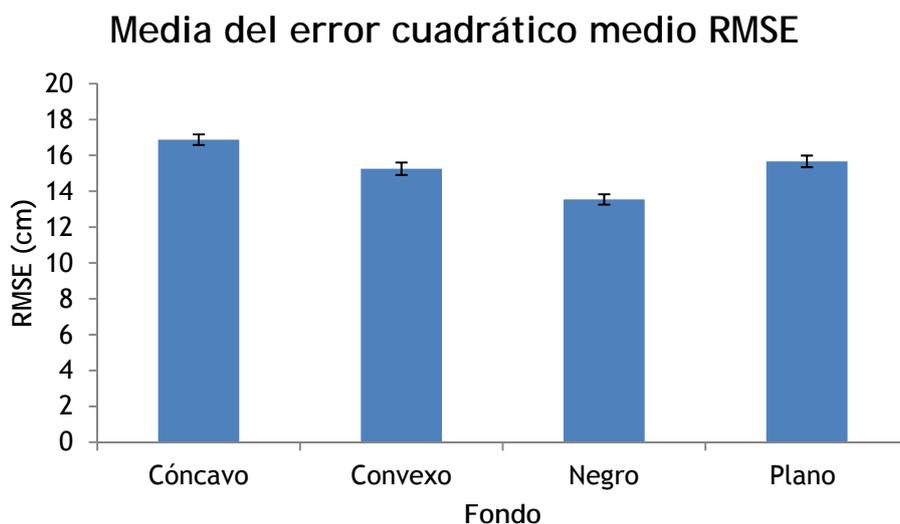


Condición visual	RMSE medio (cm)	Error típico (cm)
2D	10.61	0.241
3D	20.08	0.307

Figura 4.24. Error cuadrático medio (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes en las condiciones visuales 2D y 3D

La exactitud ha sido mayor en 2D, presentando un valor que es prácticamente la mitad del obtenido en 3D. Teniendo en cuenta que la distancia hasta la varilla fija era de 1 metro, los errores obtenidos en estos experimentos son del 10% en 2D y del 20% en 3D, valores muy superiores a los obtenidos en los experimentos A (valores de error constante relativo medios del 4% en 2D y del 7% en 3D).

La figura 4.25 muestra el RMSE medio obtenido para cada tipo de fondo, colapsando los datos de las condiciones visuales y de las orientaciones.

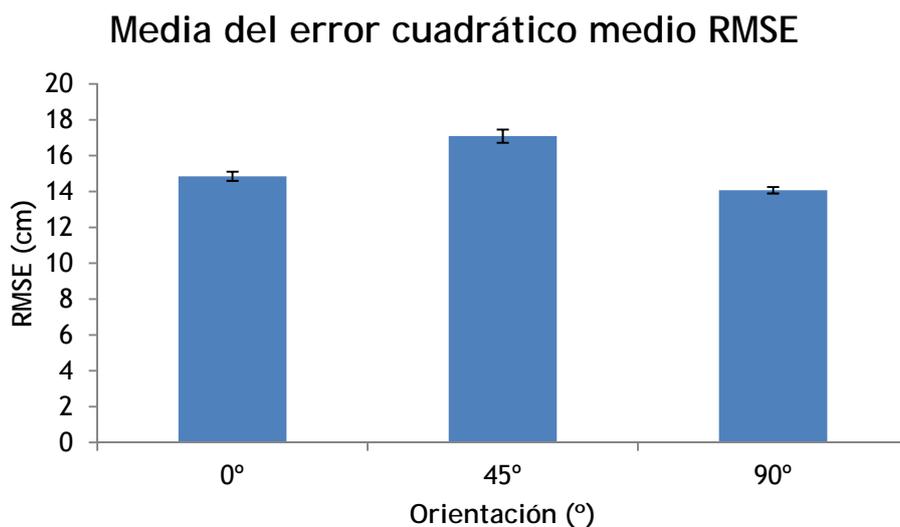


Fondo	RMSE medio (cm)	Error típico (cm)
Cóncavo	16.897	0.294
Convexo	15.275	0.349
Negro	13.536	0.289
Plano	15.663	0.325

Figura 4.25. Error cuadrático medio (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes en función del tipo de fondo

Todas las diferencias entre fondos (exceptuando el convexo y el plano entre ellos) fueron estadísticamente significativas, como se infiere por la falta de solapamiento de las barras de error en la figura 4.25. Este resultado viene corroborado por el ajuste de Bonferroni para comparaciones múltiples, donde todas las diferencias de medias dieron como resultado valores de significación $p < 0.05$, excepto la correspondiente a fondos convexo y plano. Además, puede apreciarse que la ausencia de fondo (negro) proporcionó el resultado más alto de exactitud, ya que el RMSE fue menor. Utilizando fondo cóncavo, al igual que ocurría en los experimentos A, se obtuvo el RMSE más alto (lo que equivale a una exactitud menor). Los fondos convexo y plano presentaron aproximadamente el mismo comportamiento.

La figura 4.26 muestra el RMSE medio obtenido para cada orientación, colapsando los datos de las condiciones visuales y de los fondos.

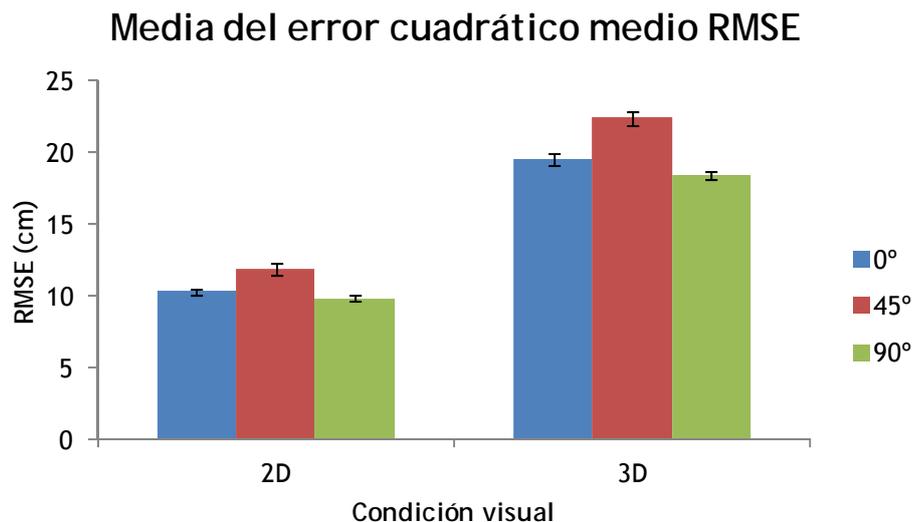


Orientación	RMSE medio (cm)	Error típico (cm)
0°	14.865	0.255
45°	17.089	0.37
90°	14.074	0.179

Figura 4.26. Error cuadrático medio (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes, en función de la orientación

Al igual que ocurría en los experimentos A, en la orientación de 45° se deterioró la exactitud respecto a las otras orientaciones, por lo que el efecto oblicuo se manifestó significativamente. Además, a 90° se obtuvo el valor de RMSE más bajo. Todas las comparaciones entre medias resultaron ser estadísticamente significativas, como se infiere de las barras de error no solapadas de la figura 4.26 y como corroboraron los contrastes de Bonferroni (cuyos valores “p” han sido inferiores a 0.003 en todos los casos).

Dado que la interacción entre los factores “Condición visual x Orientación” fue significativa, la figura 4.27 muestra el RMSE medio obtenido por los participantes en función de ambos factores, colapsando los datos correspondientes a los distintos fondos.



Orientación	Condición visual 2D		Condición visual 3D	
	RMSE (cm)	Error típico (cm)	RMSE (cm)	Error típico (cm)
0°	10.254	0.238	19.448	0.392
45°	11.815	0.403	22.359	0.473
90°	9.763	0.195	18.381	0.266

Figura 4.27. Error cuadrático medio (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes, en función de la orientación y de la condición visual

Dicha figura muestra que, aunque la interacción “Condición visual x Orientación” alcanzó significación estadística, se trató de una interacción débil, dado que la tendencia general en la variación del RMSE en función de la orientación fue similar: se aprecia la manifestación significativa tanto del efecto oblicuo como de la anisotropía vertical-horizontal en ambas condiciones visuales.

4.4.2.2. Análisis de la precisión

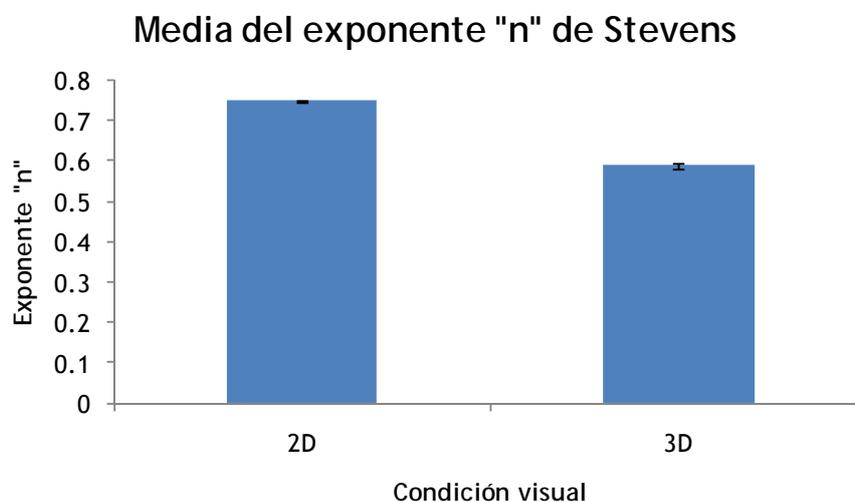
La precisión de los sujetos se analizó a partir del exponente “n” de la función de Stevens (función potencial). Se esperaba que la variabilidad del conjunto de valores del exponente “n” obtenidos pudiese ser justificada por los factores que definían las distintas condiciones experimentales: condición visual (2D o 3D), fondo (negro, cóncavo, convexo o plano) y orientación (0°, 45° y 90°). Con el fin de determinar qué factor o combinación de factores explicaba significativamente dicha variabilidad, se aplicó una ANOVA de medidas repetidas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resultados de la ANOVA de medidas repetidas "Condición visual x Fondo x Orientación" a partir de los datos del exponente "n" de Stevens. En la tabla aparecen los factores principales, así como las interacciones de segundo y tercer orden entre factores

Factor	Grados libertad	F	Sig.
Condición visual	(1,16)	324.629	0.0001
Fondo	(3,48)	116.845	0.0001
Orientación	(2,32)	33.932	0.0001
Condición visual x Fondo	(3,48)	8.193	0.002
Condición visual x Orientación	(2,32)	0.912	0.410
Fondo x Orientación	(6,96)	1.835	0.151
Condición visual x Fondo x Orientación	(6,96)	2.960	0.039

Los efectos principales de los factores y las interacciones marcadas en azul en la tabla 4.5 han alcanzado significación estadística, y serán los que se comentarán en esta sección.

La figura 4.28 muestra el valor medio de "n" obtenido por los participantes en cada condición visual, junto con las barras del error típico, una vez colapsados los datos correspondientes a las diferentes orientaciones y fondos.



Condición visual	Exponente "n" medio	Error típico
2D	0.749	0.002
3D	0.588	0.006

Figura 4.28. Exponente "n" de la función de Stevens (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes en las condiciones visuales 2D y 3D

Cuanto mayor es el valor del exponente “n”, mayor es la precisión. Del análisis de la figura 4.28 se deduce, una vez más, que la precisión de los observadores en la condición visual 2D fue significativamente superior a la de la condición 3D (valores de 0.749 y de 0.558 respectivamente). Además, puesto que los exponentes “n” hallados fueron menores a 1, se produjo una subestimación de las distancias percibidas en ambas condiciones visuales.

La figura 4.29 muestra el valor medio de “n” obtenido por los participantes en función del tipo de fondo, junto con las barras del error típico, colapsando los datos de las diferentes condiciones visuales y orientaciones.

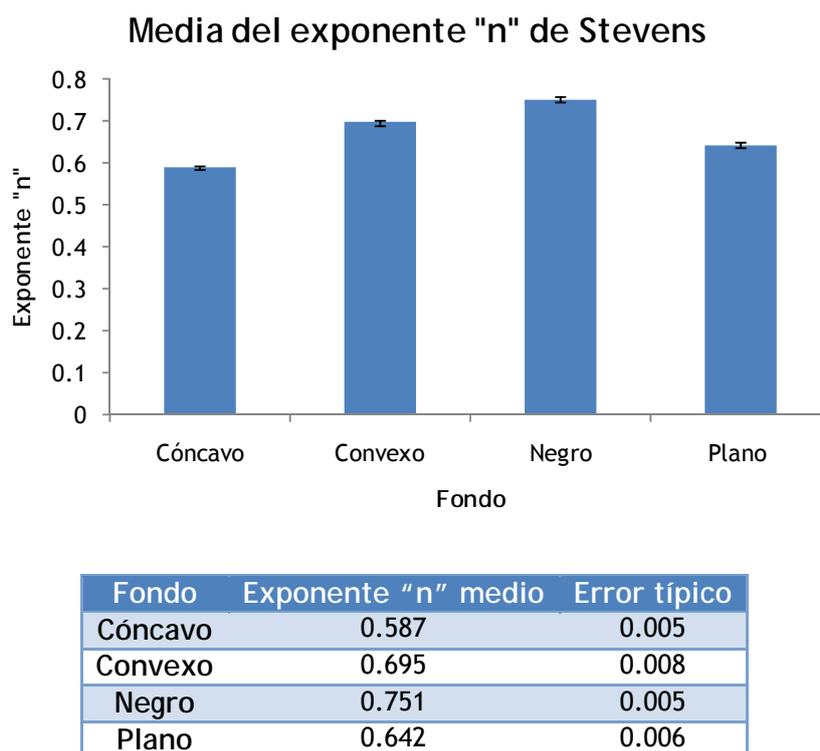
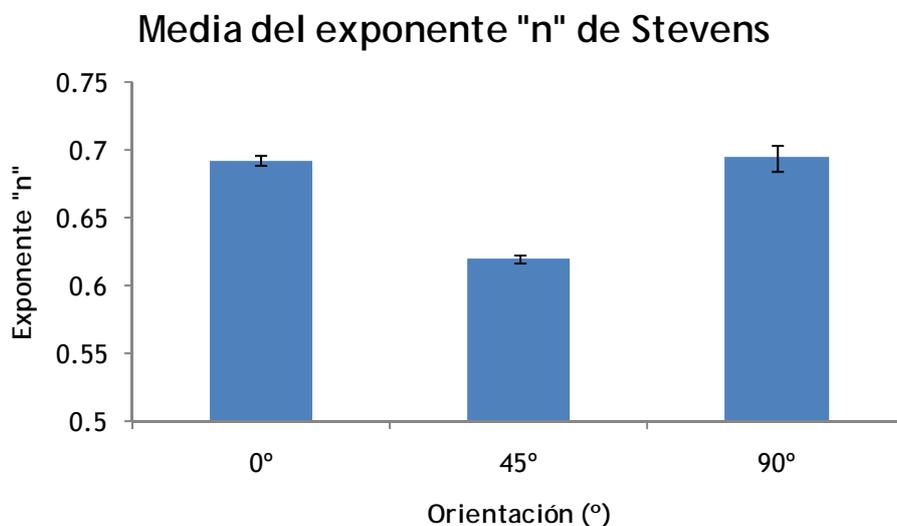


Figura 4.29. Exponente “n” de la función de Stevens (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes en función del tipo de fondo

Es destacable señalar que se obtuvo el valor más elevado de precisión para fondo negro y el más bajo para fondo cóncavo, lo que es congruente con los resultados correspondientes a exactitud y también a los hallados en los experimentos A. Los fondos convexo y plano, al igual que ocurría con la exactitud, se situaron en medio de ambos extremos y sus valores de precisión fueron semejantes. Todas las comparaciones por pares entre fondos fueron estadísticamente significativas, como se infiere de las barras de error no solapadas de la figura 4.29 y como corroboraron los contrastes de Bonferroni (cuyos valores “p” han sido inferiores a 0.004 en todos los casos).

La figura 4.30 muestra el valor del exponente “n” obtenido en función de la orientación, colapsando los datos de las condiciones visuales y de los fondos.

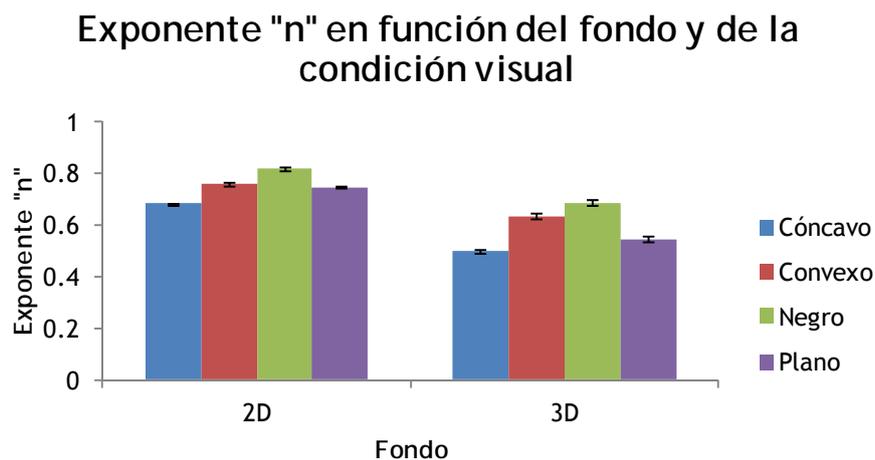


Orientación	Exponente "n" medio	Error típico
0°	0.692	0.004
45°	0.620	0.003
90°	0.694	0.009

Figura 4.30. Exponente “n” de la función de Stevens (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes, en función de la orientación

El análisis de la figura 4.30 muestra una marcada aparición del efecto oblicuo (el valor del exponente “n” es muy inferior al de las otras orientaciones), pero la diferencia existente entre 0° y 90° no alcanzó el grado de significación estadístico establecido por lo que, en este caso, no se manifestó la anisotropía vertical-horizontal.

Con el fin de analizar la interacción significativa entre “Condición visual x Fondo”, la figura 4.31 representa los valores del exponente “n” en función de ambos factores.



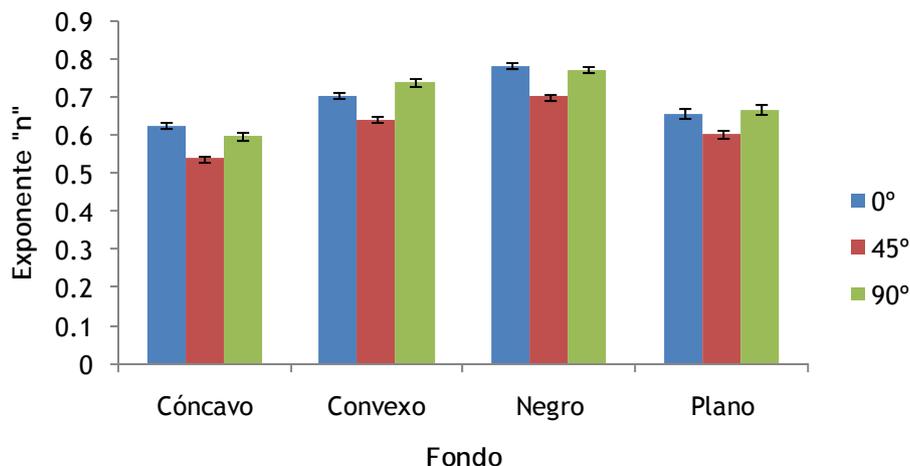
Fondo	Condición visual 2D		Condición visual 3D	
	Exponente "n"	Error típico	Exponente "n"	Error típico
Cóncavo	0.680	0.003	0.494	0.008
Convexo	0.758	0.007	0.631	0.011
Negro	0.816	0.005	0.685	0.008
Plano	0.742	0.004	0.542	0.010

Figura 4.31. Exponente "n" de la función de Stevens (media y error típico) obtenido por los sujetos participantes, en función del fondo y la de la condición visual

La figura anterior muestra que la interacción "Condición visual x Orientación" fue débil, a pesar de haber alcanzado significación estadística. Ello se deduce al observar que la variación del exponente "n" fue similar en ambas condiciones visuales, para cada fondo. En todo caso, el fondo negro proporcionó el resultado más preciso en ambas condiciones visuales, mientras que el cóncavo presentó la tendencia opuesta.

La figura 4.32 muestra el valor medio del exponente "n" obtenido por los participantes en función del fondo y de la orientación, colapsando los datos correspondientes a la condición visual.

Exponente "n" en función del fondo y de la orientación (datos 2D y 3D colapsados)



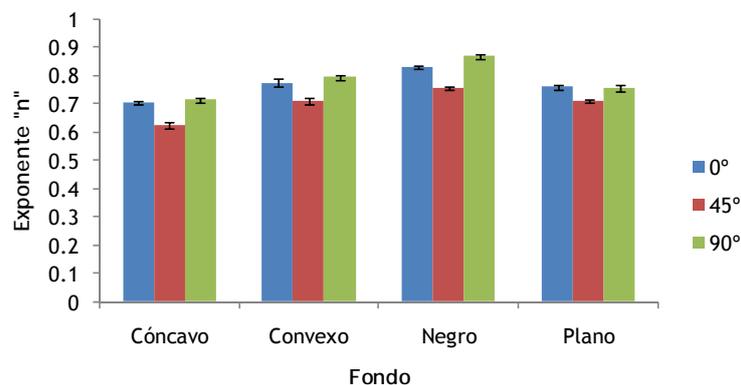
Orientación	Tipo de fondo							
	Cóncavo		Convexo		Negro		Plano	
	Valor n	E.típico	Valor n	E.típico	Valor n	E.típico	Valor n	E.típico
0°	0.625	0.009	0.704	0.009	0.782	0.009	0.657	0.011
45°	0.538	0.007	0.641	0.009	0.699	0.008	0.601	0.009
90°	0.597	0.009	0.739	0.010	0.772	0.009	0.667	0.012

Figura 4.32. Exponente "n" de Stevens (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, en función del fondo y de la orientación

A pesar de que esta interacción no alcanzó significación estadística, la orientación de 45° mostró el resultado más bajo de precisión para todos los fondos analizados. Las orientaciones de 0° y 90° mostraron diferencias significativas entre ellas para los fondos cóncavo y convexo, aunque en los fondos negro y plano tal anisotropía cardinal no apareció.

Con el fin de analizar con mayor detalle la interacción triple "Condición visual x Fondo x Orientación", la figura 4.33 muestra el valor medio del exponente "n" obtenido por los participantes en función del fondo y de la orientación, para cada condición visual separadamente.

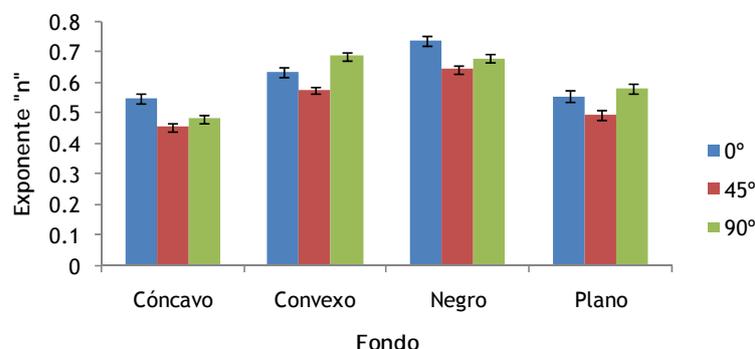
Exponente "n" en función del fondo y de la orientación (condición visual 2D)



Orientación	Tipo de fondo							
	Cóncavo		Convexo		Negro		Plano	
	Valor n	E. típico	Valor n	E. típico	Valor n	E. típico	Valor n	E. típico
0°	0.704	0.006	0.774	0.013	0.828	0.006	0.759	0.009
45°	0.623	0.011	0.709	0.011	0.755	0.008	0.710	0.007
90°	0.714	0.008	0.793	0.008	0.866	0.009	0.756	0.011

(a)

Exponente "n" en función del fondo y de la orientación (condición visual 3D)



(b)

Orientación	Tipo de fondo							
	Cóncavo		Convexo		Negro		Plano	
	Valor n	E. típico	Valor n	E. típico	Valor n	E. típico	Valor n	E. típico
0°	0.547	0.017	0.634	0.017	0.735	0.017	0.554	0.021
45°	0.453	0.012	0.574	0.012	0.642	0.012	0.493	0.016
90°	0.481	0.014	0.685	0.014	0.678	0.014	0.579	0.015

Figura 4.33. Exponente "n" de Stevens (media y error típico) obtenida por los sujetos participantes, en función del fondo y de la orientación, para la condición visual 2D (a) y para la condición visual 3D (b)

El análisis de la figura anterior permite observar la manifestación del efecto oblicuo en ambas condiciones visuales, al igual que ocurría analizando los resultados con los datos colapsados. Sin embargo, la anisotropía vertical-horizontal apareció más claramente en la condición visual 3D, mientras que en 2D sólo se produjo para fondo negro. En general, las diferencias entre fondos fueron más destacables en la condición 3D que en la 2D.

4.4.3. Discusión

Los resultados de los experimentos B1 y B2, cuyos objetivos fueron explorar la influencia del fondo y de la orientación sobre la exactitud y la precisión de los sujetos realizando juicios de distancias, en un entorno real y a una escala distinta (espacio más extenso), mediante una adaptación del aparato de Howard Dolman, ponen de manifiesto que:

a) Respecto a la *condición visual (2D o 3D)*:

- El efecto principal de este factor fue significativo tanto en *exactitud* como en *precisión*.
- En general, la *exactitud* y la *precisión* fueron mejores en 2D que en 3D. Respecto a la *exactitud*, el orden de magnitud de los errores cuadráticos medios obtenidos ha sido del 20% en 3D y del 10% en 2D. Algunos estudios clásicos han informado de valores semejantes a los hallados por nosotros. Así, Epstein (1963) halló desviaciones en la exactitud de los sujetos al juzgar distancias y tamaños que oscilaban entre el 10 y el 20%. Por otra parte, Silver y Farber (1968) indican errores del 7% en los juicios de distancia que realizan los conductores en el adelantamiento de vehículos. Así pues, parece existir una gran variabilidad en los resultados obtenidos respecto al juicio de distancias. Tales diferencias pueden estar justificadas por el hecho de que algunos trabajos se basaron en la estimación de distancias egocéntricas, cuyos resultados suelen ser diferentes que los obtenidos en juicios de distancias exocéntricas (ver apartado 2.1.2), como los realizados en este trabajo doctoral. En lo que respecta a *precisión*, el valor del exponente “n” ha presentado unos valores medios de 0.75 para la condición visual 2D y de 0.59 en la condición 3D. Aznar-Casanova et al (2006), en un experimento de ajuste de distancias exocéntricas, reportaron valores del exponente “n” de 1.015 en la condición visual 2D, de 0.63 en la condición visual 3D en entorno virtual y de 0.915 en la condición visual 3D en entorno real. Fontes, Barbero y Fontes (1994), en una tarea de juicio de estimación de distancias exocéntricas, hallaron valores del exponente “n” que oscilan entre 0.73 y 1.02, en función del rango en el que oscilaban los valores de los estímulos. Da Silva (1985) reportó un valor promedio de 0.9 en el ajuste de distancias egocéntricas. Igualmente, Wiest y Bell (1985) obtuvieron exponentes entre 1.08 y 0.75 en

un trabajo similar. Ello indica que los valores obtenidos en este estudio en la condición visual 2D se aproximan considerablemente a los referenciados en otros estudios afines, mientras que los obtenidos en 3D son sustancialmente menores.

- Se ha producido una *subestimación* de las distancias percibidas, tanto en la condición visual 2D como en la 3D, como se deduce de los resultados obtenidos en el exponente “n” (menores a 1 en todos los casos). Como se vio en el apartado 4.1.2, este fenómeno está ampliamente reportado en la literatura científica para la condición visual 3D. Por ejemplo, Swan et al (2007) hallaron que las estimaciones de distancias egocéntricas en un entorno real eran de un 96% del auténtico valor de distancia en un rango que oscilaba entre 3 y 7 metros. Proffitt et al (2003) hallaron una subestimación en la percepción de distancias que disminuía con el aumento del esfuerzo del sujeto. Por lo tanto, nuestros resultados están de acuerdo con la tendencia general apuntada en otros trabajos en lo que respecta a la condición visual 3D. Sin embargo, como se vio en el apartado 4.3.3, diversos estudios científicos similares reportan una *sobreestimación* de las distancias percibidas en el plano frontoparalelo (2D), por lo que nuestros resultados no están de acuerdo con tal tendencia general.

b) Respecto el *fondo*:

- El efecto principal de este factor fue significativo tanto en *exactitud* como en *precisión*.
- Se ha hallado la más baja *exactitud* y *precisión* para fondo cóncavo, mientras que la ausencia de fondo ha proporcionado los mejores resultados. Una tarea importante que debe realizar nuestro sistema visual es percibir aislada y correctamente los objetos presentes en el campo visual, lo que requiere la segregación de éstos respecto los fondos contra los que se perciben (Loffler, 2008). La razón por la cual la exactitud y precisión menores fueron encontradas con fondos cóncavos, al igual que ocurría en los experimentos A, podría ser debida a la mayor interferencia que produce éste en la tarea, al ajustarse mejor a la curvatura natural de la retina (D'Alessandro, 2008). De hecho, la exactitud y la precisión fueron notablemente mejores mediante fondos convexos, con valores muy similares a los obtenidos en fondo negro. Sin embargo, los resultados de los participantes fueron mejores cuando los estímulos se observaron sobre un fondo negro en ambas condiciones visuales, un hallazgo que podría abogar por un impacto negativo de cualquier tipo de fondo sobre la percepción de estímulos situados en frente de él.

c) Respecto la *orientación*:

- El efecto principal de este factor fue significativo tanto en *exactitud* como en *precisión*.
- Para cualquier combinación de fondo y de condición visual, la *exactitud* y la *precisión* fueron menores para la orientación de 45°, lo que ilustra el bien documentado efecto oblicuo (Appelle, 1972).
- La anisotropía vertical-horizontal sólo se ha manifestado significativamente en las medidas de *exactitud*. En el caso de la *precisión*, esta propiedad tuvo lugar especialmente en la condición visual 3D, mientras que en la condición 2D sólo se produjo para fondo negro.

d) Respecto las *interacciones entre factores*:

- En el caso de la *exactitud*, sólo la interacción *Condición Visual x Orientación* han resultado significativa. Para la *precisión*, en cambio, las interacciones que alcanzaron el grado de significación estadística requerido fueron *Condición Visual x Fondo* y *Condición Visual x Fondo x Orientación*. Resulta interesante remarcar, por lo tanto, que el fondo ha afectado a los resultados de exactitud del mismo modo en las condiciones visuales 2D y 3D, mientras que su efecto ha sido significativamente diferente en las medidas de precisión entre ambas condiciones visuales. Análogamente, la orientación ha afectado de modo diferente a las medidas de exactitud en las condiciones 2D y 3D, pero no lo ha hecho en las de precisión, donde su efecto ha sido el mismo para ambas condiciones visuales. Así pues, las interacciones halladas entre las medidas de *exactitud* y las de *precisión* han mostrado severas diferencias, lo que es indicativo de que ambos índices evalúan aspectos distintos del rendimiento en una tarea psicofísica.
- Respecto a la *precisión*, al analizar la interacción *Fondo x Orientación* en cada condición visual por separado, se observa que el efecto oblicuo se ha manifestado significativamente en ambas, mientras que la anisotropía vertical-horizontal apareció de un modo más destacado en la condición visual 3D. Este hallazgo indica que la potencia del efecto oblicuo ha sido superior a la de la anisotropía vertical-horizontal en este estudio. Una posible explicación sería la misma que se apuntó en el experimento virtual, a saber: en la condición visual 2D, los juicios de distancias para la orientación de 90° (vertical) se realizaban sobre el eje *x* (horizontal), y viceversa. Posiblemente se haya producido un enmascaramiento entre las direcciones de las varillas y las de los juicios, causando que no haya aparecido de forma marcada la anisotropía vertical-horizontal.

4.5. Discusión general

A pesar de las diferencias existentes en el diseño de los estudios (entornos virtuales frente a reales), en la escala de los experimentos y, por tanto, en la instrumentación, en el equipo experimental y en la metodología, es interesante comparar los resultados de ambos experimentos para comentar las coincidencias y las diferencias, siempre con las reservas necesarias.

Respecto a la *Condición Visual*:

- Este factor ha alcanzado el grado de significación estadística requerido, tanto en las medidas de *exactitud* como en las de *precisión*, en ambos entornos (real y virtual).
- Se ha producido una *subestimación* en la percepción de distancias relativas en profundidad, como se deduce de las funciones psicométricas obtenidas en el experimento A2 y de los valores del exponente “n” del experimento B2. Esta subestimación ha sido ampliamente reportada en la literatura científica (ver apartados 4.1.2 y 4.4.3).
- Los resultados en la condición 2D fueron más exactos y precisos que en la condición 3D. Aznar-Casanova et al (2006) realizaron un estudio, con algunas similitudes al nuestro, en el que compararon el rendimiento de un grupo de sujetos juzgando distancias exocéntricas en tres condiciones visuales diferentes: 2D, 3D en un entorno virtual y 3D en un entorno real provisto de diversas pistas. El resultado más cercano a la constancia en los juicios de distancias percibidas (exponente “n” igual a 1.015) se obtuvo para la condición visual 2D, mientras que para las condiciones visuales 3D (real o virtual) se produjo una subestimación en los juicios. Cuijpers, Kappers y Koenderink (2000, 2002) estudiaron la percepción del paralelismo y de la colinealidad, concluyendo que la geometría del espacio visual difería en función de la tarea. Más recientemente, Doumen, Kappers y Koenderink (2006) han realizado otros experimentos cuyas conclusiones apuntan que la curvatura del espacio visual varía en función de la distancia relativa entre objetos, aunque es sabido que tal curvatura depende también de una multiplicidad de factores como el tipo de tarea visual (Doumens, Kappers y Koenderink, 2005) o la demanda visual (Koenderink et al, 2002). Todos estos trabajos apuntan hacia la existencia de una anisotropía del espacio visual.
- Respecto a la *exactitud*, el orden de magnitud de los errores cuadráticos medios obtenidos en un entorno real (experimentos B) ha sido del 20.08% en 3D y del 10.61% en 2D, valores claramente superiores a los hallados en un entorno virtual (experimentos A), donde los errores constantes relativos han oscilado entre el 4% (2D) y el 7% (3D). Sin embargo, las diferencias existentes entre los experimentos realizados en un entorno virtual (experimentos A) y los

realizados en un entorno real (experimentos B), tanto metodológicas como de escala, introducen grandes obstáculos a la comparación directa entre ambas magnitudes.

- Existe cierto consenso en que la percepción de las distancias se distorsiona más en los entornos virtuales que en los entornos reales (Plumert et al, 2005), aunque otros estudios han hallado un mismo grado de error en juicios de distancias entre ambos entornos. Concretamente, Witmer y Sadowski (1998) encontraron que los errores en la estimación de distancias oscilaron entre 1 y 11% en un entorno real y entre el 2 y el 18% en un entorno virtual. Un estudio reciente de Interrante, Anderson y Ries (2004) mostró de forma similar que las personas fueron muy precisas caminando con los ojos vendados hacia un objetivo previamente visualizado, tanto en un espacio real como en un entorno virtual. Sahm et al (2005) también han hallado un mismo grado de comprensión en un entorno virtual y en uno real. En nuestro caso, se hace difícil la comparación directa de la magnitud de los errores entre ambos entornos debido a las importantes diferencias de escala existentes, por lo que resulta más conveniente comparar la proporción entre los errores cometidos en las condiciones visuales 2D y 3D para cada entorno. Así, las ratios obtenidas son de 1.75 en un entorno virtual y de 1.89 en un entorno real. En consecuencia, la comparación de las proporciones halladas entre los errores medios cometidos en las condiciones visuales 2D y 3D para cada entorno permite concluir que la distorsión de la percepción de distancias relativas entre ambas condiciones visuales (2D y 3D) es similar entre el entorno real y el virtual.

Respecto a la *Orientación*:

- Se ha manifestado claramente el efecto oblicuo (Appelle, 1972).
- Se ha observado una anisotropía vertical-horizontal entre las orientaciones 0° y 90°, aunque su manifestación no ha sido tan clara en alguna condición experimental (como en el caso de la precisión en 3D en entorno virtual). La tendencia ha sido siempre hacia un resultado más exacto y preciso para la orientación de 90°. Es destacable señalar, como se hizo en el apartado 4.3.3, que la anisotropía que hemos hallado en este estudio se ha producido en el juicio de distancias relativas entre objetos tanto en 2D como en 3D, por lo que se trata de un resultado novedoso en la literatura científica que es comparable, pero no idéntico, al de la ilusión vertical-horizontal, donde las longitudes verticales son sobreestimadas respecto las horizontales.

Los resultados de nuestro trabajo van, asimismo, a favor de la tendencia general observada en otros estudios puesto que, cuando los segmentos aparecían en vertical (a 90°), la distancia evaluada entre ambos era en horizontal. En efecto, el segmento fijo del par para la orientación de 90°, tanto en 2D como en 3D, estaba separado horizontalmente respecto el móvil, por lo que los juicios de distancia entre ambos se realizaban en horizontal.

Diversos estudios psicofísicos reportan que la discriminación de la orientación es mejor en horizontal que en vertical (Mustillo et al, 1988; Vandenbussche, Vogels y Orban, 1986; Heeley y Buchanan-Smith, 1990). Desde el punto de vista neurológico, aunque algunos estudios han hallado un número mayor de células sintonizadas horizontalmente que verticalmente (Liu y Pettigrew, 2003; Furmanski y Engel, 2000), algunos autores han reportado que tan sólo las células simples de la corteza presentan preferencia por la orientación (Orban y Kennedy 1981; Orban, Vandenbussche y Vogels, 1984), mientras que otros han hallado anisotropía meridional también en las células complejas (Henry, Goodwin y Bishop, 1978; Payne y Berman, 1983). Más actualmente, Aspell et al (2010) han hallado, mediante técnicas de neuroimagen, que los estímulos verticales activan áreas visuales corticales diferentes a los horizontales. Por otra parte, Mannion, McDonald y Clifford (2009, 2010) también han hallado tal anisotropía en V1 utilizando resonancias magnéticas funcionales.

La razón por la que el rendimiento visual puede ser superior para orientaciones horizontales no está clara, aunque tal vez jugaría un papel en la estabilidad postural, en relación con la línea del horizonte (Li, Peterson y Freeman, 2003).

Respecto el *fondo*:

- La presencia de un fondo ha causado un decremento de la exactitud y de la precisión en todas las tareas realizadas, siendo más notable para fondo cóncavo. Ello sugiere que cualquier tipo de fondo añade ruido a los estímulos, lo que entorpece el rendimiento visual de los observadores.

Respecto a las *interacciones entre factores principales*:

- A pesar de que las coincidencias entre ambos experimentos han sido lo más destacable, cabe comentar que las interacciones entre factores han diferido entre ambos entornos. Así, una interacción significativa en un entorno virtual deja de serlo en un entorno real, y viceversa. Ello es concordante con la teoría de que ambos entornos (real y virtual) no son equivalentes, lo que concuerda con los resultados obtenidos en otros trabajos de la literatura científica (Creem-Regehr et al, 2010; Swan et al, 2006; Messing y Durgin, 2005; Watt et al, 2005; Creem-Regehr et al, 2005; Loomis y Knapp, 2003).

5. Origen de las anisotropías del espacio visual desde un enfoque psicofísico

Este capítulo se subdivide en 5 apartados. En el primero de ellos (Introducción) se reseñan las contribuciones más relevantes de diversos estudios científicos relacionados con el trabajo que queremos desarrollar. Estos estudios versan sobre la anisotropía vertical-horizontal y los autoestereogramas de puntos aleatorios (SIRDS). En el segundo apartado se expone el objetivo del trabajo. El tercero está dedicado al desarrollo del experimento diseñado para hallar, mediante métodos no invasivos, el foco de las anisotropías del espacio visual. La exposición relativa al método se subdivide en: participantes, estímulos y aparatos, procedimiento y análisis de datos. El cuarto apartado muestra los resultados y, finalmente, la discusión constituye el último punto de este capítulo.

5.1. Introducción

Este experimento intentó hallar el lugar de la ruta visual donde se originan las anisotropías del espacio visual desde un enfoque psicofísico no invasivo, mediante el uso de autoestereogramas.

5.1.1. La anisotropía vertical-horizontal

Como se ha visto en el capítulo 4, numerosas evidencias neurofisiológicas y psicofísicas apuntan a la existencia del efecto oblicuo, de modo que el rendimiento alcanzado en la realización de tareas visuales cuando el test está orientado oblicuamente es inferior al obtenido con el test orientado cardinalmente. Otro efecto perceptual conocido es la Anisotropía Vertical-Horizontal que, en el caso de evaluación de longitudes, se conoce también como la Ilusión Vertical-Horizontal (IVH), según la cual la longitud de líneas orientadas verticalmente es a menudo sobrestimada respecto la misma longitud de líneas horizontales (Avery y Day, 1969).

Según algunos autores, esta ilusión es de una magnitud que oscila alrededor del 5%-10% de sobreestimación vertical (Prinzmetal y Gettleman, 1993; McGraw y Whittaker, 1999), aunque otros estudios han encontrado efectos mucho más grandes, desde un 20% hasta un 40% (Chapanis y Mankin, 1967; Higashiyama y Ueyama, 1988; Riener y Proffitt, 2002). La IVH ha sido estudiada con diferentes tests como, por ejemplo, mediante la comparación de una línea horizontal con otra vertical de la misma longitud (Künnapas, 1955), en forma de T invertida, conocida como la ilusión de la bisección (Post, O'Malley, Yeh y Bethel, 2006); en forma de L (Wolfe, Maloney y Tam, 2005) o en rectángulos (van Ee y Erkelens, 2000).

A pesar de que la IVH ha sido observada desde hace tiempo, todavía no se ha hallado una explicación suficientemente satisfactoria del fenómeno. Existen tres hipótesis explicativas principales sobre el origen de la IVH: la neurofisiológica (Hubel y Wiesel, 1962, 1968), la hipótesis de la perspectiva (Gregory, 1963) y la hipótesis del marco de referencia (Künnapas, 1957). Con respecto a la primera, diferentes investigaciones han hallado resultados que la apoyan, como la distribución inhomogénea de las células receptoras de la retina (De Valois, Yund y Hepler, 1982; De Valois y De Valois, 1988) o las neuronas de la región intraparietal caudal en primates, que pueden estar relacionadas con la capacidad de representación de formas tridimensionales (Tsutsui, Taira y Sakata, 2005). Respecto a la hipótesis de la perspectiva, la teoría de la profundidad implícita sugiere que las líneas verticales provocan un mecanismo de constancia de la medida que exagera la longitud aparente. Específicamente, una línea vertical en una imagen puede ser interpretada como una línea inclinada en profundidad en el entorno. Finalmente, según la teoría del marco de referencia, la IVH tiene lugar porque el campo visual binocular es aproximadamente como una elipse con su eje mayor alineado horizontalmente, por lo que el cociente entre la dimensión del campo horizontal (200°) por el campo

vertical (135°) aporta una relación de 1.48. Por lo tanto, una línea vertical ocupa una proporción más grande del meridiano vertical del campo visual que una línea horizontal de la misma longitud respecto la extensión horizontal.

Otra manifestación reportada de la anisotropía vertical-horizontal se refiere al sesgo perceptual que se produce en la percepción de una línea seccionada en dos partes, de modo que parece más corta que si no estuviese interrumpida. La bisección de líneas horizontales es usada como test clínico en pacientes con lesiones del hemisferio derecho que presentan defectos visuales. Las personas sin problemas bisectan la línea horizontal demasiado a la izquierda mientras que, si la línea es vertical, la bisección se realiza más arriba de lo correcto. Este juicio de longitudes es conocido como la *tarea de Landmark* (Harvey, Milner y Roberts, 1995).

Las anisotropías del espacio visual se ven alteradas tras lesiones cerebrales, como muestran los resultados de Fink et al (2001), quienes realizaron un estudio mediante resonancia magnética para comparar los patrones de activación cerebral en el desarrollo de la tarea de Landmark entre observadores normales y sujetos con problemas neurológicos, hallando notables diferencias.

Desde el punto de vista neurofisiológico, diversos estudios han hallado un número mayor de células sintonizadas horizontalmente que verticalmente (Liu y Pettigrew, 2003; Furmanski y Engel, 2000). Aspell et al (2010) han determinado recientemente, mediante métodos invasivos no perceptuales (resonancias magnéticas funcionales), que los patrones verticales activan áreas visuales corticales diferentes a los patrones horizontales. En la misma dirección, Mannion, McDonald y Clifford (2009, 2010) han hallado una anisotropía significativa en V1, con distintos patrones de respuesta en función de la orientación del estímulo. Parece, por lo tanto, que la orientación horizontal posee un mayor soporte neuronal, lo que provoca un mejor rendimiento visual.

Recientemente, Mamassian y de Montalembert (2010) han desarrollado un modelo matemático cuantitativo para separar los factores relevantes que contribuyen a esta ilusión, hallando que la anisotropía tiene un peso medio del 6%, mientras que el sesgo en la bisección aumenta hasta el 16%.

5.1.2. Autoestereogramas de puntos aleatorios SIRDS

Con el fin de aportar conocimiento sobre el origen de la anisotropía del espacio visual, se ha diseñado una serie de experimentos con estímulos tridimensionales que se presentaron a los observadores en formato de autoestereograma de puntos aleatorios o SIRDS (del inglés: Single Image Random Dot Stereogram). Estos autoestereogramas consisten en un único objeto bidimensional donde es posible visualizar un objeto tridimensional "oculto" (objeto aparente), si es observado con el ajuste entre convergencia y acomodación adecuado. Para que esto se produzca, es necesario que la imagen bidimensional contenga patrones repetidos en la dirección

horizontal que, en el caso de los SIRDS, se obtienen a partir de un patrón inicial de puntos aleatorios (Tyler y Clarke 1990).

En un SIRDS se combinan los efectos visuales de la conocida "Wallpaper Illusion" definida por Brewster en 1844 (McKee et al, 2007) con los de los estereogramas de puntos aleatorios RDS. La "Wallpaper Illusion" es la que se observa en un autoestereograma o SIS (Single Image Stereogram). Un SIS consiste en un patrón repetido horizontalmente que se visualiza desplazado en profundidad por detrás (fijación paralela) o por delante (fijación cruzada) del plano que lo contiene. El cerebro del observador fusiona pares de patrones adyacentes como si procedieran del mismo objeto a través de los ojos izquierdo y derecho, respectivamente, situando "subjétivamente" dicho objeto en profundidad (objeto aparente). La figura 5.1 muestra una explicación geométrica de la ilusión óptica descrita.

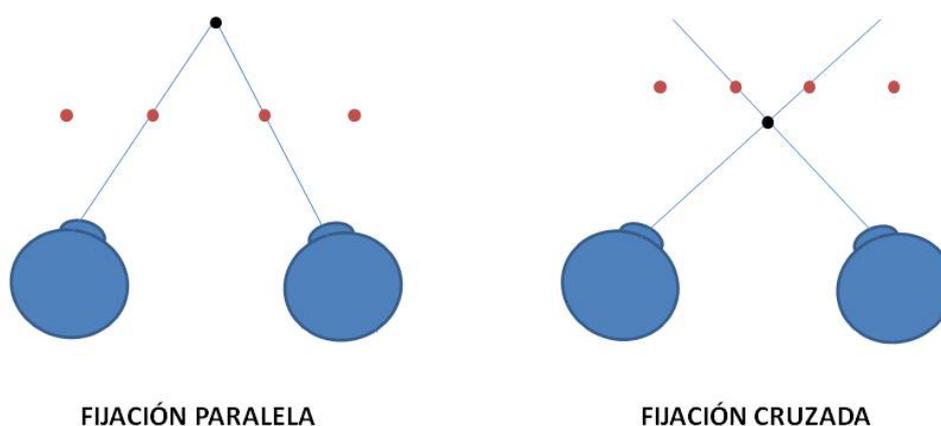


Figura 5.1. Ilustración de la percepción de un autoestereograma SIS: el observador visualiza el objeto aparente por detrás (fijación paralela) o por delante (fijación cruzada) del plano del patrón repetido horizontalmente

La figura 5.2 contiene un SIS que, observado con la convergencia adecuada, muestra los tres patrones repetidos en tres planos de profundidad diferentes, de modo que las filas superior e inferior se perciben más cercanas, las filas que contienen a los delfines quedan en el medio y la fila central se percibe más alejada.

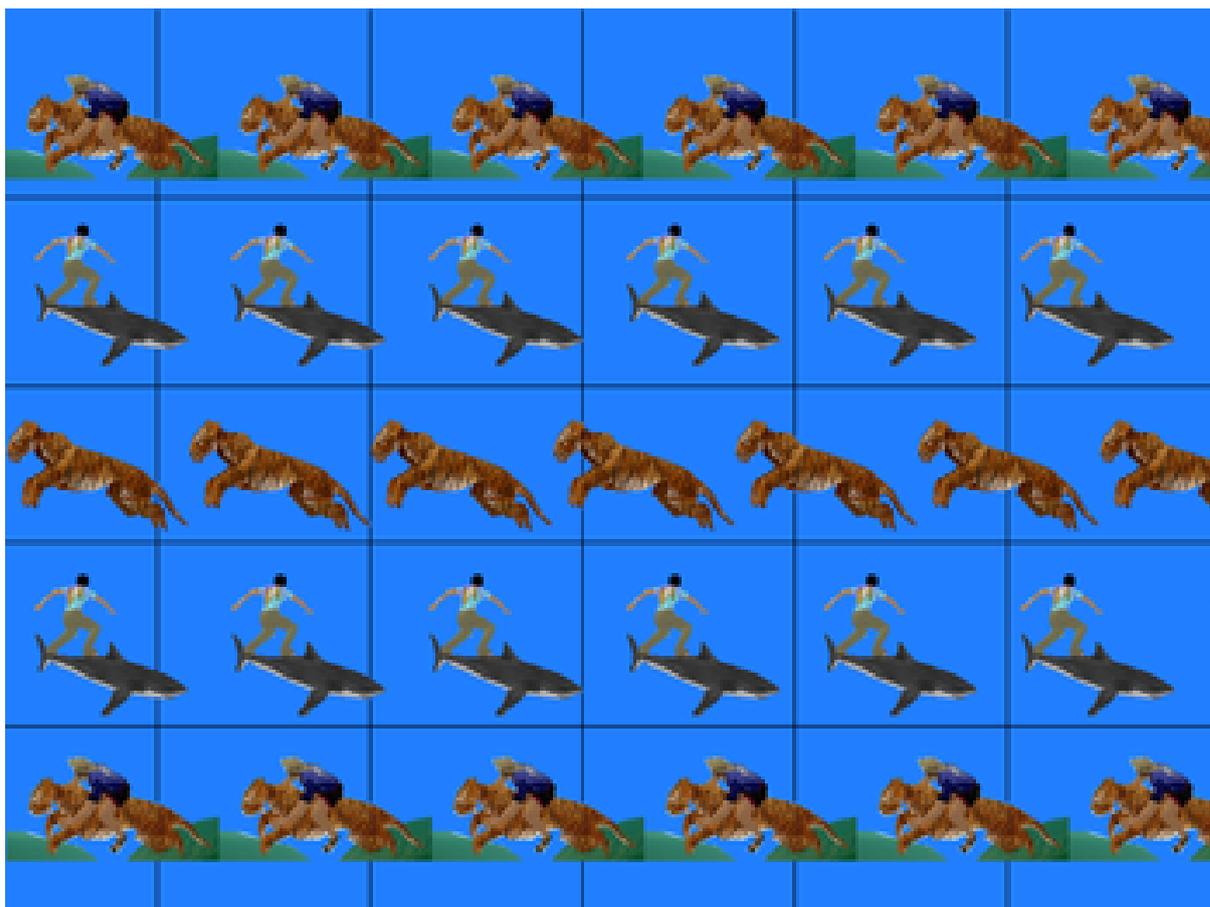


Figura 5.2. Autoestereograma SIS. Observado con la convergencia adecuada, se muestran los patrones en tres planos diferentes de profundidad (<http://en.wikipedia.org/wiki/Autostereogram>)

Dado que, en la percepción de la profundidad, el ángulo de convergencia es una pista importante, la profundidad a la que se encuentra el objeto virtual producido por un SIS depende de la distancia entre elementos idénticos consecutivos del patrón repetido contenido en el mismo.

Por otra parte, un RDS es un par estereoscópico cuya forma tridimensional, oculta en 2D, aparece solamente en condiciones binoculares. Tanto el fondo como la forma a percibir están rellenos con una textura de puntos aleatorios en blanco y negro, lo que causa que el sistema visual no pueda recibir información de forma ni de profundidad a partir de los indicios monoculares ni de la imagen retiniana, ya que sólo se poseerá tal información en el momento en el que se fusionen ambas imágenes. La visualización se puede realizar de forma libre (fusión libre), mediante dos filtros ópticos o utilizando un estereoscopio (figura 5.3). Este fenómeno fue descrito por Julesz (1971), se conoce como *percepción ciclópea* y constituyó la primera evidencia experimental de que la percepción tridimensional no se produce cuando la información visual llega a la retina, sino en una parte posterior de su recorrido.

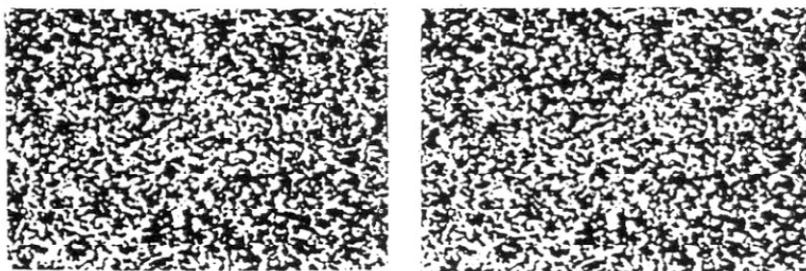


Figura 5.3. Estereograma RDS de Aschenbrenner (1954). Al fusionarse se lee la palabra LEAK

Debido a su fácil elaboración, este tipo de estereogramas son utilizados como test clínicos para la medida de la estereoagudeza, como por ejemplo en el test TNO.

En un SIRDS, el patrón que se repite contiene un patrón aleatorio de puntos, símbolos de diferentes tamaños o figuras (diferentes a la figura oculta). De este modo, son muchas las distancias entre objetos (puntos, símbolos o figuras individuales) que el SIRDS presenta al sistema visual para ser fusionados y, por tanto, también son numerosos los posibles planos en profundidad donde situar los objetos aparentes resultantes de la fusión de pares. Ello permite obtener como resultado la sensación de volumen (visión 3D) con gradientes suaves de profundidad (figura 5.4).

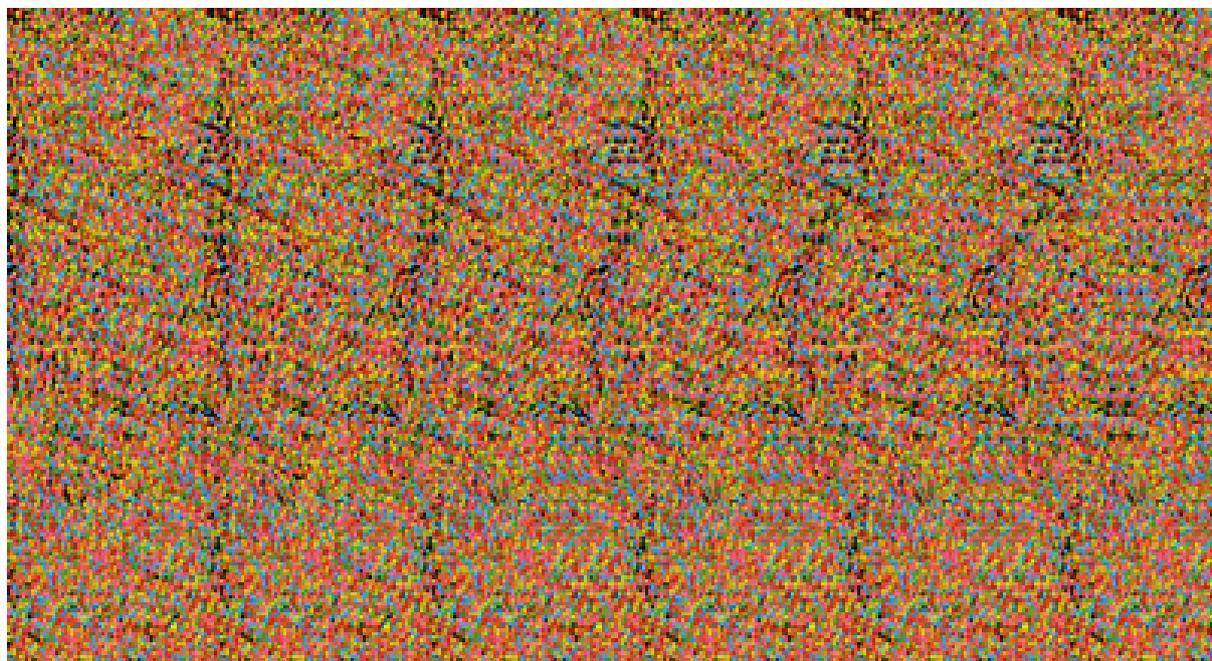


Figura 5.4. Autoestereograma de puntos aleatorios SIRDS que, observado adecuadamente, muestra la figura de un tiburón con volumen (<http://en.wikipedia.org/wiki/Autostereogram>, última consulta 8/05/2011)

La geometría del proceso de fusión de los SIRDS se representa en la figura 5.5.

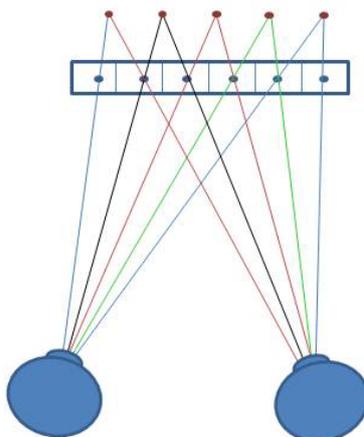


Figura 5.5. Geometría de la fusión de puntos en un SIRDS. El patrón repetido en horizontal (rectángulo azul con puntos) permite que los ojos derecho e izquierdo fusionen pares de puntos adyacentes entre sí, lo que produce sensación de profundidad (puntos rojos)

En un SIRDS se hace una presentación dicóptica, ya que cada ojo debe percibir una sola de las dos perspectivas plasmadas en el patrón repetitivo en dirección horizontal. Para lograr la visión haplóptica, estas dos perspectivas deben fusionarse, lo que se realiza tras superar el procesamiento de las neuronas sintonizadas binocularmente situadas a partir de V1 en la denominada vía dorsal (V2, V3, V5 y área caudal intraparietal) (Stidwill y Fletcher, 2011). Cuando se logra la visualización de la forma tridimensional implícita en un SIRDS, el sistema visual toma información del estereograma entero y solo así puede conseguir la percepción global de la escena 3D. Por tanto, la percepción de formas 3D ocultas en los SIRDS implica sólo procesos corticales binoculares, ya que la visión binocular tiene lugar en la corteza visual y no en la retina.

Por lo tanto, los SIRDS permiten realizar un by-pass de las imágenes de las retinas izquierda y derecha hasta V1 garantizando que, en la transmisión del par de imágenes a lo largo de la vía genículo-estriada, no ocurre nada en relación con la percepción de la figura oculta. Es a partir de la llegada a V1 cuando se fusionan ambas perspectivas en una única imagen 3D.

La percepción de SIRDS comprende dos fases distintas: la de síntesis integradora y la de mantenimiento. El estadio de síntesis o fase inicial requiere la fusión de los puntos apropiados del objeto para provocar la percepción tridimensional. Una vez formada la imagen, la fase de mantenimiento comprende el tiempo en el que el observador es capaz de seguir percibiéndola. Diversos estudios han tratado de determinar si los procesos neuronales implicados en ambas fases son iguales o diferentes (Portas et al, 2000; Blaha, Honey y Nichols, 2005), concluyendo que,

aunque existen áreas de activación comunes en ambas fases de la percepción, la de mantenimiento implica además procesos de memoria.

Desde la introducción de los SIRDS han aparecido numerosos estudios en relación a su interacción con el proceso de la visión. Una gran parte de ellos tienen como objetivo mejorar la comprensión de los mecanismos ópticos y perceptuales asociados a la visión estereoscópica. Así, por ejemplo, Portas et al. (2000) utilizaron los SIRDS para estudiar la sensación de profundidad y la memoria estereoscópica. Burgess, Rehman y Williams (2003) los usaron para comprobar que la actividad neuronal aumentaba cuando aparecía la figura oculta tridimensional, lo que es consistente con las hipótesis que predicen una mayor conectividad neuronal en la percepción consciente, como la hipótesis del núcleo dinámico (Tononi y Edelman, 1998).

Respecto a los mecanismos neuronales subyacentes en la percepción de SIRDS, la evidencia más directa sobre la disparidad selectiva de las neuronas de la corteza surge de los estudios que han mostrado que la mayoría de estas células responden fuertemente a los SIRDS. Diversas investigaciones sobre patrones de puntos aleatorios han enfatizado uno de los problemas más importantes que el sistema nervioso debe resolver en la reconstrucción de la tercera dimensión: hallar los puntos correspondientes en las dos imágenes a partir del patrón de puntos aleatorios, lo que se conoce como el problema de la correspondencia binocular (Marr, 1985). En los SIRDS todos tienen el mismo tamaño y contraste, por lo que cualquier punto puede ser emparejado con muchos otros. Sin embargo, el cerebro resuelve la tarea con gran eficacia y rapidez (Poggio, 1991; Steinman, Steinman y Garzia, 2000).

Por otra parte, diversos estudios han hallado de forma consistente mediante métodos invasivos (principalmente, resonancias magnéticas) que la percepción de autoestereogramas es mediada principalmente por la actividad parietal-temporal derecha (Revonsuo et al, 1997; Portas et al, 2000; Burgess, Rehman y Williams, 2003).

5.2. Objetivos

Las anisotropías del espacio visual podrían originarse en la porción del sistema visual donde se mantiene la organización retinotópica (retina y V1). Sin embargo, algunos trabajos realizados mediante el uso de técnicas avanzadas de neuroimagen han mostrado que tales anisotropías se producen solamente en V1 (Furmanski y Engel, 2000), mientras que otros investigadores las han hallado más allá de V1 (Liu y Pettigrew 2003; Wang, Ding y Yunokuchi, 2003; Orban y Vogels 1998). Por lo tanto, parece existir cierta controversia sobre el lugar donde se originan las anisotropías del espacio visual: en retina-V1 (disposición retinotópica) o en las áreas visuales más allá de V1 (modelo más completo).

Paralelamente, los estudios psicofísicos afines que se han consultado versaban sobre la presencia de las anisotropías bajo diversas condiciones experimentales. Sin embargo, ninguno de estos trabajos ha tenido como objetivo dilucidar su foco.

Por lo tanto, con el propósito de aumentar el conocimiento sobre el origen de la anisotropía del espacio visual se diseñó un estudio cuyo objetivo fue:

- Hallar evidencias, mediante un experimento planteado psicofísicamente, sobre el lugar donde se originan las anisotropías del espacio visual

Dicho experimento consistió en juicios de distancias en profundidad (ΔZ) entre segmentos situados en distintos planos frontoparalelos que se visualizaban a partir de un SIRDS. Los SIRDS constituyen una herramienta adecuada en este caso ya que, si se replicasen las anisotropías del espacio visual mediante su uso, quedaría reforzada la hipótesis de que el origen de tales anisotropías se halla más allá de V1.

5.3. Metodología

5.3.1. Participantes

Cinco observadores voluntarios (3 hombres y 2 mujeres) de edades comprendidas entre 43 y 52 años (media 46.4, desviación estándar 3.44) participaron en el experimento. Cuatro de los participantes eran ajenos a los objetivos del experimento y todos tenían como mínimo una agudeza visual estereoscópica de 60 segundos de arco (medido con el test T.N.O.) y agudeza visual igual a 1 con o sin neutralización. Este número de observadores, aparentemente escaso, es bastante habitual en estudios psicofísicos donde el registro de datos es complejo, como en el caso que nos ocupa. Los observadores participaron voluntariamente en el estudio y firmaron el consentimiento informado. El estudio siguió los principios de la declaración de Helsinki de 1975 (revisados en Tokio en 2004) y se ajustó a las normas éticas de la Universitat Politècnica de Catalunya.

5.3.2. Estímulos y aparatos

Se generaron 27 autoesterogramas a partir del estímulo base que se muestra en la figura 5.6, consistente en dos pares de segmentos paralelos situados a distinta profundidad respecto al observador. El paradigma experimental utilizado requería nuevamente de un estímulo de referencia y otro de comparación. Los segmentos del estímulo se presentaron orientados a 0°, 45° y a 90° respecto a la horizontal (x).

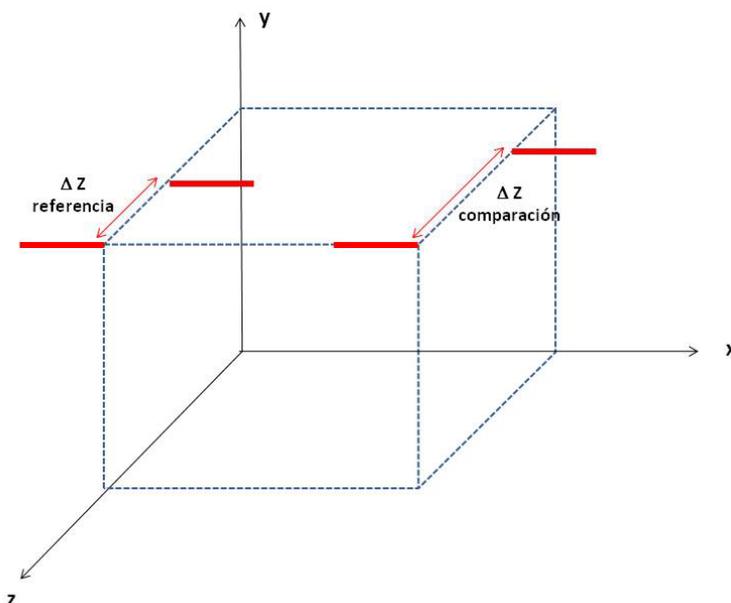


Figura 5.6. Estímulo base generado para la realización del experimento. El par de segmentos a la izquierda constituye el estímulo de referencia, mientras que el par de la derecha es el estímulo de comparación. El sujeto dirige su mirada en la dirección del eje z

El estímulo de referencia aparecía en la parte izquierda de la pantalla y, el de comparación, en la derecha. Para cada orientación, el valor de ΔZ en el estímulo de referencia era fijo, mientras que se presentaron al observador 9 valores distintos de ΔZ en el estímulo de comparación.

Este experimento fue realizado en el laboratorio de Óptica Fisiológica de la Facultad de Óptica y Optometría (Universitat Politècnica de Catalunya). La luminancia ambiental fue de 100 cd/m^2 (medida con un fotómetro Minolta LS-100).

Los estímulos fueron generados "ad hoc" mediante el programa *Stereogram Maker 2.1*, un editor de imágenes estereoscópicas disponible de forma gratuita en Internet (<http://www.swiftgear.com>). Este programa requiere 2 imágenes para generarlos: un patrón de puntos aleatorios o tapiz que oculta la figura tridimensional y el motivo 3D que se quiere visualizar. Los autoestereogramas fueron mostrados en un monitor color TFT de 17", con una resolución espacial de 1280×768 píxeles. La distancia de observación fue de 40 cm (fijada con una mentonera) y se requirió a todos los observadores que utilizaran la técnica de fijación paralela o de hipoconvergencia de las direcciones visuales. La Figura 5.7 ilustra un SIRDS de los utilizados en este estudio, donde aparecen los segmentos del estímulo de referencia a 45° .

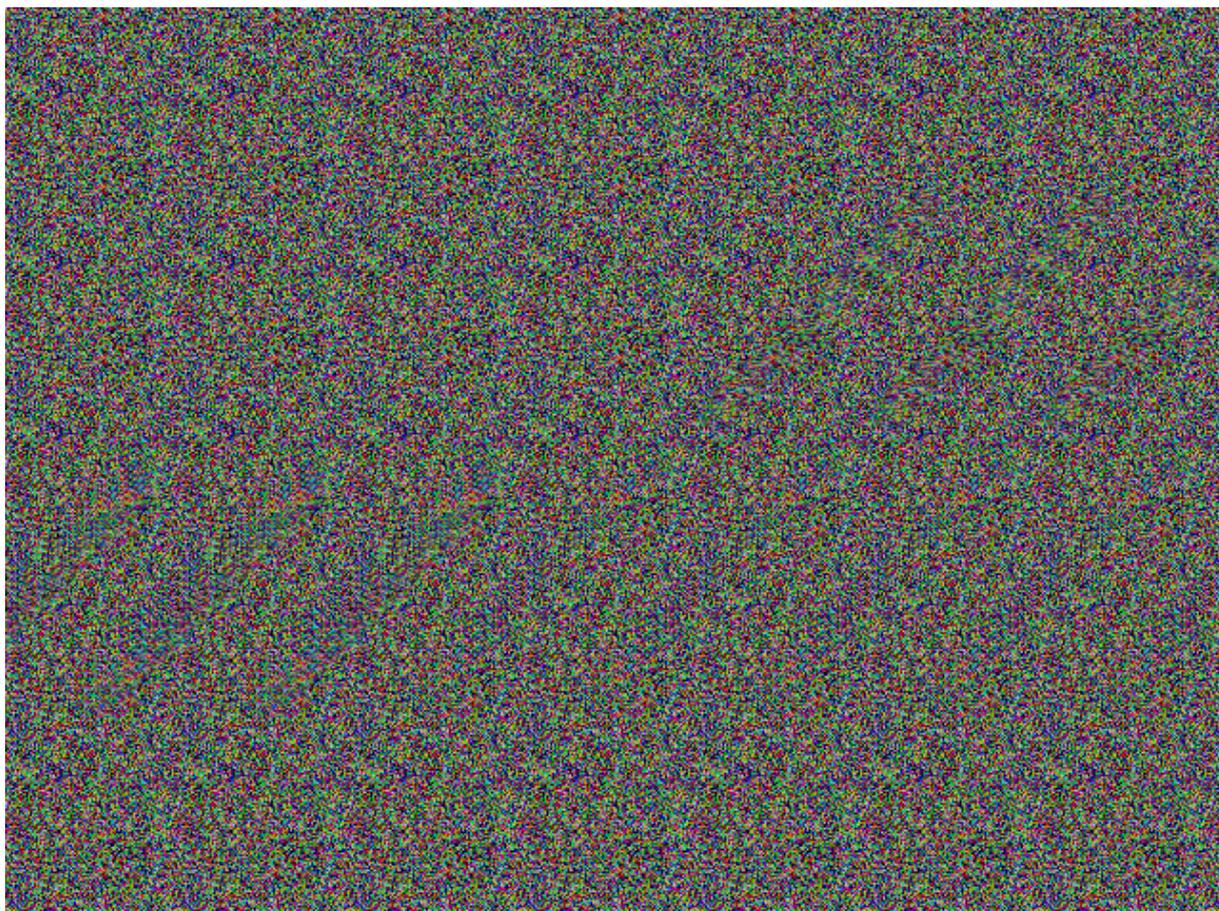


Figura 5.7. Ejemplo de un autoestereograma usado como estímulo estándar (orientación 45°)

Fijando la distancia de observación, *Stereogram Maker 2.1* permite conocer la profundidad respecto a la pantalla a la que se visualizan los objetos, utilizando el número de píxeles de separación entre puntos que se presentan para ser fusionados como referencia. Teniendo en cuenta que el tamaño de un píxel en el monitor utilizado era de 0.030 mm, la geometría asociada a la visualización del SIRDS permite calcular fácilmente la profundidad z correspondiente a un número n de píxeles de separación (figura 5.8), considerando una distancia interpupilar (DIP) media de 60 mm.

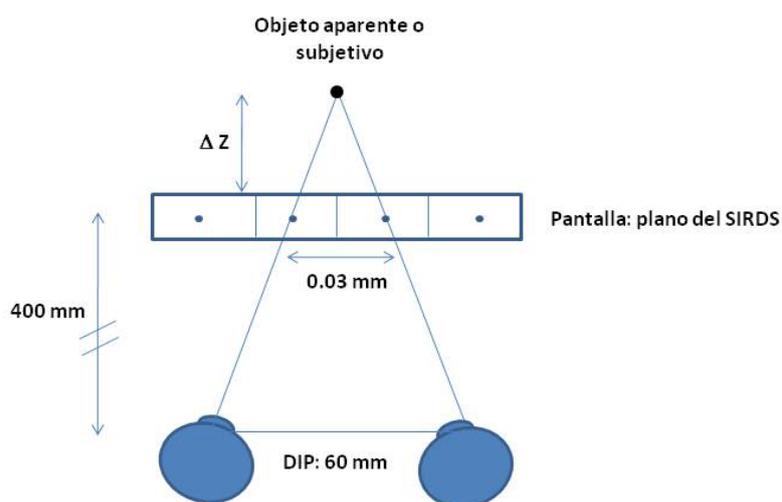


Figura 5.8. Esquema que ilustra la geometría de la escena utilizada en este experimento

Así, en el estímulo de referencia, el segmento izquierdo presentaba una profundidad de 100 píxeles y el de la derecha de 140 píxeles. Por otra parte, el segmento izquierdo del estímulo de comparación se hallaba igualmente a una profundidad de 100 píxeles, mientras que el derecho oscilaba entre 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155 y 160 píxeles.

El número de píxeles de separación n y las profundidades correspondientes para los estímulos de referencia y de comparación ΔZ que se presentan aparecen detallados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Descripción de los estímulos de referencia y de comparación utilizados en este experimento (*n*: profundidad en píxeles, *z*: profundidad en el eje *z*)

		<i>n</i>	Δn	<i>Z</i> (mm)	ΔZ (mm)
Estímulo de referencia	Segmento izquierdo (fijo)	100	40	21.05	9.055
	Segmento derecho (fijo)	140		30.11	
Estímulo de comparación	Segmento izquierdo (fijo)	100	-	21.05	-
	Segmento de comparación (variable en 9 posiciones)	120	20	25.53	4.48
		125	25	26.67	5.62
		130	30	27.81	6.76
		135	35	28.95	7.90
		140	40	30.11	9.06
		145	45	31.26	10.21
		150	50	32.43	11.38
		155	55	33.60	12.55
160	60	34.78	13.73		

5.3.3. Procedimiento

Los sujetos participantes, en primer lugar, realizaron más de 10 juicios de entrenamiento con la finalidad de determinar su habilidad para percibir la forma 3D camuflada en el SIRDS. La visualización simultánea de los SIRDS de referencia y de comparación resultó muy dificultosa para algunos sujetos, hasta el punto de que el 50% de los participantes previstos inicialmente no pudo completar las pruebas y la muestra de sujetos quedó mermada. No obstante, los participantes seleccionados eran hábiles percibiendo SIRDS.

El método psicofísico utilizado fue el de los estímulos constantes, con el paradigma experimental de elección forzada entre dos alternativas. La secuencia de cada ensayo comenzaba mostrando simultáneamente en el mismo SIRDS el estímulo de referencia (*Eref*) a la izquierda de la pantalla y el estímulo de comparación (*Ecomp*) a la derecha. Los observadores debían juzgar si el ΔZ del *Eref* era mayor o menor que el ΔZ del *Ecomp*. Para ello, los observadores pulsaban el botón izquierdo o derecho del ratón, respectivamente. En ningún momento se proporcionó feedback a los participantes acerca de su rendimiento y no hubo tiempo límite para resolver la tarea.

La separación (ΔZ) entre los segmentos que componían los estímulos variaba en nueve posibles valores diferentes. Cada una de estas separaciones se presentó 12 veces (repeticiones). Ello implica que cada observador realizó 108 juicios para cada orientación, lo que se traduce en un total de 324 juicios válidos por observador. Para evitar un descenso del rendimiento en la tarea por la disminución de la atención, los

324 juicios se fraccionaron en 9 bloques de 36 juicios. Los observadores realizaron sesiones en las que se tomaron datos correspondientes a 3 bloques por día. El tiempo empleado en realizar cada bloque fue de 15 minutos en promedio, aunque hubo observadores que necesitaron hasta 25 minutos por bloque. Cada participante se sometió a la totalidad de las pruebas de modo aleatorio.

5.3.4. Análisis de datos

Al igual que en otros experimentos de esta tesis, el análisis de datos fue realizado a partir de la función psicométrica (apartado 2.5.1). El índice de *exactitud* seleccionado fue el valor del error constante EC y el índice de *precisión* fue la fracción de Weber.

Así pues, para cada sujeto y cada bloque, se registró la proporción de respuestas $E_{comp} > E_{ref}$. Posteriormente, se promediaron los datos de los 3 bloques de medidas correspondientes a una misma orientación y observador para obtener una única función psicométrica mediante unos programas creados "ad-hoc" en Matlab. Por tanto, se construyeron 3 funciones psicométricas por observador, cada una de ellas calculada a partir de 108 juicios.

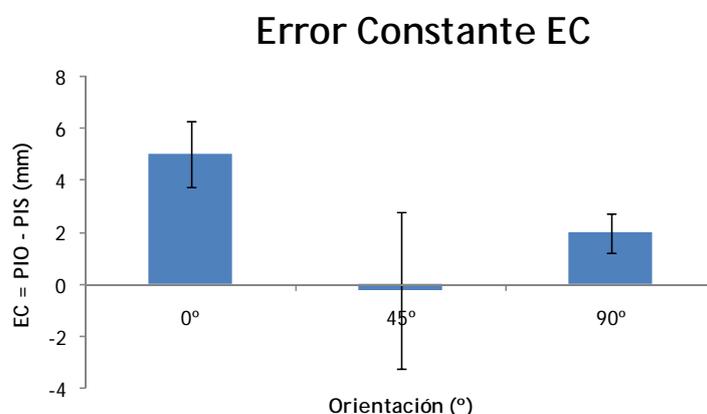
El tratamiento de los datos se realizó mediante un ANOVA donde el único factor fue la *orientación del estímulo*, con 3 niveles diferentes (0° , 45° o 90°). Las variables dependientes sobre las que se aplicó el análisis fueron el EC y la fracción de Weber (K Weber). El software estadístico utilizado fue el SPSS versión 17 y el grado de significación establecido en todos los análisis fue del 95% ($p < 0.05$).

5.4. Resultados

5.4.1. Análisis de la exactitud

Para cada sujeto se calculó el valor del EC como indicador de la exactitud de la tarea visual realizada. Para verificar si su variabilidad podría explicarse por la orientación de forma significativa, se aplicó una ANOVA de un solo factor, donde la variable dependiente fue el EC y el factor o variable independiente, la orientación. Los resultados obtenidos indicaron que el factor *Orientación* no alcanzó el grado de significación estadística ($p < 0.05$) requerido ($F_{2,12} = 1.823$, $p < 0.204$).

La figura 5.9 muestra el EC obtenido en función de la orientación, junto con el error típico.



Orientación	EC medio (mm)	Error típico (mm)
0°	5.0	1.26
45°	-0.2	3
90°	2.0	0.76

Figura 5.9. Error constante ($EC = PIO - PIS$) obtenido en función de la orientación de los segmentos, junto con el error típico

El análisis de la figura anterior muestra una gran variabilidad a 45°, lo que indica que los resultados de esta orientación no fueron fiables. Por tanto, no es posible afirmar que se produjese el efecto oblicuo a partir de los datos de exactitud.

Con el fin de averiguar si las diferencias halladas entre 0° y 90° fueron estadísticamente significativas, se aplicó una ANOVA de un solo factor eliminando los datos correspondientes a 45°. En este caso, se alcanzó significación marginal ($F_{1,8} = 4.538$, $p < 0.06$) por lo que, a pesar de la moderada variabilidad de los datos obtenidos a 0° y a 90° (como se aprecia por las barras de error de la figura 5.9), la

anisotropía vertical-horizontal se manifestó de un modo notable, siendo la orientación de 90° la correspondiente a una mayor exactitud. Esta tendencia sugiere que, aumentando el tamaño muestral, podrían evidenciarse diferencias significativas en función de la orientación.

También nos parece importante destacar que, para las orientaciones cardinales, existió una tendencia hacia la *subestimación* del verdadero valor físico de separación en profundidad ΔZ entre los dos segmentos.

5.4.2. Análisis de la precisión

Para cada sujeto se obtuvo el valor de la fracción de Weber (K Weber) como indicador de la precisión de la tarea visual realizada. Para verificar si su variabilidad podía estar justificada por la orientación de forma significativa, se aplicó una ANOVA de un solo factor. La variable dependiente fue la K Weber y el factor o variable independiente, la orientación. Los resultados obtenidos indicaron que el factor *Orientación* no alcanzó el grado de significación estadística ($p < 0.05$) requerido, aunque sí alcanzó significación marginal ($F_{2,12} = 3.274$, $p < 0.073$) con un nivel de confianza del 92.7 %, que consideramos digno de ser reportado.

La figura 5.10 muestra el valor de la fracción de Weber en función de la orientación, junto con el error típico.

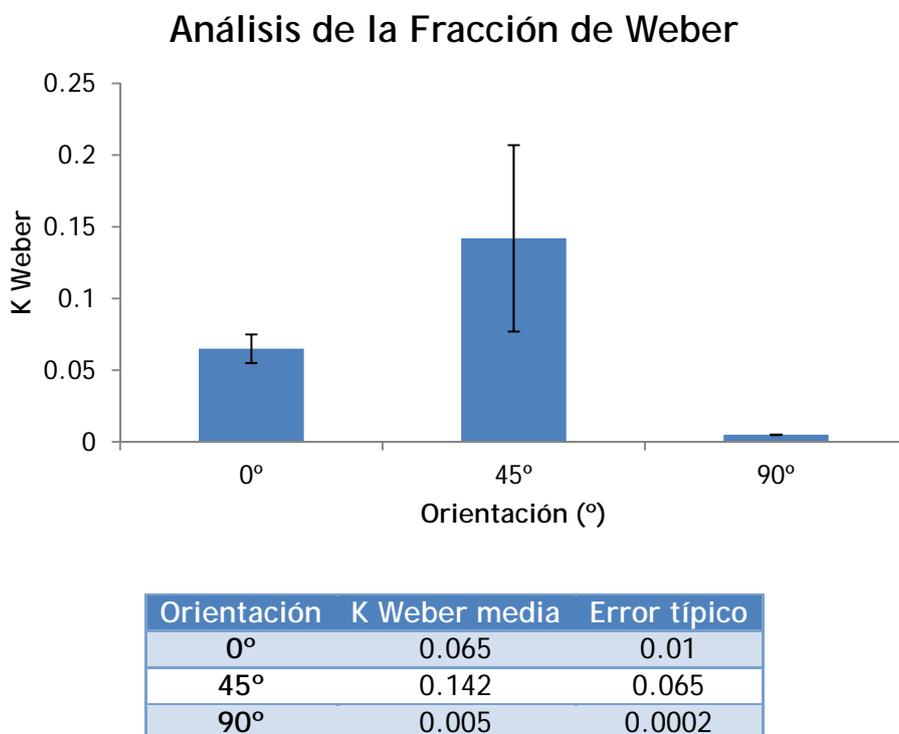


Figura 5.10. Valor de la fracción de Weber correspondiente a los observadores, en función de la orientación de los segmentos, junto con el error típico

Puede observarse que existen diferencias marginalmente significativas en función de la orientación (cardinal u oblicua) del estímulo mientras que, por otro lado, también existen diferencias claramente significativas entre 0° y 90°. La precisión a 45° fue menor que la obtenida a 0° o a 90°, mientras que a 90° resultó ser mayor que a 0°.

Como se hizo en el caso de la exactitud, dada la gran variabilidad de los resultados correspondientes a la orientación de 45°, se aplicó una ANOVA exclusivamente a los datos de las orientaciones cardinales. El resultado indica que, en efecto, ambas orientaciones presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellas ($F_{1,8} = 34.269$, $p < 0.0001$), lo que revela que la profundidad (incremento ΔZ) requerida para percibir cambios quedó afectada significativamente por la anisotropía vertical-horizontal y por el efecto oblicuo (significación marginal).

5.5. Discusión

Este estudio pretendía ofrecer datos empíricos al debate sobre el origen de las anisotropías del espacio visual. Aunque las diferencias significativas se han producido tan sólo para las orientaciones cardinales, creemos interesante reportar las tendencias halladas que, en futuros estudios, podrían corroborarse con una muestra más amplia de sujetos.

Respecto a la *exactitud* o fidelidad cabe destacar, por una parte, el sesgo de respuesta obtenido en dirección hacia la *subestimación* del valor verdadero de profundidad entre los dos segmentos. Por otra parte, la gran variabilidad del EC obtenida a 45° no permite afirmar que el efecto oblicuo se haya producido. Sin embargo, al considerar aisladamente los datos correspondientes a 0° y a 90°, aparecieron diferencias marginalmente significativas entre ambas ($p < 0.06$), lo que es acorde con la manifestación de la anisotropía vertical-horizontal.

Respecto a la *precisión*, el análisis de la fracción de Weber señala que los resultados se vieron afectados tanto por el efecto oblicuo como por la anisotropía vertical-horizontal. En este caso, se ha obtenido una destacable significación estadística marginal ($p < 0.073$). Además, para las orientaciones de 0° y de 90°, la precisión resultó significativamente mejor para la orientación de 90° que para la de 0°.

Conviene recordar que la anisotropía hallada en este trabajo difiere de la conocida como "ilusión vertical-horizontal", según la cual se produce una sobreestimación de la longitud de las líneas orientadas verticalmente respecto a las orientadas horizontalmente. En este trabajo se reporta una anisotropía en los juicios de profundidad, al igual que ocurría en el capítulo 4, de manera que cuando los estímulos estaban orientados a 90° se obtuvieron una exactitud y una precisión mayores que cuando los estímulos estaban orientados a 0°. Ello constituye un resultado no reportado hasta la fecha en otros trabajos científicos. Como ya sucedía en anteriores experimentos de este trabajo doctoral (capítulos 3 y 4), cuando el estímulo se encontraba orientado a 90°, la separación entre segmentos era horizontal además de en el eje z, de modo que nuestros resultados indican un mejor rendimiento visual en juicios de distancias en profundidad cuando los objetos están, además, separados horizontalmente que cuando lo están verticalmente.

El objetivo principal de este experimento fue dilucidar si las anisotropías del sistema visual se originan en la porción del sistema visual donde se mantiene la organización retinotópica (retina y V1) o si, por el contrario, el locus se halla en áreas visuales posteriores a V1, mediante un método psicofísico no invasivo. Los resultados obtenidos en este estudio dan soporte a la hipótesis de que las anisotropías del espacio visual tienen su sede más allá de V1, ya que se ha producido tanto el efecto oblicuo como una anisotropía vertical-horizontal en el juicio de distancias mediante el uso de SIRDS y, como se ha citado en la introducción, éstos son procesados a partir del área visual V1 en la denominada vía dorsal (Stidwill y Fletcher, 2011). La novedad de nuestro estudio radica en que se ha utilizado un método perceptual y no invasivo, a diferencia de otros estudios descritos en la literatura científica que han utilizado

resonancias magnéticas funcionales y otros métodos no perceptuales (Mannion, McDonald y Clifford, 2009, 2010; Aspell et al, 2010).

6. Conclusiones finales y trabajos futuros

El objetivo global de esta tesis doctoral ha sido poner de manifiesto nuevas evidencias acerca de las anisotropías del espacio visual en relación con el juicio de distancias entre objetos, desde un enfoque perceptual y no invasivo. Las conclusiones a las que hemos llegado se exponen a continuación.

6.1. Juicios de distancia entre objetos situados en distintos planos frontoparalelos

En los tres grupos de experimentos psicofísicos que configuran esta tesis aparecen juicios de distancia en profundidad (eje z) como tarea visual propuesta a los observadores. En todos los casos, los estímulos utilizados fueron segmentos paralelos situados en distintos planos frontoparalelos con orientación variable.

En el experimento descrito en el capítulo 3, la dependencia entre el rendimiento visual de los observadores y la orientación de los segmentos se estudió más a fondo que en el resto, puesto que el estímulo base (figura 3.2) se presentó a los observadores con siete orientaciones distintas equiespaciadas entre 0° y 90° respecto a la horizontal.

En el experimento A2 del capítulo 4, un estímulo base análogo al anterior (figura 4.6) se presentó a los observadores con tres orientaciones distintas (0° , 45° y 90° respecto a la horizontal); y lo mismo sucedía en el experimento descrito en el capítulo 5 aunque, en este caso, la geometría del estímulo base fue un poco más sencilla (figura 5.6). En los dos primeros experimentos los estímulos se presentaron en un entorno virtual, mientras que en el último de ellos se utilizaron SIRDS para su visualización.

En el caso del experimento A2, los estímulos se presentaron sobre cuatro tipos de fondos (negro, plano, cóncavo y convexo), lo que permitió estudiar la influencia del fondo en el rendimiento visual de los observadores, además de la orientación.

Por otra parte, el grupo de experimentos descritos en el capítulo 4 incluye el denominado B2, en el que la tarea visual propuesta consistió también en juicios de distancia en profundidad. En este experimento, que se desarrolló en un entorno real, el estímulo base consistió en dos varillas paralelas (figura 4.21) que se presentaron a los observadores con tres orientaciones distintas (0° , 45° y 90°) y sobre los mismos cuatro tipos de fondo que en el caso A2.

A continuación se presentan las conclusiones correspondientes a los cuatro experimentos relacionados con los párrafos anteriores, tanto las que son comunes a todos, como las que son específicas de alguno de ellos.

6.1.1. Influencia de la ORIENTACIÓN

- Se ha hallado una correlación significativa entre rendimiento visual y *disparidad vertical* en función de la orientación, lo que implica que la disparidad vertical juega un rol sensible a la orientación en la percepción de la profundidad. Se ha hallado un rendimiento visual inferior para la orientación de 45° y cercanas, coincidiendo con el valor de disparidad vertical menor. Entendiendo el menor rendimiento visual como una nueva manifestación del efecto oblicuo en relación a la percepción de profundidad, éste podría ser explicado mediante la disparidad vertical. Sin embargo, la disparidad vertical no permite explicar las diferencias halladas en el rendimiento visual de los sujetos entre las orientaciones de 0° y de 90°.
- Se ha puesto de manifiesto el *efecto oblicuo* en relación a la percepción de profundidad, lo que todavía no había sido reportado en los trabajos científicos afines consultados. Concretamente, se han hallado diferencias significativas en la *precisión* de los sujetos en los cuatro experimentos, con la excepción de los juicios de distancias en profundidad mediante el uso de SIRDS (capítulo 5), donde la significación hallada ha sido marginal. Respecto a la *exactitud*, las diferencias han sido significativas entre 45° y las orientaciones cardinales en la mayor parte de experimentos, exceptuando los juicios realizados mediante SIRDS (donde las diferencias no han sido significativas) y el experimento virtual A2 del capítulo 4, ya que las diferencias significativas halladas en *exactitud* se limitan a la orientación de 45° respecto a la de 90°.
- Se ha puesto de manifiesto una *anisotropía vertical-horizontal* en el juicio de distancias en profundidad. Tal anisotropía es diferente a la reportada en la literatura científica hasta la fecha, por lo que este hallazgo supone una novedad en el campo de los sesgos y errores perceptivos. Así, se han hallado diferencias significativas en la *precisión* de los sujetos en los cuatro experimentos, obteniendo el mejor rendimiento visual de los sujetos participantes para la orientación de 90°. Ello corrobora los hallazgos neurofisiológicos que apuntan a la existencia de un mayor número de células sintonizadas a la orientación horizontal en la corteza visual, ya que los juicios de profundidad cuando los estímulos se hallaban orientados a 90° implicaban, además del eje z, el eje x (horizontal). En el caso de la *exactitud*, los resultados significativos se han limitado al experimento realizado en un entorno real (B2, capítulo 4), mientras que se alcanzó significación marginal en el experimento realizado mediante SIRDS (capítulo 5).

- Se ha constatado que las anisotropías del espacio visual tienen su origen más allá del área visual V1 mediante el uso de SIRDS. A pesar de que los resultados han sido sólo marginalmente significativos, ningún estudio había demostrado hasta la fecha, desde un enfoque psicofísico y no invasivo, tal origen.

6.1.2. Influencia del FONDO

En este apartado, las conclusiones se ciñen a los experimentos A2 y B2 del capítulo 4.

- Se ha puesto de manifiesto que la presencia de cualquier tipo de fondo produce un decremento en el rendimiento visual de los sujetos, tanto en un entorno virtual como en un entorno real. La causa podría ser que el fondo añade ruido a la tarea visual, lo que es acorde con los resultados de otros estudios. Concretamente, hemos hallado diferencias significativas en la *precisión* en ambos entornos. De hecho, en un entorno virtual los fondos convexo y plano no han mostrado diferencias significativas entre ellos y, a su vez, los fondos cóncavo y plano también pueden considerarse equivalentes en cuanto a precisión, por lo que se han agrupado en dos conjuntos. Los juicios realizados sobre fondo negro han proporcionado de forma consistente un mejor rendimiento que sobre el resto de fondos. Además, la presencia del fondo cóncavo provocó el valor inferior de *precisión* en todos los casos. La explicación tentativa sugerida es que la imagen del fondo cóncavo se ajusta más a la geometría de la retina, por lo que causa una mayor interferencia con la tarea visual. Respecto a la *exactitud*, las diferencias en función del fondo sólo resultaron significativas en un entorno real.
- En el caso del experimento A2, realizado en un entorno virtual, las medidas de *precisión* sólo presentaron diferencias significativas en función del fondo para la orientación de 90°. Ello sugiere que dicha orientación se ve más afectada que las demás por el tipo de fondo, lo que constituye un resultado no reportado hasta la fecha en estudios científicos similares al nuestro. Ello pudiera ser debido a que la curvatura del fondo en el experimento sólo afectaba al eje x, coincidiendo con la dirección del recorrido visual que hacían los sujetos al juzgar la separación en profundidad entre ambos segmentos para la orientación de 90°. Este fenómeno no se producía, por ejemplo, para la orientación de 0°, donde el recorrido visual entre los segmentos se realizaba en el eje y (sin curvatura). Cabe destacar que los fondos convexo y negro se agruparon, al igual que los fondos cóncavo y plano, para la orientación de 90° en los datos correspondientes a *precisión*.

6.2. Juicios de distancia entre objetos situados en el mismo plano frontoparalelo

En estos experimentos, la tarea visual propuesta consistió en juicios de distancia entre segmentos paralelos situados en un mismo plano frontoparalelo, en un entorno virtual y en un entorno real. En ambos casos, el estímulo base (figuras 4.5 y 4.19 respectivamente) se presentó a los observadores con tres orientaciones distintas (0° , 45° y 90° respecto a la horizontal) y sobre cuatro tipos de fondo (negro, plano cóncavo y convexo). Las siguientes conclusiones se refieren, por lo tanto, a los experimentos descritos como A1 y B1 del capítulo 4.

6.2.1. Influencia de la ORIENTACIÓN

- Se ha constatado el efecto oblicuo, hallándose diferencias significativas, tanto en *exactitud* como en *precisión*, en un entorno virtual y en un entorno real. Sin embargo, debemos precisar que, aunque en un entorno real las diferencias significativas se han producido entre las tres orientaciones, en un entorno virtual se han limitado a las orientaciones de 45° y 90° (medidas de *exactitud*) y a la de 45° respecto las dos cardinales (medidas de *precisión*).
- Se ha producido una anisotropía vertical-horizontal en las medidas de *exactitud* en un entorno real. Sin embargo, dicha anisotropía no ha aparecido en un entorno virtual. La orientación de 90° ha proporcionado el mejor rendimiento visual de los sujetos. Una posible explicación para justificar que tal anisotropía no haya aparecido en un entorno virtual es que se haya producido un enmascaramiento entre las direcciones de los segmentos y las de los juicios visuales, ya que los juicios para la orientación de 90° se realizaban sobre el eje x (horizontal) mientras que, para la orientación de 0° , se realizaban en el eje y (vertical).

6.2.2. Influencia del FONDO

- La presencia de un fondo ha provocado una disminución en la *precisión* de los sujetos, tanto en un entorno virtual como en un entorno real. Los fondos convexo y negro se han agrupado y diferenciado del los fondos cóncavo y plano (que tampoco han mostrado diferencias significativas entre ellos) en el entorno virtual mientras que, en el entorno real, las diferencias en *precisión* halladas han sido estadísticamente significativas para todos los fondos, por lo que no se han producido agrupamientos. Nuevamente, los resultados obtenidos sobre fondo negro han proporcionado el mejor rendimiento visual y el

fondo cóncavo ha acompañado a la menor *precisión*. Respecto a la *exactitud*, los resultados han alcanzado significación estadística sólo para el entorno real. Estos resultados son iguales a los obtenidos realizando juicios de profundidad (apartado 6.1.2), lo que nos parece suficientemente destacable.

- En el caso del experimento A1, realizado en un entorno virtual, las medidas de precisión sólo presentaron diferencias significativas en función del fondo para la orientación de 45°, ya que el rendimiento visual a 0° y a 90° fue similar para cada fondo y, además, para cada una de estas orientaciones tampoco hubo diferencias significativas entre fondos. Una explicación tentativa para estos resultados se basaría en que la curvatura de los fondos en la condición visual 2D era simulada, a diferencia de los experimentos de la condición visual 3D. Posiblemente esta curvatura ha resultado insuficiente para hallar diferencias en el plano frontoparalelo en relación al fondo.

6.3. Comparación de juicios de distancias entre objetos situados en un mismo plano respecto a juicios de distancias entre objetos situados en distintos planos

Puesto que en los experimentos descritos en el capítulo 4 se han realizado juicios de distancias relativas en profundidad y juicios de distancias relativas en un mismo plano frontoparalelo, tanto en un entorno virtual como en un entorno real, a continuación se muestran las conclusiones relativas a la comparación entre los resultados hallados en ambas condiciones visuales (2D y 3D).

- Se ha constatado que tanto la *exactitud* como la *precisión* en ambos entornos (real y virtual) han sido mejores en la condición visual 2D (objetos en el mismo plano frontoparalelo) que en la condición visual 3D (objetos en distintos planos de profundidad). En el caso del entorno virtual, este resultado era previsible en parte, ya que el diseño experimental partía de unos intervalos de oscilación de la profundidad entre ambos segmentos en 3D mayores que en 2D. Aún así, este experimento ha permitido cuantificar el deterioro del rendimiento visual, de modo que la *precisión* en la condición visual 2D ha triplicado a la de la condición visual 3D, mientras que la *exactitud* en 2D ha sido 1.75 veces superior que en 3D.
- En un entorno virtual, se produjo una *subestimación* en los juicios de distancias entre objetos en la condición visual 3D, mientras que en 2D apareció una *sobreestimación*. Este fenómeno está ampliamente reportado en la literatura científica. Sin embargo, en un entorno real se obtuvo una *subestimación* de las distancias percibidas para ambas condiciones visuales (2D y 3D).

6.4. Comparación de juicios de distancias entre objetos realizados en un entorno virtual y en un entorno real

Para finalizar, conviene comparar los resultados hallados en el conjunto de experimentos descritos en el capítulo 4, ya que unos fueron realizados en un entorno virtual y otros en un entorno real.

- A pesar de las coincidencias entre diversos resultados obtenidos en un entorno virtual y en un entorno real, también han aparecido notables diferencias entre ambos. Ello es congruente con la teoría de que los entornos real y virtual no son equivalentes, por lo que se debe ser prudente al extrapolar los resultados obtenidos en experimentos realizados en uno de ellos al otro, en la misma línea marcada por otros autores.

6.5. Trabajos futuros

Durante el desarrollo de este trabajo doctoral, y a la vista de los resultados obtenidos, han surgido diversos temas de interés para el grupo de investigación, por lo que se han planteado futuros trabajos relacionados con los ya realizados. Algunos de ellos se comentan a continuación:

- Respecto al rol de las disparidades verticales en el efecto oblicuo, sería interesante replicar el estudio en un entorno real, para comprobar si los resultados son comparables a los obtenidos en un entorno virtual. Asimismo, sería conveniente replicar el experimento para valores diferentes de disparidad vertical asociada a los estímulos y con más sujetos. Todo ello permitiría definir con mayor detalle la aportación de las disparidades verticales en el efecto oblicuo.
- Un tema en el que nos gustaría profundizar es el rol detrimental del fondo en la realización de tareas visuales. Pretendemos estudiar, con mayor profundidad, si el fondo sobre el que se desarrollan los juicios de distancias relativas empeora consistentemente el rendimiento de los sujetos. Sería interesante replicar el experimento utilizando fondos que fuesen superficies 3D, dado que en el estudio realizado en esta tesis los fondos han presentado una curvatura limitada al eje x. Asimismo, pretendemos replicar los experimentos realizados en la condición visual 2D utilizando fondos tridimensionales en lugar de fondos simulados, como se ha hecho en este trabajo doctoral.

- En cuanto al origen de las anisotropías del sistema visual, se hace necesario replicar el experimento diseñado y expuesto en el capítulo 5 de esta tesis doctoral en una muestra mayor de sujetos. Por otra parte, la presentación de los estímulos de referencia y comparación debería estar contrabalanceada, de modo que la mitad de las veces apareciese uno de ellos en el lado izquierdo de la pantalla, y la otra mitad, en el lado derecho. En el experimento realizado, el estímulo de referencia apareció siempre a la izquierda, pero los resultados mejorarían desde un punto de vista metodológico con la introducción del contrabalanceo en la presentación estimular.
- Uno de los experimentos que actualmente ya está en curso tiene como objetivo profundizar sobre la relación entre la convergencia, la acomodación y la disparidad binocular. Para ello, estamos registrando el ángulo de convergencia binocular, así como su signo, mediante el uso de un eyetracker durante la visualización de SIRDS. Adicionalmente, estamos interesados en explorar la relación entre estabilidad de la visión binocular y la zona de visión binocular simple y nítida.

Referencias bibliográficas

- Allison, R.S., Gillam, B.J. y Vecellio, E. (2009). Binocular depth discrimination and estimation beyond interaction space. *Journal of Vision*, 9(1):10.1-14
- Andrews, T.J., Glennerster, A. y Parker, A.J. (2001). Stereoacuity thresholds in the presence of a reference surface. *Vision Research*, 41 (23): 3051-3061
- Appelle, S. (1972). Perception and discrimination as a function of orientation: The “oblique effect” in man and animals. *Psychological Bulletin*, 78: 266-278
- Aspell, J.E., Wattam-Bell, J., Atkinson, J. y Braddick, O.J. (2010). Differential human brain activation by vertical and horizontal global visual textures. *Experimental Brain Research*, 202: 669-679
- Attneave, F. y Olson, R. K. (1967). Discriminability of stimuli varying in physical and retinal orientation. *Journal of Experimental Psychology*, 74: 149-157
- Avery, G.C. y Day, R.H. (1969). Basis of the horizontal-vertical illusion. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2): 376-380
- Aznar-Casanova, J. A., Matsushima, E. H., da Silva, J. A. y Ribeiro-Filho, N. P. (2008). Can exocentric direction be dissociated from its exocentric distance in virtual environments? *Perception & Psychophysics*, 70(3): 541-550
- Aznar-Casanova, J.A., Matsushima, E.H., Ribeiro-Filho, N.P. y da Silva, J.A. (2006). One dimension and multi-dimensional studies of the exocentric distances estimates in frontoparallel plane, virtual space and outdoor open field. *The Spanish Journal of Psychology*, 9 (2): 273-284
- Backus, B. T., Banks, M. S., van Ee, R. y Crowell, J. A. (1999). Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant perception. *Vision Research*, 39: 1143-1170
- Battro, A.M., Di Pierro, S. y Rozestraten, R.J. (1976). Riemannian geometries of variable curvature in visual space: visual alleys, horopters and triangles in big open fields. *Perception*, 5: 9-23
- Bauer, R. y Dow, B. M. (1989). Complementary global maps for orientation coding in upper and lower layers of the monkeys foveal striate cortex. *Experimental Brain Research*, 76: 503-509
- Bharadwaj, S.R. y Candy, T.R. (2009). Accommodative and vergence responses to conflicting blur and disparity stimuli during development. *Journal of Vision*, 9(11),4: 1-18
- Blaha, L., Honey, C. y Nichols, E. (2005). Autostereograms and autostereoscopic perception [Consulta: 3 septiembre 2011]. Disponible en: <http://cognitn.psych.indiana.edu/busey/q551/Phenomenology/Neural%20Cortical%20Areas%20of%20Autostereopsis.pdf>
- Blanco, M. (1996) *Psicofísica*. Madrid: Universitas. ISBN: 978-84-7991-046-1
- Bowker, D. O. y Mandler, M. B. (1981). Binocular flicker appears faster than monocular flicker. *Journal of the Optical Society of America*, 71: 496-498

- Burgess, A.P., Rehman, J. y Williams, J.D. (2003). Changes in neural complexity during the perception of 3D images using random dot stereograms. *International Journal of Psychophysiology*, 48: 35-42
- Chapanis, A. y Mankin, D.A. (1967). The vertical-horizontal illusion in a visually rich environment. *Perception & Psychophysics*, 2: 249-255
- Coppola, D. M., White, L. E., Fitzpatrick, D. y Purves, D. (1998). Unequal representation of cardinal and oblique contours in ferret visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.*, 95, 2621-2623
- Coren, S., Ward, L.M. y Erns, J.T. (2001). *Sensación y Percepción* 5ª ed. México: Mc Graw Hill
- Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Gooch, A. A. y Thompson, W. B. (2005). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual environments. *Perception*, 34(2): 191-204
- Creem-Regehr, S.H., Geuss, M.N., Ziemek, T.R., Allen, G.C., Stefanucci, J.K. y Thompson, W.B. (2010). Comparing different measures of space perception across real and virtual environments. *Journal of Vision*, 10(7): 83
- Cuijpers, R.H., Kappers, A.M. y Koenderink, J.J. (2000). Large systematic deviations in a visual parallelity task. *Perception*, 29: 1467-1482
- Cuijpers, R.H., Kappers, A.M. y Koenderink, J.J. (2002). Visual perception of collinearity. *Perception and Psychophysics*, 64: 392-404
- Cutting, J.E. y Vishton, P.M. (1995) Perceiving layout and knowing distances: the integration, relative potency and contextual use of different information about depth. En Epstein, W. y Rogers, S. (ed.), *Handbook of perception and cognition*, Vol 5: Perception of space and motion: 69-117. San Diego: Academic Press. ISBN: 0122405307
- D'Alessandro, P. (2008) Retinal curvature and geometry of image formation. *Brain Research*, 1225: 67-75
- Da Silva, J.A. (1985). Scales for perceived egocentric distance in a large open field: comparison of three psychophysical methods. *American Journal of Psychology*, 98(1): 119-144
- Da Silva, J.A, Aznar-Casanova, J.A., Ribeiro-Filho, N.P. y Santillán, J.E. (2006) Acerca da métrica da percepção do espaço visual. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, 69 (1): 127-135
- Daniels, V. y Gordon, I.E. (1993). Occlusion and the distortion of alignment in three-dimensional space. *Perception*, 22(9):1037-44
- Davidoff, J. B. (1974). An observation concerning the preferred perception of the visual horizontal and vertical. *Perception*, 3: 47-48
- DeValois, R. L. y DeValois, K. K. (1988). *Spatial vision*. New York: Oxford University Press. ISBN: 9780195066579
- DeValois, R. L., Yund, E. W. y Hepler, N. (1982). The orientation and direction selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*, 22: 531-544
- Doumen M.J.A., Kappers A.M.L. y Koenderink J.J.(2005). Visual space under free viewing conditions. *Perception & Psychophysics*, 67: 1177-1189

- Doumen, M.J., Kappers, A.M. y Koenderink, J.J. (2008) Do reference surfaces influence exocentric pointing? *Acta Psychologica*, 128: 310-317
- Doumen, M.J.A., Kappers, A.M.L., y Koenderink, J.J. (2006) Horizontal-vertical anisotropy in visual space. *Acta Psychologica*, 123: 219-239
- Epstein, W. (1963). Attitudes of judgment and the size-distance invariance hypothesis. *Journal of Experimental Psychology*, 66: 78-83
- Essock, E. A. (1990). The influence of stimulus length on the oblique effect of contrast sensitivity. *Vision Research*, 30: 1243-1246
- Fang, L. y Grossberg, S. (2009). From stereogram to surface: How the brain sees the world in depth? *Spatial Vision*, 22: 45-82
- Feria, C.S., Braunstein, M.L. y Andersen, G.J. (2003). Judging distance across texture discontinuities. *Perception*, 32(12):1423-40
- Fink G. R., Marshall J. C., Gurd J., Weiss P. H. y Zilles K. (2001). The neural basis of vertical and horizontal line bisection judgments: an fMRI study of normal volunteers. *Neuroimage*, 14: S59-S67
- Fisher, S. K. y Ciuffreda, K. J. (1988). Accommodation and apparent distance. *Perception*, 17: 609-621
- Foley, J.M. y Richards, W. (1972). Effects of voluntary eye movement and convergence on the binocular appreciation of depth. *Perception & Psychophysics*, 11: 423-7
- Fontes, S., Barbero, I. y Fontes, A.I. (1994). Efecto del rango del estímulo en la función de Stevens. *Revista de Psicología General y Aplicada*, 47(3): 253-257
- Frisby, J.P., Buckley D. y Horsman J.M. (1995). Integration of stereo, texture, and outline cues during pinhole viewing of real ridge-shaped objects and stereograms of ridges. *Perception*, 24: 181-198
- Furmanski, C. S. y Engel, S. A. (2000). An oblique effect in human primary visual cortex. *Nature Neuroscience*, 3: 535-536
- Garding, J., Porrill, J., Mayhew, J. E. W. y Frisby, J. P. (1995). Stereopsis, vertical disparity and relief transformations. *Vision Research*, 35: 703-722
- Gilinsky, A.S. (1955). The relation of perceived size to perceived distance: an analysis of Gruber's data. *American Journal of Psychology*, 68: 476-480
- Gillam, B. y Lawergren, B. (1983). The induced effect, vertical disparity, and stereoscopic theory. *Attention, Perception & Psychophysics*, 34(2): 121-130
- Glennerster, A. y McKee, S.P. (1999). Bias and sensitivity of stereo judgements in the presence of a slanted reference plane. *Vision Research*, 39: 3057-3069
- Glennerster, A. y McKee, S. P. (2004). Sensitivity to depth relief on slanted surfaces. *Journal of Vision*, 4: 378-387
- Goldstein, B. (2006). *Sensación y Percepción* 6ª ed. Madrid: Paraninfo
- Gregory, R.L. (1963). Distortions of visual space as a inappropriate constancy scaling. *Nature*, 4894: 678-680
- Hadad, B., Mauer, D. y Lewis, T. L. (2010). The effects of spatial proximity and collinearity on contour integration in adults and children. *Vision Research*, 50: 772-778

- Harvey, M., Milner, A. D. y Roberts, R. C. (1995). An investigation of hemispatial neglect using the landmark task. *Brain and Cognition*, 27: 59-78
- Harwerth, R.S., Moeller, M.C. y Wensveen, J.M. (1998) Effects of cue context on the perception of depth from combined disparity and perspective cues. *Optometry & Vision Science*, 75 (6):433-444
- He, Z.J., Wu, B., Ooi, T.L., Yarbrough, G. y Wu, J.(2004). Judging egocentric distance on the ground: occlusion and surface integration. *Perception*, 33(7):789-806
- Heeley, D.W. y Buchanan-Smith, H.M. (1990). Recognition of stimulus orientation. *Vision Research*, 30: 1429-1437
- Heinrich, S.P., Kromeier, M. Bach, M. y Kommerell, G. (2005). Vernier acuity for stereodisparate objects and ocular prevalence. *Vision Research*, 45(10): 1321-1328
- Henry, G.H., Goodwin, A.W. y Bishop, P.O. (1978). Spatial summation of responses in receptive fields of single cells in cat striate cortex. *Experimental Brain Research*, 32: 245-266
- Higashiyama, A. y Ueyama, E. (1998). The perception of vertical and horizontal distances in outdoor settings. *Perception & Psychophysics*, 44: 151-156
- Higgins, G. C. y Stultz, K. (1948). Visual acuity as measured with various orientations horizontal and vertical. *Perception*, 3: 47-48
- Horn, G. y Hill, R. M. (1969). Modifications of receptive fields of cells in the visual cortex occurring spontaneously and associated with bodily tilt. *Nature*, 221: 186-188
- Howard, I. P. (1982). *Human visual orientation*. New York: Wiley. ISBN: 0471279463
- Howard, I. P. y Kaneko, H. (1994). Relative shear disparity and the perception of surface inclination. *Vision Research*, 34: 2505-2517
- Howard, I.P. y Rogers, B.J. (2002). *Seeing in Depth Vol. 2: Depth Perception*, chapter 19: Stereopsis. Ontario: I. Porteous. ISBN: 978-0-19-536760-7
- Hubel, D. H. y Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. *Journal of General Physiology*, 39: 651-673
- Hubel, D.H. y Wiesel, T. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology of London*, 160: 106-154
- Hubel D.H. y Wiesel TN (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology*, 195: 215-243
- Hubel, D. H. y Wiesel, T. N. (1977). Functional architecture of macaque monkey visual cortex. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 198: 1-59
- Indow, T. y Watanabe, T. (1998). Alleys on an extensive frontoparallel plane: a second experiment. *Perception*, 17: 647-666
- Interrante, V., Anderson, L. y Ries, B. (2004). An experimental investigation of distance perception in real vs. immersive virtual environments via direct blind walking in a high-fidelity model of the same room. *ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*: 162

- Johnson, D.M. y Stewart, J.E. (1999). Use of virtual environments for the acquisition of spatial knowledge: Comparison among different visual displays. *Military Psychology*, 11(2): 129-148
- Johnston E.B., Cumming B.G. y Parker A.J. (1993) Integration of depth modules: stereopsis and texture. *Vision Research*, 33: 813-826
- Julesz, B. (1964). Binocular depth perception without familiarity cues. *Science*, 145: 356-363
- Julesz, B. (1971). *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago: The University of Chicago Press. ISBN: 0226415279
- Kaneko, H. y Howard, I. P. (1997). Spatial limitation of vertical-size disparity processing. *Vision Research*, 37: 2871-2878
- Katsuyama, N., Usui, N., Nose, I. y Taira, M. (2011). Perception of object motion in three-dimensional space induced by cast shadows. *Neuroimage*, 54(1):485-94
- Keil, M.K. y Cristobal, G. (2000). Separating the chaff from the wheat: possible origins of the oblique effect. *Journal of the Optical Society of America A*, 17(4): 697-710
- Kennedy, H., Martin, K., Orban, G. A. y Whitteridge, D. (1985). Receptive field properties of neurones in visual area 1 and visual area 2 in the baboon. *Neuroscience*, 14: 405-415
- Knill, D. C. y Saunders, J. A. (2003). Do humans optimally integrate stereo and texture information for judgments of surface slant? *Vision Research*, 43: 2539-2558
- Koenderink, J.J., van Doorn, A.J., Kappers, A.M.L. y Lappin, J.S. (2002). Large scale frontoparallels under full-cues conditions. *Perception*, 31: 1467-1475
- Koenderink, J.J., van Doorn, A.J. y Lappin, J.S. (2000). Direct measure of the curvature of visual space. *Perception*, 29: 69-79
- Künnapas, T. M. (1955). An analysis of the vertical-horizontal illusion. *Journal of Experimental Psychology*, 49, 134-140
- Künnapas, T. M. (1957). The vertical-horizontal illusion and the visual field. *Journal of Experimental Psychology*, 53: 405-407
- Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B. y Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: in defense of weak fusion. *Vision Research*, 35: 389-412
- Lappin, J. S., Shelton, A. L. y Rieser, J. J. (2006). Environmental context influences visually perceived distance. *Perception & Psychophysics*, 68: 571-581
- Levin, C. A. y Haber, R. N. (1993). Visual angle as a determinant of perceived interobject distance. *Perception & Psychophysics*, 54: 250-259
- Li, B., Peterson, M.R. y Freeman, R.D. (2003). The Oblique Effect: a neural basis in the visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 90: 204-217
- Liu, G.B. y Pettigrew, J.D. (2003). Orientation mosaic in barn owl's visual Wulst revealed by optical imaging: comparison with cat and monkey striate and extra-striate areas. *Brain Research*, 961: 153-158

- Loffler, G. (2008). Perception of contours and shapes: Low and intermediate stage mechanisms. *Vision Research*, 48: 2106-2127
- Loomis, J. M., da Silva, J., Fujita, N. y Fukusima, S. S. (1992). Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(4): 906-921
- Loomis, J. M. y Knapp, J. M. (2003). Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. En: L. J. Hettinger y M. W. Haas (ed.), *Virtual and Adaptive Environments*: 21-46. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates
- Loomis, J. M. y Philbeck, J. W. (1999). Is the anisotropy of perceived 3-D shape invariant across scale? *Perception & Psychophysics*, 61: 397-402
- Luneburg, R.K. (1950). The metric of binocular visual space. *Journal of the Optical Society of America*, 40(10): 627-642
- Luria, S. M. (1963). The effect of body-position on meridional variations in scotopic acuity. *American Journal of Psychology*, 76: 598-606
- Maffei, L. y Campbell, F. W. (1970). Neurophysiological localization of the vertical and horizontal visual co-ordinates in man. *Science*, 167: 386-387
- Mamassian, P. y de Montalembert, M.A. (2010). A simple model of the vertical-horizontal illusion. *Vision Research*, 50(10): 956-62
- Mannion, D.J., McDonald, J.S. y Clifford, C.W.G. (2009). Discrimination of the local orientation structure of spiral Glass patterns early in human visual cortex. *NeuroImage*, 46(2): 511-515
- Mannion, D.J., McDonald, J.S. y Clifford, C.W.G. (2010). Orientation Anisotropies in Human Visual Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 103: 3465-3471
- Mansfield, R. J. W. y Ronner, S. F. (1978). Orientation anisotropy in monkey visual cortex. *Brain Research*, 149: 229-234
- Marr, D. (1985). *La Vision*. Madrid: Alianza
- Mather, G. y Smith, D. R. R. (2004). Combining depth cues: effects upon accuracy and speed of performance in a depth-ordering task. *Vision Research*, 44: 557-562.
- Matsushima, E. H., de Oliveira, A. P., Ribeiro-Filho, N. P. y da Silva, J. A. (2005). Visual angle as determinant factor for relative distance perception. *Psicológica*, 26: 97-104
- Matthew, B.L., Peterson, R. y Freeman, R.D. (2003). Oblique effect. A neural basis in the visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 90: 204-217
- Matthews, N; Meng, X; Xu, P y Qian, N. (2003). A physiological theory of depth perception from vertical disparity. *Vision Research*, 43: 85-99
- Mayhew, J. E. W. y Longuet-Higgins, H. C. (1982). A computational model of binocular depth perception. *Nature*, 297: 376-379
- McGraw, P. V. y Whitaker, D. (1999). Perceptual distortions in the neural representation of visual space. *Experimental Brain Research*, 125: 122-128
- McKee, S.P., Verghese, P., Ma-Wyatt, A. y Petrov, Y. (2007). The Wallpaper illusion explained, *Journal of Vision*, 7(14) 10: 1-11

- McKendrick, A. M., Weymouth, A. E. y Battista, J. (2010). The effect of normal aging on closed contour shape discrimination. *Journal of Vision*, 10: 1.1-1.9
- Meng, J. y Sedgwick, H.A. (2001) Distance perception mediated through nested contact relations among surfaces. *Perception and Psychophysics*, 63 (1): 1-15
- Messing, R. y Durgin, F.H. (2005). Distance Perception and the Visual Horizon in Head-Mounted Displays. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(3): 234-250
- Mitchison, G. J., y Westheimer, G. (1984). The perception of depth in simple figures. *Vision Research*, 24: 1063-1073
- Mohler, B. J., Creem-Regehr, S. H. y Thompson, W. B. (2006). The influence of feedback on egocentric distance judgments in real and virtual environments. In *Proceedings of the Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*: 9-14. New York: ACM Press.
- Mustillo, P., Francis, E., Oross, S., Fox, R. y Orban, G.A. (1988). Anisotropies in global stereoscopic orientation discrimination. *Vision Research*, 28: 1315-1321
- Norman, J. F., Todd, J. T., Perotti, V. J. y Tittle, J. S. (1996). The visual perception of three-dimensional length. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22: 173-186
- Norton, T.T., Corliss, D.A. y Bailey, J.E. (2002). *The psychophysical measurement of visual function*. USA: Butterworth-Heinemann. ISBN: 0-7506-9935-3
- Nundy, S., Lotto, R.B., Coppola, D., Shimpf, A. y Purves, D. (2000). Why are angles misperceived? *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 97(10): 5592-5597
- Ogle, K.N. (1955). Stereopsis and vertical disparity. *AMA Archives of Ophthalmology*, 53: 495-504
- Okada, Y., Ukai, K., Wolffsohn, J. S., Gilmartin, B., Iijima, A. y Bando, T. (2006). Target spatial frequency determines the response to conflicting defocus-and convergence-driven accommodative stimuli. *Vision Research*, 46: 475-484
- Orban, G.A. y Vogels, R. (1998). The neuronal machinery involved in successive orientation discrimination. *Progress in Neurobiology*, 55: 117-147
- Orban, G.A., Vandenbussche, E. y Vogels, R. (1984). Human orientation discrimination tested with long stimuli. *Vision Research*, 24: 121-128
- Payne, B.R. y Berman, N. (1983). Functional organization of neurons in cat striate cortex: variations in preferred orientation and orientation selectivity with receptive-field type, ocular dominance, and location in visual-field map. *Journal of Neurophysiology*, 49: 1051-1072
- Pertaub, D.P., Slater, M. y Barker, C. (2002). An experiment on public speaking anxiety in response to three different types of virtual audience. *Teleoperators and Virtual Environments - Presence*, 11(1): 68-78
- Petrov, Y. y Glennerster, A. (2004). The role of a local reference in stereoscopic detection of depth relief. *Vision Research*, 44: 367-376

- Petrov, Y. y Glennerster, A. (2006). Disparity with respect to a local reference plane as a dominant cue for stereoscopic depth relief. *Vision Research*, 46: 4321-4332
- Pettigrew, J. D., Nikara, T. y Bishop, P. O. (1968). Responses to moving slits by single units of cat striate cortex. *Experimental Brain Research*, 6: 373-390
- Plumert, J. M., Kearney, J. K. y Cremer, J. F. (2004). Children's perception of gap affordances: Bicycling across traffic-filled intersections in an immersive virtual environment. *Child Development*, 75: 1243-1253
- Plumert, J. M., Kearney, J. K., Cremer, J. F. y Recker, K. (2005). Distance perception in real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(3): 216-233
- Poggio, G.F. (1991). Biological basis of Stereoscopic Vision (cap. 11). En Regan, D. (ed), *Vision and Visual Dysfunction*, vol. 9: Binocular Vision. MacMillan Press
- Poggio, G. F. y Fischer, B. (1977). Binocular interaction and depth sensitivity of striate and prestriate cortical neurons of the behaving rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, 40: 1392-1405
- Pons, A.M y Martínez Verdú, F.M. (2004). *Fundamentos de Visión Binocular*. Valencia: Publicacions de la Universitat de València. ISBN: 9788437059181
- Porrill, J., Duke, P. A., Taroyan, N. A., Frisby, J. P. y Buckley, D. (2010). The accuracy of metric judgments: perception of surface normal. *Vision Research*, 50: 1140-1157
- Portas, C.M., Strange, B.A., Friston, K.J., Dolan, R.J. y Frith, C.D. (2000). How does the brain sustain a visual percept? *Proceedings of the Royal Society of London B*, 267: 845-850
- Post, R.B., O'Malley, M.D., Yeh, T.L. y Bethel, J. (2006). On the origin of vertical line bisection errors. *Spatial Vision*, 19(6): 505-27
- Prinzmetal, W. y Gettleman, L. (1993). Vertical-horizontal illusion: One eye is better than two. *Perception & Psychophysics*, 53(1): 81-88
- Proffitt, D. R., Stefanucci, J., Banton, T. y Epstein, W. (2003). The role of effort in perceiving distance. *Psychological Science*, 14(2): 106-112
- Puelles, L., Martínez, S., Martínez, M. (2008). *Neuroanatomía*. Madrid: Médica Panamericana. ISBN: 978-84-7903-453-5
- Read, J.C.A. y Cumming, B.G. (2006). Does depth perception require vertical-disparity detectors?. *Journal of Vision*, 6(12)1: 1323-1355
- Revonsuo, A., Wilenius-Emet, M., Kuusela, J. y Lehto, M. (1997). The neural generation of a unified illusion in human vision. *NeuroReport*, 8: 3867-3870
- Riener, C. y Proffitt, D. (2002). Quantifying spatial presence. *Fifth Annual International Workshop on Presence*: 345-352
- Rieser, J. J., Ashmead, D. H., Talor, C. R. y Youngquist, G. A. (1990). Visual perception and the guidance of locomotion without vision to previously seen targets. *Perception*, 19: 675-689
- Rock, I. (1985). *La percepción*. Barcelona: Labor (Prensa Científica). ISBN: 84-7593-018-2

- Rogers, B. J. y Bradshaw, M. F. (1993). Vertical disparities, differential perspectives and binocular stereopsis. *Nature*, 361: 253-255
- Rosas, P., Wagemans, J., Ernst, M.O. y Wichmann, F.A. (2005) Texture and haptic cues in slant discrimination: reliability-based cue weighting without statistically optimal cue combination. *Journal of Optical Society of America A*, 22: 801-809
- Rushton, S. K. y Riddell, P. M. (1999). Developing visual systems and exposure to virtual reality and stereo displays: some concerns and speculations about the demands on accommodation and vergence. *Applied Ergonomics*, 30: 69-78
- Sahm, C.S., Creem-Regehr, S.H., Thompson, W.B. y Willemsen, P. (2005). Throwing versus walking as indicators of distance perception in real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 1(3): 35-45
- Santillán, J.E., Marques, S.L. y da Silva, J.A. (2011). Julgamento de colinearidade e percepção de distância exocêntrica em campo aberto. *Psicologia USP*, 22(1): 265-288
- Schwartz, S.H. (2004). Visual perception. A clinical orientation, cap. 11: Psychophysical methodology. USA: Mc Graw Hill. ISBN: 0071411879
- Sedgwick, H. A. (1983). Environmental-centered representation of spatial layout: Available visual information from texture and perspective. En: Beck, J., Hope, B. y Rosenfeld, A. (Eds.), *Human and machine vision*: 425-458. San Diego: Academic Press. ISBN: 012084320X
- Sedgwick, H. A. (1986). Space perception. En: Boff, K.R., Kaufman, L. y Thomas, J.P. (Eds.), *Handbook of human perception and performance*, cap. 21. New York: Wiley. ISBN: 0471829579
- Sedgwick, H. A. (1990). Combining multiple forms of visual information to specify contact relations in spatial layout. En: Schenker, P.S. (Ed.), *Sensor fusion II: Human and machine strategies*. SPIE Proceedings, 1198: 447-458. Bellingham: SPIE. ISBN: 0819402370
- Sedgwick, H.A. (2001). Visual Space Perception. En: Goldstein, B. (Ed), *Blackwell Handbook of Perception*, cap. 5: 129-156. USA: Blackwell Publishers. ISBN: 0631206833
- Sedgwick, H. A. y Levy, S. (1985). Environment-centered and viewer centered perception of surface orientation. *Computer Vision, Graphics & Image Processing*, 31: 248-260
- Serrano-Pedraza, I. y Read, J.C.A. (2009). Stereo visión requires an explicit encoding of vertical disparity. *Journal of Vision*, 9(4)3: 1-13
- Serrano-Pedraza, I., Phillipson, G.P. y Read, J.C.A. (2010). A specialization for vertical disparity discontinuities. *Journal of Vision*, 10(3)2: 1-25
- Silver, C.A. y Farber, E. (1968). Driver judgment in overtaking situations. *Transportation Research Board*, 247: 57-62
- Sinai, M. J., Ooi, T. L. y He, Z. J. (1998). Terrain influences the accurate judgement of distance. *Nature*, 395: 497-500
- Steinman, S. B., Steinman, B. A. y Garzia, R. P. (2000). *Foundations of Binocular Vision. A clinical perspective*. New York: Mc Graw Hill. ISBN: 0838526705

- Stevens, S.S. (1986). *Psychophysics*. USA:Transaction Publishers. ISBN: 978-0-88738-643-5
- Stidwill, D. y Fletcher, R. (2011). *Normal binocular vision. Theory, investigation and practical aspects*, cap. 10: 152-171. UK: Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-4051-9250-7
- Swan, J.E., Gabbard, J.L., Hix, D., Schulman, R.S. y Kim, K.P. (2003). A comparative study of user performance in a map-based virtual environment. *Proceedings of IEEE Virtual Reality 2003*: 259-266
- Swan, J. E., II, Jones, A., Kolstad, E., Livingston, M. A. y Smallman, H.S. (2007). Egocentric depth judgments in optical see-through augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 13: 429-442
- Thompson, W.B., Willemsen, P., Gooch, A.A., Creem-Regehr, S.H., Loomis, J.M y Beall, A.C. (2004). Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments?. *Presence*, 13(5): 560-571
- Tononi, G. y Edelman, G.M. (1998). Consciousness and complexity. *Science*, 282: 1846-1851
- Toye, R. C. (1986). The effect of viewing position on the perceived layout of space. *Perception and Psychophysics*, 40: 85-92
- Tsao, D.Y., Vanduffel, W., Sasaki, Y., Fize, D., Knutsen, T.A., Mandeville, J.B., Wald, L.L., Dale, A.M., Rosen, B.R., Van Essen, D.C., Livingstone, M.S., Orban, G.A. y Tootell, R.B. (2003). Stereopsis activates V3A and caudal intraparietal areas in macaques and humans. *Neuron*, 39: 555-568
- Tsutsui, K., Taira, M. y Sakata, H. (2005). Neural mechanisms of three-dimensional vision. *Neuroscience Research*, 51(3):221-229
- Tyler, C.W. y Clarke, M.B. (1990). The Autostereogram. *Stereoscopic Displays and Applications. Proc. SPIE*, 1258: 182-196
- Van Ee, R. y Erkelens C.J. (2000). Is there an interaction between perceived direction and perceived aspect ratio in stereoscopic vision? *Perception & Psychophysics* 62: 910-926
- Vandenbussche, E., Vogels, R. y Orban, G.A. (1986). Human orientation discrimination: changes with eccentricity in normal and amblyopic vision. *Investigative Ophthalmology and Vision Science*, 27: 237-245
- Vidyasagar, T. R. y Henry, G. H. (1990). Relationship between preferred orientation and ordinal position in neurons of cat striate cortex. *Visual Neuroscience*, 5: 565-569
- Wagner, M. (1985). The metric of visual space. *Perception and Psychophysics*, 38: 483-495
- Waller, D., Lippa, Y. y Richardson, A. (2008). Isolating observer-based reference directions in human spatial memory: Head, body, and the self-to-array axis. *Cognition*, 106(1): 157-183
- Wang, G., Ding, S. y Yunokuchi, K. (2003). Difference in the representation of cardinal and oblique contours in cat visual cortex. *Neuroscience Letters*, 338: 77-81

- Wann, J. P., Rushton, S. y Mon-Williams, M. (1995). Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments. *Vision Research*, 35: 2731-2736
- Watt, S. J., Akeley, K., Ernst, M. O. y Banks, M. S. (2005). Focus cues affect perceived depth. *Journal of Vision*, 5: 834-862
- Westheimer, G. (2005). Anisotropies in peripheral Vernier acuity. *Spatial Vision*, 18: 159-167
- Westheimer, G. y Beard, B.L. (1998). Orientation dependency for foveal line stimuli: detection and intensity discrimination, resolution, orientation discrimination and Vernier acuity. *Vision Research*, 38: 1097-1103
- Wiest, W.M. y Bell, B. (1985). Stevens's exponent for psychophysical scaling of perceived, remembered, and inferred distance. *Psychological Bulletin*, 98(3): 457-470
- Willemsen, P. y Gooch, A.A. (2002). Perceived egocentric distances in real, image-based, and traditional virtual environments. *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, 275-276
- Witmer, B.G. y Sadowski, W.J.J. (1998). Nonvisually guided locomotion to a previously viewed target in real and virtual environments. *Human Factors*, 40: 478-488
- Wolfe, U., Maloney, L. T. y Tam, M. (2005). Distortions of perceived length in the fronto-parallel plane: tests of perspective theories. *Perception & Psychophysics*, 67: 967-979
- Wu, J., He, Z. J. y Ooi, T. L. (2008). Perceived relative distance on the ground affected by the selection of depth information. *Perception and Psychophysics*, 70(4): 707-713
- Ziemer, C.J., Plumert, J.M., Cremer, J.F. y Kearney, J.K. (2009). Estimating distance in real and virtual environments: Does order make a difference? *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71 (5): 1095-1106
- Zlaskova, M. (1993). Orientation identification at different background level: Its precision and distortions. *Vision Research*, 33: 2073-2081

