



GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

TRABAJO FINAL DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN DE UNA SALA DE CINE PARA LA
PROYECCIÓN DE PELÍCULAS EN 3D**

CRISTINA ÁLVAREZ BORRELL

JOSÉ LUIS ÁLVAREZ MUÑOZ
DEPARTAMENTO DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

30 DE JUNIO DE 2015

Facultat d'Òptica i Optometria de Terrassa

© Universitat Politècnica de Catalunya, año 2015. Todos los derechos reservados



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

El Sr. José Luis Álvarez Muñoz, com a tutor/a del treball y el Sra. Cristina Álvarez Borrell com a director/a del treball

CERTIFIQUEN

Que el Sr. José Luis Álvarez Muñoz ha realitzat sota la seva supervisió el treball “Caracterització d’una sala de cinema per a la projecció de pel·lícules en 3D” que es recull en aquesta memòria per optar al títol de grau en Òptica i Optometria.

I per a què consti, signo/em aquest certificat.

Sr. José Luis Álvarez Muñoz
Tutor/a del treball

Sra. Cristina Álvarez Borrell
Director/a del treball

Terrassa, 30 de juny de 2015



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

CARACTERIZACIÓ D'UNA SALA DE CINEMA PER A LA PROYECCIÓ DE PEL·LÍCULES EN 3D

RESUM

El treball es centra en caracteritzar la sala comercial de projecció de pel·lícules en 3D amb la pantalla més gran de Catalunya. Ens proposem caracteritzar geomètricament la sala i descriure el sistema de projecció que utilitza. Per a relacionar-ho amb la optometria es definirà un observador patró, del que considerarem el seu rang de la zona de visió binocular simple i nítida per a obtenir, mitjançant els criteris de Sheard i Percival, la zona de visió còmoda i extrapolar-ho a la separació entre imatges dels estímuls monoculars sobre la pantalla i la distància a la que es percebrà l'estímul. A través de l'àrea de ZVBSN de l'observador patró també avaluarem què suposa en la projecció de l'estímul el límit de visió simple i nítida. També s'avalua la influència de la DIP en la percepció de l'estímul 3D i la variació de la convergència requerida segons la posició de l'observador.

Tots aquest anàlisis es fan per a diferents butaques característiques de la sala. També es fa una descripció de la distribució de la lluminositat de la sala en diferents condicions de projecció.

Finalment, després d'ordenar i avaluar una gran quantitat de dades hem pogut constatar que com més petita es la distància entre l'observador i l'estímul, més gran es el requeriment de convergència. Un altre aspecte que hem pogut corroborar es que variar la posició de l'estímul en la pantalla repercuteix sobre la convergència requerida.

En quant a la rellevància de la DIP, com més petita, menor esforç de convergència es necessita per a fixar un mateix punt i, a mesura que la DIP augmenta, la distància a la que es percep la imatge s'allunya. La posició en la sala no es determinant a l'hora de definir quina serà la distància a la que es percebrà l'estímul.

Per que fa a l'estímul, un increment de la distància de desdoblament entre les imatges monoculars produeix un augment de la espectacularitat de l'estímul i exigeix una demanda de convergència superior.



GRADO EN OPTICA I OPTOMETRIA

CARACTERIZACIÓN DE UNA SALA DE CINE PARA LA PROYECCIÓN DE PELÍCULAS EN 3D

RESUMEN

El Trabajo se centra en caracterizar la sala comercial de proyección de películas en 3D con la pantalla más grande de Catalunya. Nos proponemos caracterizar geoméricamente la sala y describir el sistema de proyección que utiliza. Para relacionarlo con la optometría se definirá un observador promedio, del cual tomaremos su rango de la Zona de Visión Binocular Simple y Nítida para obtener, mediante los criterios de Sheard y Pércival, la zona de visión cómoda, y extrapolarlo a la separación entre imágenes de los estímulos monoculares sobre la pantalla y la distancia a la que se percibirá el estímulo.

A través del área de ZVBSN del observador patrón también evaluaremos qué supone para la proyección del estímulo el límite de visión simple y nítida. También se evalúa la influencia de la DIP en la percepción del estímulo 3D y la variación de la convergencia requerida según la posición del observador. Todos estos análisis se hacen para distintas butacas características de la sala. También se describe en el trabajo la distribución de la luminosidad de la sala en distintas condiciones de proyección.

Finalmente, después ordenar y evaluar una gran cantidad de datos hemos podido constatar que cuanto menor es la distancia entre el observador y el estímulo, mayor es el requerimiento de convergencia. Otro aspecto que hemos podido corroborar es que variar la posición del estímulo en la pantalla repercute sobre la convergencia requerida.

En cuanto a la relevancia de la DIP, cuanto más pequeña, menor esfuerzo de convergencia se necesita para fijar un mismo punto y a medida que la DIP aumenta, la distancia a la que se percibe la imagen se aleja. La posición en la sala no es determinante en cuanto a la percepción de la distancia a la que percibirá el estímulo.

En cuanto al estímulo, un incremento de la distancia de desdoblamiento entre las imágenes monoculares produce un aumento de la espectacularidad del estímulo y exige una demanda de convergencia superior.



GRADO EN OPTICA I OPTOMETRIA

CHARACTERIZATION OF A CINEMA HALL FOR THE 3D MOVIE PROJECTION

SUMMARY

This academic work focuses on characterizing the commercial projection room movies in 3D with the Catalonia's largest screen. We intend to characterize geometrically that room and describe the projection system that it uses. To relate it to the optometry we will define an average observer, which will take its range from the Simple and Clear Binocular Viewing Area to obtain, using the criteria of Sheard and Percival, the comfortable viewing area, and extrapolate it to the separation between the images of monocular cues on the screen and the distance to which the stimulus will be perceived. Through the SCBVA of the pattern observer we will also evaluate what the projection of the stimulus means to the limit of simple and clear vision. We will also evaluate the influence of the IDP (Interpupillary distance) in the perception of the 3D stimulus and the variation of the required convergence depending on the observer position. All these analyses are made for different characteristic armchairs in the room. Also, it is described in the study the distribution of the brightness of the room in different conditions of projection

Finally, after sorting and evaluate the great amount of data we could conclude that the smaller the distance between the observer and the stimulation, the higher the convergence requirement. Another aspect that we could corroborate is that changing the position of the stimulus on the screen affects the required convergence.

Regarding the relevance of the IDP in the perception of the stimulus, we can say that the smaller the IDP, the lower convergence effort is needed to fix the same point and as the IDP increases, the distance at which the image is perceived gets away. The position of the observer in the room is not determinative to the distance to perceive the stimulus.

For the stimulus, an increased distance between images cleavage produces a spectacular increase in stimulus and requires a demand of higher convergence.



GRADO EN OPTICA I OPTOMETRIA

CHARACTERIZATION OF A CINEMA HALL FOR THE 3D MOVIE PROJECTION

EXTENSIVE SUMMARY

This academic work focuses on characterizing the commercial projection room movies in 3D with the Catalonia's largest screen. The idea of this work is to know the different methods that are used to project 3D movies, defining the parameters that characterize the room and relating it to the optometric aspects involved in the stereoscopic vision.

We intend to characterize geometrically that room and describe the projection system that it uses. To relate it to the optometry we will define an average observer, which will take its range from the Simple and Clear Binocular Viewing Area to obtain, using the criteria of Sheard and Percival, the comfortable viewing area, and extrapolate it to the separation between the images of monocular cues on the screen and the distance to which the stimulus will be perceived. Through the SCBVA of the pattern observer we will also evaluate what the projection of the stimulus means to the limit of simple and clear vision. We will also evaluate the influence of the IDP (Interpupillary distance) in the perception of the 3D stimulus and the variation of the required convergence depending on the observer position. All these analyses are made for different characteristic armchairs in the room. Also, it is described in the study the distribution of the brightness of the room in different conditions of projection

To carry out all the purposes of the work an special permission has been necessary to access to the 3D movie screening room to be able to take measures both the screen such as those relating to the position of the armchairs and the room brightness, as well as, to enter the laboratory of imaging, to learn about the technology used by the projector.

The room, in which we take measures, has 416 seats spread over 17 rows at different heights, to avoid the obstruction between observers. Of these 17 rows, we can differentiate four different blocks. First one composed of a single row of 26 armchairs, which is in the lower part of the room with special locations adapted for people with disabilities. It defines an envelope curve toward the screen and has a width of 19 m. The second, composed of 5

rows of 21 armchairs each, placed centred and parallel from the plane of the screen and with a width of 15 m. The third group is composed of 9 rows of 27 armchairs each. Its width is 19 m. And finally, the fourth block, which is located in the farthest to the screen and is composed by two rows of 24 armchairs each. Same as the second block the length of these rows is 15 m. The distances between armchairs are 60cm from the adjacent armchair and 1m with respect to the previous one, except for the first row, as it is curved, the distances between each armchair back row vary according to position.

The room is equipped with a Silver Screen, 19m wide and 11m high that reflects the light from the projector without altering the polarization that emits. This is not completely plane; it has a light curve for a better surrounding effect during projection.

The projector that is used in this room is a NEC NC3204S-A. It has the latest technology and design in 4K 3D projection. It uses a 7KW Xenon light bulb, and has a maximum of 33,000 lumens emission. The adjustment or focus system is fully powered and has a resolution of 4096 x 2160. It is ready to project 2D and 3D movies; it has only one cannon, and what difference the type of projection is the actual file that plays and an LCD screen that polarizes the emission of light in circular dextrorotatory and levorotatory and that should be placed to the projector cannon to emit 3D movies.

To know the brightness of the room, a photometer has been used. Measures were taken for each of the seats that we considered more characteristic: the most lateral from the first one, the second one, the ninth and the seventeenth row, and the central of each one. Basically, it is corresponded with the near distance, the medium and the far one respectively from the screen. For the nearest distance we have measured the first and second row, because the first row is different from the extremes. On the other hand, the second row follows the same path of the other rows of the room, and data is easier to compare.

Brightness has been measured for different distances. Generally, at the moment in which observers get into the room, luminosity is at 100%, although no measures were done because during that moment no images were shown. Once the projection of the images of adverts and trailers began, the percentage decreases to the value of 50% and afterwards lights turn off completely when the film starts. The only ones that stay on are the emergency ones and the ones that illuminate the stairs. So, brightness measures were done in half-light and off condition. Moreover, with the aim to obtain the filter transmittance, the luminosity with lights turn off was done with the photometer with the polarized filter that the observer had to use in order to see in 3D, situated in front of the photometer. From this comparison between this measure and the one with the light off and with no filter, we can set the percentage of the transmittance, which is 37%.

For the definition of a pattern patient we have taken a random sample of 12 patients of different ages and sex. The only thing they have to fulfil was: having a good binocular vision. From this point, each patient wearing their current correction, had to do several

tests to know SCBVA, as their IDP and phorias. To make sure that all patients had the ability to see stereopic images, the first test that was done was Titmus at 40cm distance. Afterwards, a test for vergences was done, putting an optotype of vertical letters of the best visual acuity that the patient is able to reach. We took two measures, in order to trace then the lines of the SCBVA graph. The first measure was done at 70cm and the second one at 5.2m. Temporal base prisms are situated in front of each eye progressively, until the patient indicates that the tests that is looking to gets blurred constantly or double, in order to determine the limiting right line. The same procedure, but with nasal base, to determine the limiting left line. Also, the phoria of the patient is measured at the same distance in which we have realized the test of vergences.

With all this information, we elaborated a database, in which we characterise the pattern observer and with the aim to make a simulation with 3D experience for those characteristically observers and for different positions of the room.

In order to make this simulation, it is necessary to design an Excel, which relate the data from the seats of the room with accommodation and convergence, which require the function of the stimuli, that projects and the distance in which the screen is situated. Also the take into account the IDP measure of the patient to make this calculations. It is possible to obtain, in the same Excel, the distance in which the stimulus is perceived.

With this Excel, and after elaborating the SCBVA graphs for each patient, we have related, among other aspects, the limit for each patient with the magnitude of the stimuli at which corresponds and the distance at which they perceived it.

Finally, after sorting and evaluate the great amount of data we could conclude all that we initially proposed.

The pattern observer which results of the median of all patients evaluated have a IDP of 60.25mm, is exophoric for both far and near vision and is capable to withstand 16.33 Δ BT and 7.33 Δ BN at 5.2m and 21.50 Δ BT and 10,50 Δ BN.

We have found that, as expected, the requirement for convergence is tied to the relative position between the chair of the observer and the distance to the stimulus projected onto the screen. The smaller the distance between the observer and the stimulation, the higher the convergence requirement. Likewise, accommodation is also related to this. The closer the armchair stimulus, the greater the accommodative requirement stands, but for the conditions evaluated, the requirement of accommodation we need is too small that variations that occur for different positions in the room are not considered significant.

Another aspect that we could corroborate is that changing the position of the stimulus on the screen affects the required convergence, affecting evenly for all positions in the room, varying by the same percentage for all. And, as expected, an increase in doubling the distance between images requires greater convergence.

Regarding the relevance of the IDP in the perception of the stimulus, we can say that it does exist a relationship between them, and the smaller the IDP, the lower convergence effort is needed to fix the same point. For an increase of IDP, the effect is the opposite. We also wanted also to assess whether this variation is uniform for all the seats in the room, and we found that it was not. The smaller the distance between stimulus and the armchair, greater impact has a variation of the IDP.

Another aspect that worried us at the beginning of the study was to know how IDP influences in the distance at which the stimulus is perceived. For that, we have learned that as the IDP increases, the distance at which the image is perceived gets away. In other words, observers with big values of IDP perceived less spectacular in3D images than other observers with a smaller IDP.

For the stimulus, we can say that splitting distance that there is between the monocular images projected, influences directly on the spectacle of the stimulus and the required convergence. An increased distance between images cleavage produces a spectacular increase in stimulus and requires a demand of higher convergence. For positions of the stimulus on the side of the chair, separation distances between big images are tolerated better than if it were projected in front of the chair.

Even so, when the splitting distance between monocular images is stable, we found that for a given observer, the distance at which the 3D stimulus is seen is very similar for all the seats of the room. The closest seats to the screen perceive the stimulus a little closer than the rest, but there is not a big change from the rest of armchairs, which suggests that the position of the observer in the room is not determinative to the distance to perceive the stimulus.

Finally, and as regards the analysis about comfortable viewing area of patients, in all patients in our case, that Percival criteria gives to observers a major comfortable zone when it is about coverage. This happens because, in our case all patients evaluated are exophorics and then, the comfortable area is moved to the right, to the temporal base (BT).

We must say that the study also includes a summary of the most important optometric aspects about 3D vision, where generalities about what is 3D vision is, features about stereoscopic stimulus, requirements to have stereoscopic vision and different methods to obtain an 3D images projection are explained, in order to facilitate the understanding of the study and the comprehension to the widest possible audience.

ÍNDICE

I.	PRESENTACIÓN	1
II.	INTRODUCCIÓN	2
1.	EN QUÉ CONSISTE LA VISIÓN 3D	2
1.1	VISIÓN BINOCULAR	2
1.2	ESTEREOPSIS	3
1.2.3.	FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: LUCES Y SOMBRAS	3
1.2.1.	FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: TAMAÑO APARENTE	3
1.2.2.	FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: PERSPECTIVA AÉREA	4
1.2.4.	FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: PERSPECTIVA GEOMÉTRICA	4
1.2.5.	FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: INTERPOSICIÓN	4
1.2.6.	FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: PARALAJE DE MOVIMIENTO	5
1.2.7.	FACTORES EMPÍRICOS OCULOMOTORES: CONVERGENCIA	5
1.2.8.	FACTORES EMPÍRICOS OCULOMOTORES: ACOMODACIÓN	5
1.3	DIPLOPIA	6
1.4	FUSIÓN MOTORA Y SENSORIAL	7
2.	CONVERGENCIA	8
2.1	HETEROFORIAS	8
2.1.1	HETEROFORIAS HORIZONTALES	8
2.1.2	HETEROFORIAS VERTICALES Y CICLOFORIAS	8
3.	RELACIÓN CONVERGENCIA-ACOMODACIÓN	9
3.1	ZONA DE VISIÓN BINOCULAR SIMPLE Y NÍTIDA (ZVBSN)	9
3.1.1	CRITERIO DE COMFORT DE PERCIVAL	10
3.1.2	CRITERIO DE COMFORT DE SHEARD	10
3.2	RELACIÓN CONVERGENCIA-ACOMODACIÓN.	11
4.	TÉCNICAS DE ESTEREOGRAFIA	12
4.1	ESTEREOGRAFIA SIMULTÁNEA	12
4.2	ESTEREOGRAFIA SECUENCIAL	12
4.3	EJES ÓPTICOS	13

5. CARACTERÍSTICAS DE LA IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS	14
5.1 DIMENSION VERTICAL	14
5.2 DIMENSION HORIZONTAL	14
5.3 ROTACIONES	14
5.4 TAMAÑO	14
5.5 SIMILITUD (NITIDEZ Y CLARIDAD)	14
6. TIPOS DE PROYECCIÓN 3D	15
6.1 ANAGLIFO	15
6.2 SISTEMAS DE POLARIZACIÓN	17
6.2.1 POLARIZACIÓN LINEAL	17
6.2.2 POLARIZACIÓN CIRCULAR	18
6.3 MÉTODO VISIÓN ALTERNANTE	19
6.4 TABLA RESUMEN	20
III. OBJETIVOS DEL TRABAJO	21
IV. METODOLOGÍA	22
7. PARAMETRIZACIÓN DE LA SALA	25
7.1 INTRODUCCION	25
7.2 PROYECTOR	26
7.3 PANTALLA	27
7.4 GAFAS	28
7.5 BUTACAS	28
7.6 LUMINOSIDAD DE LA SALA	29
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
VI. CONCLUSIONES	51
VII. BIBLIOGRAFÍA	52

I. PRESENTACIÓN

El tema sobre el que se desarrolla este trabajo es la caracterización de una sala de cine 3D, los distintos métodos de proyección y algunos aspectos optométricos que intervienen en la visión estereoscópica. También se hace un pequeño estudio sobre qué áreas de la sala son las más adecuadas para experimentar la mejor experiencia estereoscópica.

El atractivo de este trabajo yace en que hasta ahora no había sido posible acceder a una sala comercial especializada en proyecciones cinematográficas y, por primera vez, hemos tenido acceso a una de ellas, que cuenta con la mayor pantalla de Catalunya y con una gran afluencia de público. Hemos podido, por tanto, recrear las condiciones reales en las que se encuentran los espectadores cuando van a ver una película en 3D.

Resulta interesante éste ámbito porque no hay demasiado estudios sobre este tema y se ha producido una gran evolución en los sistemas de proyección 3D en los últimos años.

En la primera parte del trabajo se desarrolla el marco teórico optométrico que se relaciona con la visión estereoscópica y se describen cuáles son las características que deben cumplir las imágenes estereoscópicas para poder percibirse como tales.

A continuación se detallan cuáles son las técnicas que existen para grabar y proyectar películas en 3D, así como qué requisitos son necesarios para la cámara, la pantalla y los proyectores. Se incluye en este apartado una tabla sencilla que resume y compara todos los métodos de proyección.

En la segunda parte del trabajo, se resuelve la caracterización de la sala propiamente dicha. Se describe qué técnica de proyección 3D se utiliza específicamente en esta sala, cuáles son las características de la pantalla y el proyector que emplean, y la posición de cada una de las butacas de la sala. También se hace referencia a los niveles de luminosidad y se analiza cuáles son las posiciones de la sala que favorecen la mejor experiencia estereoscópica.

II. INTRODUCCIÓN

1. EN QUÉ CONSISTE LA VISIÓN 3D

1.1 VISIÓN BINOCULAR

La visión binocular implica, que además de un correcto funcionamiento monocular de los ojos, hay una coordinación motora y sensorial entre ellos. Para que exista visión binocular, deben cumplirse las siguientes premisas:

- Los dos campos visuales monoculares deben solaparse en una región lo suficientemente amplia para poder obtener un campo binocular (visto simultáneamente por ambos ojos) lo suficientemente extenso.
- Los movimientos de los ojos se deben realizar de una forma coordinada, para que los ejes visuales de cada ojo se encuentren sobre el objeto que se está fijando. Es decir, debe haber fijación binocular, que permite dirigir los ejes visuales de ambos ojos simultáneamente a un mismo objeto. Además, esta fijación binocular debe realizarse para diferentes posiciones de mirada, de manera que se obtenga un campo de fijación binocular lo más extenso posible.
- Las vías visuales deben permitir una correcta transmisión neuronal de los estímulos generados por las dos imágenes retinianas, hasta llegar a las áreas asociadas de la corteza cerebral.
- El cerebro debe tener capacidad para fusionar (procesar e interpretar como una única imagen la información que le llega del campo visual binocular) las imágenes neurales para percibir sólo una.

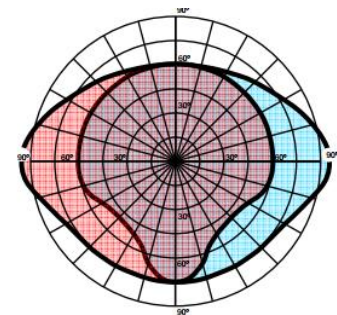


Figura 1. Campo visual conjunto y campo visual binocular (morado)

Teniendo en cuenta que cada ojo tiene una dirección visual, podemos decir que si la visión de los ojos está coordinada correctamente y no hay problemas, las fóveas de cada ojo tienen la misma dirección visual. Es decir, ambas fóveas, localizan el objeto en el espacio real en el mismo punto, que corresponde con el punto en el espacio en que se cruzan los ejes visuales. En la imagen se muestra como cada pareja de puntos, A1 y A2, B1 y B2 y C1 y C2, tienen la misma dirección visual para ambos ojos. (Para ello, su posición respecto de la fóvea es la misma distancia para ambos ojos y en la misma dirección). Lo mismo que ocurre con estos 4 puntos que se muestran en la imagen, ocurre para todos los demás puntos de la retina. Es decir, cada punto de la retina de un ojo tiene en el ojo contrario un punto con la misma dirección visual. A los puntos retinianos, uno de cada ojo, que tienen la misma dirección visual se los denomina puntos retinianos correspondientes.

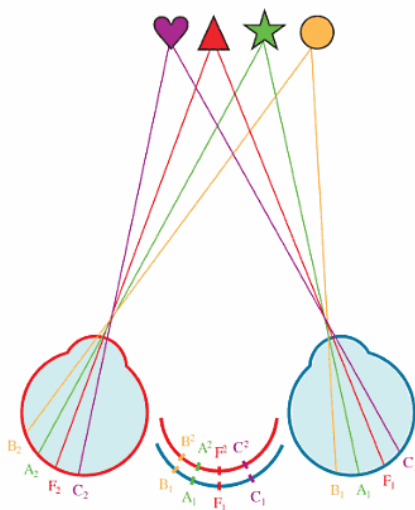


Figura 2. Puntos retinianos correspondientes. La retina nasal del ojo derecho se corresponde con la retina temporal del ojo izquierdo y viceversa.

Se entiende entonces, que las fóveas son puntos correspondientes, y la retina nasal de un ojo es correspondiente con la retina temporal del otro, ya que reciben la información de los mismos puntos del espacio.

Existen algunos factores que pueden comprometer la binocularidad. Las anisometropías son uno de ellos. Una anisometropía es la situación que se da cuando hay una diferencia en el estado refractivo de los dos ojos. Por norma general, lo que se espera en un sistema visual corriente es que el estado refractivo de ambos ojos sea similar, dentro de los márgenes de tolerancia próximos a media dioptría, aunque en el caso del astigmatismo, los ejes cilíndricos no suelen

coincidir, sino que suelen ser simétricos. Se considera que existe relevancia clínica cuando la diferencia del estado refractivo entre un ojo y el otro es de 1D entre los meridianos principales. [7]

Como consecuencia de la diferencia del estado refractivo, se genera una imagen retiniana de distinto tamaño para cada uno de los ojos y esto hace que puedan existir problemas de fusión que impidan la correcta visión binocular. Como norma, cada 0'25D de diferencia entre la refracción de los dos ojos origina un 0'5% de diferencia entre los tamaños de imágenes retinianas. Por otra parte el estímulo de acomodación es diferente para cada ojo, y como la acomodación actúa en ambos ojos por igual, la imagen de uno de los ojos siempre es borrosa. El resultado es que el observador ha de intentar fusionar dos imágenes, una de ellas borrosa y de diferente tamaño respecto a la otra. En los grados altos del defecto la fusión es imposible y genera visión alternante o monocular. [8]

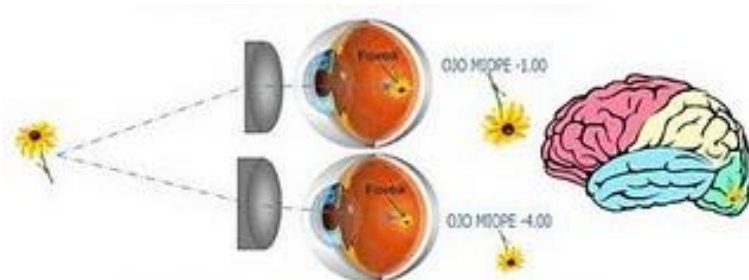


Figura 3. Percepción de imágenes retinianas de distinto tamaño como consecuencia de una diferencia del estado refractivo entre los ojos.

1.2 ESTEREOPSIS

Es el grado máximo de visión simultánea. Además de visión binocular (fijación binocular y fusión) hay percepción en relieve.

Es cierto que, sin el correcto funcionamiento binocular, existen determinadas pistas que pueden generar un nivel de percepción de la profundidad, y es por ello que algunas personas son capaces de interpretar relieves o profundidades a pesar de que funcionen monocularmente o no tengan una visión binocular bien establecida. Pero para alcanzar el grado máximo de estereopsis es imprescindible que haya una buena visión binocular establecida. Estas pistas monoculares, son conocidas también como factores empíricos monoculares y oculomotores.

1.2.1. FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: LUCES Y SOMBRAS

En nuestro entorno habitual, la luz siempre procede de la parte superior de la escena, porque proviene del sol, o de focos situados en el techo y es por ello que nuestro cerebro interpreta las escenas como si la luz proviniese de la parte superior. Además, los objetos más claros tienden a percibirse como más cercanos, mientras que los objetos oscuros se perciben más distantes.

1.1.2. FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: TAMAÑO APARENTE

Los objetos, a medida que se alejan del observador, subtienden un ángulo menor. Esto produce el efecto de que las imágenes de los objetos lejanos son más pequeñas. Sin embargo, cuando el objeto es familiar, el observador tiende a evaluar el tamaño como constante. Cuando un objeto familiar se percibe en un tamaño distinto al esperado, se interpreta que lo que ha variado es la posición del estímulo (más lejos si es más pequeño o más cerca si es más grande) y no su tamaño. Es decir, existe una sensación de constancia del tamaño. Entonces, cuando observamos objetos que nos son conocidos, por el tamaño que presentan, ya podemos hacer una estimación de a qué distancia se encuentran de nosotros.

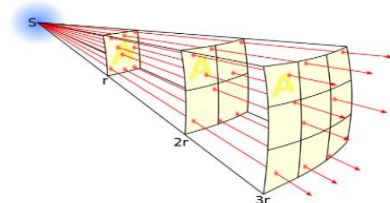


Figura 4. Cuanto más alejado del observador, los puntos subtienden a un menor ángulo.

1.2.3. FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: PERSPECTIVA AÉREA



Esta pista está relacionada con el hecho de que los objetos más lejanos se perciben con menor nitidez que los cercanos. La causa principal de este fenómeno es la dispersión de la luz al atravesar una gran masa de aire en la que hay gran cantidad de partículas (polvo, vapor de agua, etc). Cuanto más lejos se encuentra el objeto, más se dispersa la luz hasta llegar al observador, y como consecuencia se ve menos nítido y de colores menos saturados.

Figura 5. Cuanto más alejado del observador menos nitidez y menor saturación se percibe.

1.2.4. FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: PERSPECTIVA GEOMÉTRICA

Esta pista está relacionada con que, cuando observamos una escena, todas las líneas paralelas van a confluir hacia un mismo punto, llamado punto de fuga. En este apartado, también se introduce el efecto de que, ante una textura que se repite en el espacio, los elementos más cercanos parecen más espaciados que los que se encuentra en el fondo de la escena, que se perciben más densos. Otro punto analizado es la altura relativa. Cuando observamos una escena determinada, la línea del horizonte se utiliza como referencia de lejanía. Eso quiere decir que los objetos que estén más próximos a esta línea (por encima o por debajo de ella) se perciben como más alejados que los objetos que estén más distantes de este horizonte (tanto si están por encima como por debajo).

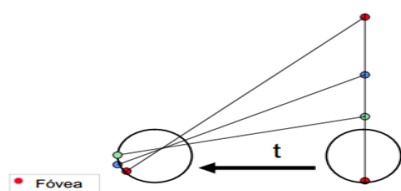


Figuras 6 y 7. Los elementos más cercanos parecen de mayor tamaño que los lejanos.

1.2.5. FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: INTERPOSICIÓN

En este caso, la pista proviene de la información que nos dan objetos solapados. Generalmente, cuando observamos un objeto situado a una cierta distancia de otro se perciben en el mismo plano. Esta sensación cambia en el momento en que los objetos se solapan. Tendemos a percibir más cercano aquel objeto del que somos capaces de ver la silueta completa, mientras que el objeto que aparece tapado parcialmente se interpreta como si estuviera colocado en un plano más lejano.

1.2.6. FACTORES EMPÍRICOS MONOCULARES: PARALAJE DE MOVIMIENTO



Cuando nos desplazamos a una velocidad constante y mantenemos la fijación en un punto, los objetos próximos al de fijación tendrán un movimiento relativo lento, mientras que los objetos lejanos se desplazan más rápido.

Figura 8. Percepción del desplazamiento de los objetos cuando se mantiene la fijación en un punto durante una situación de movimiento.

1.2.7. FACTORES EMPÍRICOS OCULOMOTORES: CONVERGENCIA

Existe una muy buena correlación entre la distancia a la que se encuentra el objeto y la vergencia requerida para fijarlo. Los cambios de fijación de un punto a otro implican cambios en el ángulo de convergencia y por lo tanto, cambios en el estado de contracción de los músculos extrínsecos, que son interpretados por el sistema de propiocepción de nuestro cuerpo y hacen una estimación de la distancia real del objeto.

1.2.8. FACTORES EMPÍRICOS OCULOMOTORES: ACOMODACIÓN

Cuando el sistema visual activa la acomodación asocia que está observando un objeto cercano. Aun así, este no es un sistema muy preciso debido a la profundidad de campo del sistema acomodativo, al retardo acomodativo existente, que permite enfocar objetos con una respuesta acomodativa inferior a la que requiere realmente la distancia a la que se encuentra el estímulo y, por último, debido a las oscilaciones de la acomodación.

Todos estos factores empíricos no actúan individualmente sino que se produce entre ellos una sinergia para obtener el máximo de información y lo más fiable posible. Gracias a todas estas pistas es posible estimar distancias e interpretar volúmenes sin necesidad de tener estereopsis.

La estereopsis propiamente dicha se genera a partir de lo que llamamos disparidad visual. La disparidad visual es la separación que hay entre las imágenes que perciben los ojos, cuando ambos están observando un mismo objeto. Se genera porque los ojos están situados de media a una distancia de 60mm entre ellos, de manera que, a pesar de que los ejes visuales se dirijan al mismo objeto, las imágenes percibidas son ligeramente diferentes. Digamos, que se percibe el mismo objeto desde perspectivas ligeramente diferentes. Siempre que estas imágenes sean lo suficientemente parecidas, el cerebro consigue fusionarlas, y se perciben como objetos tridimensionales, situados centrados respecto ambos ojos, como si se tratara de una imagen vista por un único ojo situado entre medio de los dos (visión ciclópea). Es decir, a partir de la percepción de 2 imágenes bidimensionales, el cerebro las interpreta y las fusiona en una única imagen en tres dimensiones.

Cuanto más alejado se encuentra el objeto respecto del sistema visual, la sensación de estereopsis disminuye. Tanto es así que a unos 600m somos incapaces de ver objetos en tres dimensiones. Por el contrario, cuanto más cerca está el objeto de los ojos, mayor es la disparidad binocular, y por tanto, mayor es la sensación de estereopsis.

Entorno a la visión estereoscópica se define un nuevo término, el horóptero. Para un punto de fijación binocular dado, el horóptero es el lugar geométrico de puntos del espacio que estimulan elementos retinianos correspondientes y que, por lo tanto, presentan un valor de disparidad binocular nulo en ambas direcciones vertical y horizontal, no siento necesarios movimientos de fusión binocular.

A partir de las leyes de dirección visual es posible dar una definición alternativa y equivalente del horóptero: es el lugar geométrico de los puntos del espacio que dan lugar a la percepción de una misma

dirección visual para ambos ojos (punto a punto), sin la necesidad de que se produzcan movimientos oculares de tipo fusional.

El horóptero nos ayuda a diferenciar dos tipos de disparidad retiniana:

- La disparidad retiniana no-cruzada, que tiene lugar cuando percibimos un objeto más lejano que el punto en que fijamos la mirada o, en general, del horóptero.
- La disparidad retiniana cruzada, que tiene lugar cuando percibimos un objeto más cercano que el punto de fijación de la mirada.

Por consiguiente, la existencia de disparidad retiniana no-cruzada indica lejanía del objeto respecto al observador y la disparidad retiniana cruzada indica cercanía, proximidad al observador.

1.3 DIPLOPIA

Según el grado de disparidad binocular producido (magnitud de la diferencia entre puntos no correspondientes), pueden presentarse dos situaciones:

La primera, que el grado de disparidad binocular sea lo suficientemente pequeño como para que se produzca la fusión estereoscópica, y la imagen se percibe en relieve.

Y la segunda, y que nos ocupa en este apartado, que la disparidad binocular sea lo suficientemente grande como para que no se produzca fusión, y dé lugar a diplopía, o lo que es lo mismo, visión doble. Se define entonces el Área de Panum, que es el área en la retina de un ojo, cuyos puntos, al ser estimulados simultáneamente con un único punto de la retina del otro ojo, dan lugar a una percepción fusionada.

Por lo tanto, cada punto de la retina de un ojo, tiene su área de Panum asociada en el otro ojo. Esto permite un rango de disparidades binoculares a lo largo de la que la imagen es percibida como simple y proporcionan a la correspondencia retiniana una cierta flexibilidad para la percepción fusionada de objetos no ubicados sobre el horóptero y de esta forma no se requiere una correspondencia retiniana tan precisa o estricta para la percepción de la haplopi. Se entiende por haplopi la percepción de un objeto en una única dirección visual, experimentando visión simple y fusionada.

La diplopía, entonces, aparece cuando las imágenes de un objeto que se forman en cada ojo no caen en puntos retinianos correspondientes, ni tampoco en su área de Panum, es decir, no tienen la misma dirección visual, por lo que cada ojo localiza el objeto en una dirección diferente del espacio.

Existen dos tipos de diplopía, la llamada fisiológica, que se da en condiciones habituales, y la diplopía patológica, que se produce en situaciones anómalas de descoordinación de la posición y del movimiento entre los ojos.

Dentro de la visión doble, podemos distinguir diferentes tipos de diplopía según la sensación que se experimenta.

- La diplopia heterotrópica, que consiste en la percepción de dos direcciones visuales diferentes.
- La diplopia homotópica (o confusión) que es la percepción de dos objetos distintos en una misma dirección.
- La anteriormente citada, diplopía fisiológica, que hace referencia a una situación normal. Por estímulos de objetos fuera del espacio de Panum (proyección del área de Panum en el espacio objeto).
- La diplopía homónima. Se produce cuando los objetos se sitúan más lejos que el objeto de fijación, y fuera del espacio de Panum.
- Y la diplopía heterónima. Se produce cuando los objetos están situados entre el observador y el límite más cercano del espacio de Panum.



Figura 9. Percepción de diplopía.

1.4 FUSIÓN MOTORA Y SENSORIAL

La fusión se define como proceso visual consistente en la superposición y combinación de contornos similares en las imágenes oculares, que da lugar a una percepción binocular única. Dentro de la fusión, podemos definir dos vertientes diferentes.

- Fusión motora. Dentro de este proceso está la tarea de alinear los ejes visuales correctamente de manera que la imagen del objeto que se está fijando caiga sobre puntos correspondientes de la retina o, en cualquier caso, en los límites del área de Panum. La responsabilidad de este tipo de fusión recae principalmente sobre la retina periférica.

- Fusión sensorial: proceso neurofisiológico y psicológico mediante el cual el córtex visual combina los estímulos visuales obtenidos de forma independiente por los dos ojos, en una única percepción del espacio visual. La responsable principal de este tipo de fusión es la retina central.

Hay ciertas características en las imágenes percibidas por cada ojo que pueden facilitar, o dificultar el proceso de fusión. Cuanto más parecidas sean las imágenes en cuanto a tamaño, color, forma y brillo, más fácil resultará el proceso de fusión.

2. CONVERGENCIA

La convergencia es el movimiento horizontal de los dos ojos de forma conjugada, para fijar con las foveas de ambos ojos un objeto, para poderlo ver simple. Es posible cuantificar este movimiento mediante dioptrías prismáticas, y varía en función de la distancia interpupilar del usuario y la distancia que hay hasta el objeto. Cuanto más cerca se sitúa, mayor es el requerimiento prismático.

2.1 HETEROFORIAS

Se considera ortoforia cuando, en situación de visión disociada las líneas visuales principales intersecan en el punto de fijación binocular.

La heteroforia se puede definir como una desviación latente en los ejes visuales en ausencia del reflejo de fusión y que se puede compensar mediante la convergencia fusional. Esta desviación puede apreciarse en condiciones de visión pasiva, utilizando tests disociativos y están asumidas por ambos ojos. La desviación no es visible en condiciones normales.

Las heteroforias son muy comunes en la población y generalmente no desencadenan sintomatología y no es necesario tratarlas, pero hay excepciones, en las que se precisa de algún tratamiento de entrenamiento visual para eliminar la sintomatología que producen.

2.1.1 HETEROFÓRIAS HORIZONTALES

- **EXOFORIA:** hablamos de exoforia cuando, en situación de visión disociada, los ejes visuales se cruzan en un punto más alejado del punto de fijación binocular.
- **ENDOFORIA:** hablamos de endoforia cuando, en situación de visión disociada, los ejes visuales se cruzan en un punto más cercano del punto de fijación binocular.

2.1.2 HETEROFORIAS VERTICALES Y CICLOFORIAS

Las heteroforias verticales ocurren cuando los ejes visuales de los dos ojos no interseccionan en el mismo plano. Es decir, uno de los ejes visuales está por encima del otro. Generalmente esta situación se da en pacientes que tienen un ojo más elevado o deprimido que el otro. Se clasifican teniendo en cuenta cuál de los dos ojos ocupa la posición superior respecto al otro. Es decir, una hiperforia derecha, sería el caso en que el eje visual del ojo derecho está por encima del eje visual del ojo izquierdo cuando no hay estímulo de fusión.

Las cicloforias se dan cuando los meridianos corneales superiores no son paralelos entre sí o, lo que es lo mismo, existe una rotación nasal o temporal del ojo. Se distinguen dos tipos distintos:

- **INCICLOFORIA:** también llamada cicloforia negativa, las prolongaciones de los meridianos corneales, en situación de visión disociada, intersecan por encima de los globos oculares.
- **EXCICLOFORIA:** también llamada cicloforia positiva, las prolongaciones de los meridianos corneales, en situación de visión disociada, intersecan por debajo de los globos oculares.

3. RELACIÓN CONVERGENCIA-ACOMODACIÓN

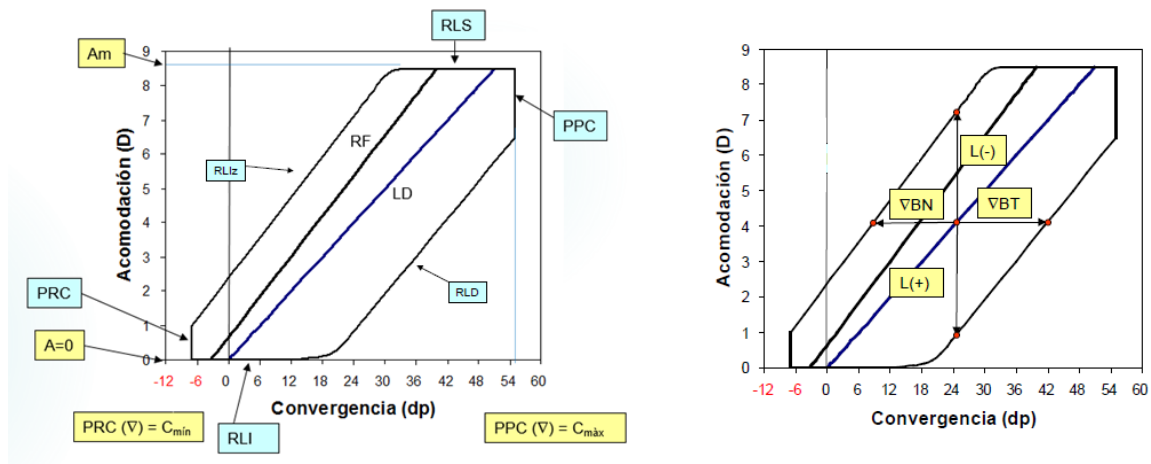
Entendemos por convergencia la alineación de los ojos para formar imágenes del objeto de interés sobre la fóvea. Por acomodación, la modificación de la lente del cristalino para enfocar y conseguir una imagen nítida sobre la retina. Entonces, para objetos suficientemente cercanos, es necesario un proceso de aumento de la acomodación y de la convergencia que se produce de forma simultánea y coordinada. La relación que hay entre la convergencia y la acomodación está descrita y es conocida como relación AC/A.

3.1 ZONA DE VISIÓN BINOCULAR SIMPLE Y NÍTIDA (ZVBSN)

La zona de visión binocular simple y nítida es aquella que se ve simultáneamente con ambos ojos, que requiere un estímulo determinado de convergencia y acomodación en la que los objetos pueden verse de manera simple y nítida. Esta zona está ligada a la capacidad acomodativa y de vergencias del usuario, con lo cual, la función que describe la relación AC/A es propia de cada individuo.

Esta zona está delimitada por 6 líneas que consideramos rectas:

- **RLS:** la recta limitante superior, que está delimitada por la acomodación. Es una recta horizontal que se sitúa aproximadamente entre las 8-9D acomodativas en personas jóvenes, en la parte superior de la gráfica y que se corresponde con el máximo poder acomodativo del usuario.
- **RLI:** recta limitante inferior, es también una línea horizontal que se sitúa en el margen inferior de la gráfica y se corresponde con la situación de acomodación cero, con lo que no hay requerimiento de acomodación.
- **RLD:** recta limitante derecha. Se encuentra experimentalmente, a través de la medida de prismas de base temporal (que estimulan la convergencia) y lentes positivas (que relajan la acomodación) que el usuario es capaz de soportar para una determinada posición del objeto.
- **RLIz:** recta limitante izquierda. Se encuentra experimentalmente, a través de la medida de prismas de base nasal (que relajan la convergencia) y lentes negativas (que estimulan la acomodación) que el usuario es capaz de soportar para una determinada posición del objeto.
- **PPC:** punto próximo de convergencia. Es la máxima convergencia que el usuario puede realizar.
- **PRC:** punto remoto de convergencia. Es la divergencia máxima que el usuario es capaz de realizar.



Figuras 10 y 11. Gráficas representativas de ZVBSN.

En estas gráficas se determina toda el área de visión binocular simple y nítida, pero es obvio, que los puntos más extremos de la gráfica, sobre todo en los cercanos a las rectas limitantes derecha e izquierda, son puntos que no son cómodos para el usuario. Por ello existen dos criterios que establecen cuales serían, de forma más o menos empírica los límites para los que esta zona de visión binocular nítida y simple es cómoda.

3.1.1 CRITERIO DE CONFORT DE PÉRCIVAL

Considera que la zona de ZVBSN está constituida por la extensión entre la convergencia relativa negativa y la convergencia relativa positiva. Divide esta zona en tres partes iguales y la porción intermedia constituye la zona de confort, dentro de la cual debe quedar comprendida la línea de demanda, para que exista un equilibrio adecuado. Por tanto, el área de visión cómoda ocupa el tercio central de toda la ZVBSN [9]

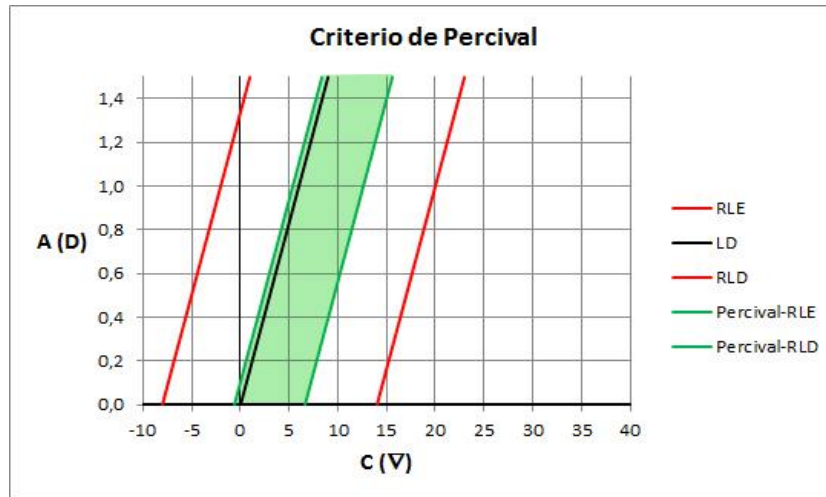


Figura 12. Gráfica representativa del criterio de Percival.

3.1.2 CRITERIO DE CONFORT DE SHEARD

Sheard contempla la existencia de otra línea, la de las forias. Ésta se obtiene midiendo la foria del paciente para diferentes posiciones del objeto, y también es propia de cada individuo.

Este criterio busca obtener un equilibrio entre la reserva y la demanda de convergencia. Establece que para estar en situación cómoda es necesario que la reserva igual a 2 veces la demanda; donde la demanda equivale a la foria lateral y la reserva al margen de convergencia que queda después de compensar la demanda. La reserva entonces, está determinada por la convergencia relativa positiva o negativa, según sea el tipo de foria.

De forma simple, podemos decir que este criterio divide la zona que hay desde la recta de las forias y el límite derecho de la ZVBSN en tres partes iguales, así como para el límite izquierdo. Se generan 2 áreas con 3 tercios cada una, de los cuales, considera el tercio más cercano a la recta de las fórias de cada área cómo la zona de visión cómoda. [9]

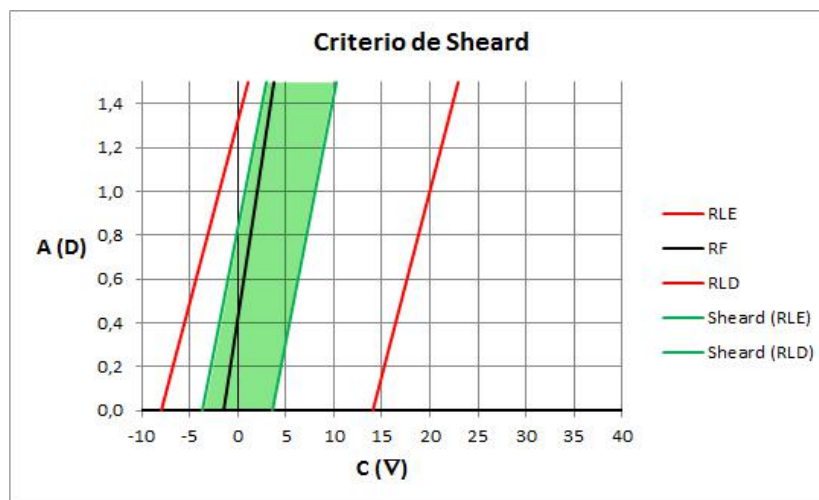


Figura 13. Gráfica representativa del criterio de Sheard.

3.2 RELACIÓN CONVERGENCIA-ACOMODACIÓN.

La relación de convergencia acomodación puede variar dependiendo de la situación. Para situaciones en 2D, la distancia de acomodación (enfoque para ver nítido) y la distancia de convergencia (punto en el que se cruzan los ejes visuales) son idénticas, como en la vida real.

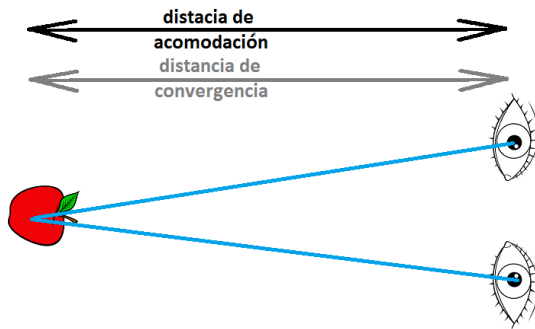
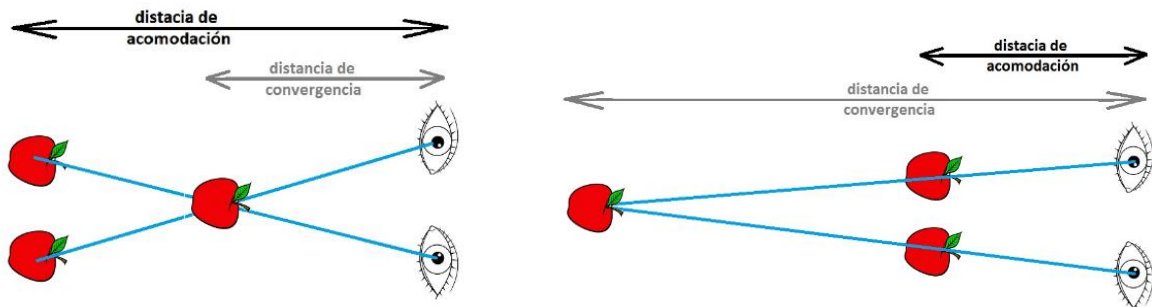


Figura 14. Esquema de las distancias de acomodación y convergencia para un determinado punto de fijación.

Pero, sin embargo, en situaciones de estímulos individualizados para cada ojo con la finalidad de obtener una percepción tridimensional (sistemas estereoscópicos) el estímulo de acomodación se mantiene, pero la convergencia necesaria varía. Es decir, para las situaciones en que hay estímulos 3D generados a partir de dos imágenes planas, se rompe la relación AC/A. Se pueden definir dos situaciones diferentes en el caso de la percepción de una escena 3D. Una, en que las imágenes se perciben de manera cruzada (el ojo derecho ve la imagen que está a la izquierda y el ojo izquierdo ve la imagen que está a la derecha), para la que se exige una convergencia mayor, y otra en que las imágenes se perciben de forma paralela, que exige menor convergencia (donde el ojo derecho ve la imagen que está a la derecha y el ojo izquierdo ve la imagen que está a la izquierda).



Figuras 15 y 16. Esquema de las distancias de acomodación y convergencia para situaciones de visión 3D

En el caso de las proyecciones en 3D, se utilizan más frecuentemente los estímulos de visión cruzada, porque de esta manera se consigue la sensación que los objetos salen de la pantalla en dirección al observador. Que los estímulos sean de visión cruzada implica que hay un esfuerzo de convergencia importante, superior al requerimiento de acomodación.

Si este tipo de situaciones, en que se altera la relación natural del AC/A, son mantenidas durante un largo periodo de tiempo, causan fatiga visual. Esta es la razón por la que, para que el observador pueda mantener la sensación estereoscópica durante todo el tiempo que dura la película sin fatigarse, la mayor parte de los estímulos deben estar dentro de la zona de confort que marca la ZVBSN. En ocasiones puntuales, si pueden hacerse efectos más sorprendentes, donde el estímulo se salga de la zona de confort, pero un exceso de estímulos de este tipo terminaría por fatigar al usuario o incluso podría causar el cese la percepción 3D.

4. TÉCNICAS DE ESTEREOGRAFIA

Como hemos comentado anteriormente, para conseguir un efecto estereoscópico se precisan dos imágenes que difieran ligeramente en perspectiva.

Desde el punto de vista de la visión, esta diferencia se genera de forma natural, por el hecho de existir una distancia interpupilar, que hace que la escena captada por cada ojo, sea vista desde un emplazamiento distinto y, por tanto, la escena percibida por cada ojo, es ligeramente distinta en cuanto a la perspectiva.

Desde el punto de vista artificial, hay diferentes métodos para conseguir este efecto.

- Utilizar dos o más cámaras alineadas y separadas entre ellas una cierta distancia muy concreta.
- Utilizar una única cámara móvil, que se desplaza una distancia concreta en línea recta y capta las instantáneas durante el movimiento.

4.1 ESTEREOGRAFIA SIMULTÁNEA

La estereografía simultánea hace referencia al primero de los casos, donde existen dos o más cámaras fijas, a una determinada distancia entre ellas que toman instantáneas de la misma escena desde diferentes perspectivas.

En este caso, como hay dos cámaras tomando la misma escena de manera simultánea en el tiempo no es preciso que la escena sea estática, y pueden haber objetos en movimiento. En el campo de la industria cinematográfica, este es indudablemente el método más empleado.



Figura 17. Cámara de estereografía simultánea.

4.2 ESTEREOGRAFIA SECUENCIAL

Este método hace referencia al segundo punto explicado al inicio. Se trata de una única cámara móvil. El sistema de estereografía secuencial más conocido es el propuesto por Moravec (1997), donde un robot móvil porta una cámara y que, cada vez que se quiera captar una escena el robot se detiene de forma que la cámara se desplaza de izquierda a derecha tomando nueve imágenes. Cabe especificar que este desplazamiento se realiza sobre distancias prefijadas y en el sentido del eje horizontal del sistema óptico.

En este caso, es imprescindible que los objetos sean completamente estáticos, para poder captar la misma escena, desde diferentes perspectivas en diferentes momentos del tiempo.

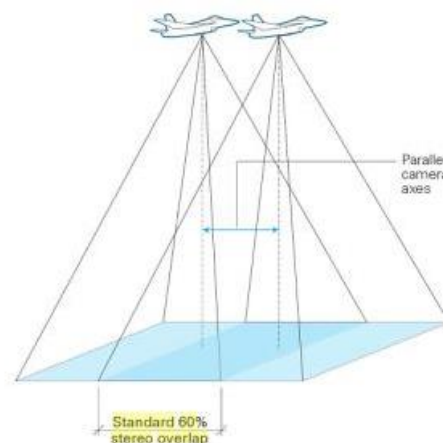


Figura 18. Estereografía aérea, un ejemplo de estereografía secuencial.

4.3 EJES ÓPTICOS

Otro aspecto inherente a los sistemas de visión estereoscópica es su geometría. Dependiendo del tipo de escena que se esté tratando de captar puede variar la posición de los ejes ópticos de las cámaras. En el caso de la visión, este efecto es casi siempre convergente, dado que los ojos dirigen sus ejes visuales hacia algún objeto de interés, que se sitúa relativamente cercano. Pero, también es cierto que, si el objeto se sitúa en la lejanía, se puede considerar que los ejes visuales se sitúan de manera aproximadamente paralela.

En el caso de los sistemas de estereoscopia artificial, lo más común es utilizar los ejes de las cámaras de manera que resulten paralelos entre ellos, pero hay excepciones. Para escenas claramente próximas es mejor dirigir los ejes de las cámaras hacia un mismo punto de referencia, que generalmente es el propio objeto de interés.

Las líneas que unen los mismos puntos de la imagen “derecha” con la “izquierda” se denominan líneas epipolares. Es imprescindible que haya una correspondencia entre los puntos de las dos imágenes tomadas, y por tanto una correspondencia entre las líneas epipolares de la imagen derecha e izquierda, para que la experiencia estereoscopia sea exitosa. Estas líneas deben ser coincidentes en las direcciones vertical y horizontal. **[17]**

En los sistemas de dos cámaras con ejes paralelos, se define lo que llamamos la línea base, siendo esta la que define la distancia entre los ejes ópticos de ambas. De manera que, la línea base y los ejes ópticos quedan orientados de manera perpendicular entre ellos. Para objetos próximos, en los que los ejes de las cámaras deben ser convergentes, se recomienda que la línea base sea aproximadamente la distancia entre la cámara y el objeto dividido entre 30.

Cabe decir que, cuanto mayor es la línea base, mayor es el efecto estereoscópico que se consigue y por tanto, la experiencia 3D es más espectacular. Existe un límite para la distancia de la línea base, que se establece en cuanto la disparidad binocular de las imágenes que se generan a partir de una distancia de línea base dada es tan grande que dificulta o imposibilita la fusión, haciendo que las imágenes se perciban como dobles, y no con profundidad.

5. CARACTERÍSTICAS DE LA IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS

Para conseguir ver una imagen estereoscópica es fundamental poder fusionar las imágenes que están percibiendo ambos ojos de forma simultánea (y que, recordamos una vez más, son ligeramente diferentes). El proceso de fusión es complejo, y exige algunas premisas que deben cumplirse. Las imágenes deben ser suficientemente parecidas como para poderse interpretar como una única imagen en 3D. Una gran diferencia entre las imágenes que llegan a uno y otro ojo podría provocar dificultades en la fusión y comportaría visión doble.

5.1 DIMENSION VERTICAL

A la hora de fusionar, el sistema visual no tolera diferencias en la altura de las imágenes. Una diferencia en altura implicaría la necesidad de forzar unas vergencias verticales, que son críticas para el sistema visual humano.

Por otra parte, las dimensiones en vertical de la imagen no son críticas para la fusión, es decir, no hay un límite en el tamaño vertical de la imagen para el cual se limite la visión estereoscópica.

5.2 DIMENSION HORIZONTAL

En condiciones normales, el sistema visual se encuentra con sus ejes visuales en posición paralela o convergente. Es por este motivo que se aconseja que la separación entre las imágenes que se quiere fusionar no debe ser superior a la distancia interpupilar del usuario, porque esto implicaría un acto de divergencia en el sistema visual, que complica el proceso de fusión.

5.3 ROTACIONES

El sistema visual binocular no tolera diferencias en la rotación de las imágenes que se tienen que fusionar, porque esto implicaría que para que ambos ojos perciban el mismo estímulo, uno de ellos debería rotar en un sentido y el otro en el sentido contrario (ciclovergencias), y esto complica el proceso de fusión.

5.4 TAMAÑO

Las imágenes deben tener tamaños similares para que se puedan fusionar. En alguna ocasión, es posible que, en personas con graduaciones muy diferentes entre ambos ojos la imagen que forma un ojo y otro, sean muy distintas en cuanto a tamaño, a esta circunstancia en la vida corriente se le denomina aniseiconía. Una de las alternativas que se plantean para el problema de aniseiconía, es el uso de lentes de contacto, que como minimizan la distancia de vértice, también minimizan el aumento angular.

5.5 SIMILITUD (NITIDEZ Y CLARIDAD)

Es importante que el color de las imágenes de cada uno de los ojos sea similar. Este punto es especialmente crítico cuando el sistema de estereoscopia que se está utilizando es el anáglifo, que depende más directamente del color de las imágenes que el sistema polarizado, por ejemplo. Otro punto crítico es la nitidez de la imagen. Es necesario que el nivel de nitidez sea parecido en ambos ojos. Es posible fusionar una imagen borrosa con otra borrosa, y una imagen nítida con otra nítida, pero cuando se trata de fusionar una imagen nítida con una borrosa, el proceso se complica, porque la imagen nítida tiene más peso que la borrosa, y esta última puede llegar a ser ignorada por el cerebro.

6. TIPOS DE PROYECCIÓN 3D

6.1 ANAGLIFO:

Es el método más clásico, y el que menos especialización técnica precisa. Este método se basa en los colores complementarios. Consiste en la proyección de dos imágenes descompuestas en los tres colores básicos (rojo, azul y verde). Estas imágenes son vistas a través de unas gafas que incorporan unos filtros: generalmente, en el ojo derecho llevan un filtro rojo, que ocluye la información del canal rojo de la imagen, y en el ojo izquierdo llevan un filtro cian (que englobaría azul + verde) y que ocluye los canales azul y verde. De manera que cada ojo recibe la información del color opuesto al color del filtro que lleva delante.

De esta manera, se consigue generar una diferencia (disparidad binocular) que el cerebro interpreta como una única imagen con profundidad.

Anteriormente, también hubo otras combinaciones de colores, como rojo y verde, verde y magenta (rojo + azul) o azul y amarillo (rojo + verde), pero finalmente se instauró el rojo y cian, como la combinación más eficiente.

En las gráficas que se muestran a continuación se puede observar la gráfica de transmitancia de los filtros.

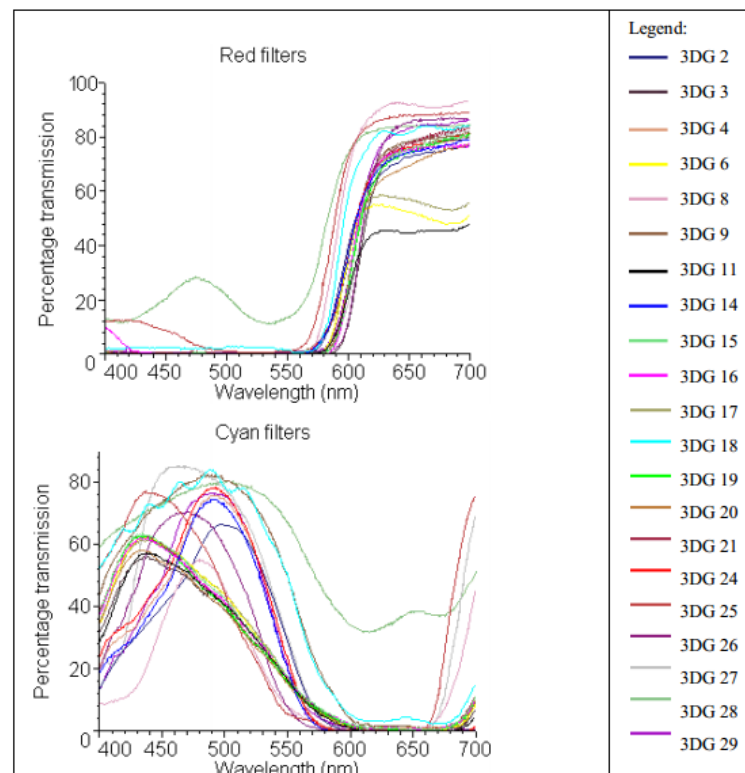


Figura 19. Transmitancia del filtro rojo arriba, y del cian abajo, de las gafas anaglíficas. [16]

En la imagen superior, se ha analizado la transmitancia para los filtros rojos de 19 gafas diferentes. Vemos que hay mucha variación entre los diferentes filtros pero, en general, la transmisión es baja en el tramo hasta los 550nm aproximadamente, donde se hallan los colores azul y verde (cian) y se dispara para el tramo de longitud de onda superior a 550nm, que corresponde a los rojos.

En la gráfica de abajo, se ha hecho el estudio de la transmitancia de los filtros cyan para cada una de las gafas, y los resultados obtenidos son aún menos homogéneos que para el filtro rojo. En general, todos cumplen una alta-media transmitancia en el tramo de hasta 550nm, que se corresponde con el tramo de los azules y verdes, y la transmitancia disminuye haciéndose casi 0 (exceptuando algún caso particular) para el tramo de longitudes de onda superiores a los 500nm, que es el tramo de los rojos.

Lo que es evidente, es que el corte, a los 550nm, no es preciso para ninguno de los dos filtros, sino que hay un cambio de transmitancia progresivo que se desarrolla con un margen de unos 100nm arriba-abajo, de manera que, en todos los casos, hay una pequeña parte del espectro que debería bloquear el filtro y, sin embargo, está dejando pasar. Por otra parte, lo ideal sería que el filtro permitiese una transmitancia del 100% en el espectro que interesa y un 0% en el tramo del espectro que se pretende bloquear pero esto no es así en ninguno de los casos. Durante todo el espectro hay una pequeña transmitancia en la parte del espectro que se pretende bloquear y, de la misma manera, la parte del espectro que se pretende que atraviese el filtro no llega a tener una transmitancia del 100%.

Estas pequeñas “superposiciones” de tramo del espectro visible, hacen que haya longitudes de onda, de alrededor de los 550nm que puedan ser vistos con ambos ojos, porque los filtros de ambos ojos permiten transmitancia en este tramo. Este hecho es el responsable del conocido efecto ghosting, en que se percibe un desdoblamiento de las imágenes.

Independientemente de este efecto, hay otro fenómeno importante que interfiere en la visión a través de estos filtros. En las gráficas, también puede verse que para el filtro rojo, el porcentaje de transmitancia es siempre más alto, alrededor del 90% que para el filtro cyan, que tiene un porcentaje de transmitancia de alrededor del 70%. Esto tiene una explicación y es que, el filtro cyan es siempre más oscuro que el rojo. Sucede que el filtro cyan filtra aproximadamente 1/3 del espectro visible, y deja pasar 2/3. Para el filtro rojo, esto sucede a la inversa, bloquea 2/3 del espectro y deja pasar tan sólo 1/3. Por lo tanto, si los filtros fuesen igual de opacos, la imagen que recibe el ojo al que se le antepone el filtro rojo, será menos luminosa que la que percibe el ojo al que se le antepone el filtro cyan, tan sólo por el hecho de que está pasando una menor cantidad de luz. Esto podría comprometer la visión binocular y llegar a romper el efecto estereoscópico, puesto que uno de los requisitos imprescindibles para obtener una buena estereopsis es que el brillo y la luminosidad de las imágenes sea similar para ambos ojos. Para tratar de compensar este efecto, se crea una diferencia de opacidad en los filtros, haciendo el filtro rojo ligeramente más claro que el cyan para que la transmitancia del cyan disminuya por igual en todo el espectro. El efecto es similar a la anteposición de un filtro gris delante del filtro cyan, que afecta de la misma manera a lo largo de todo el espectro.

VENTAJAS

- No hace falta adecuar el soporte (Puede verse sobre papel, monitores, televisión, pantallas de móvil o cine...)
- La producción de las gafas anaglíficas es económica.

INCONVENIENTES

- Tiene asociada la aparición de imágenes fantasma (Ghosting). Consiste en la percepción de una doble imagen, debido a que una pequeña parte del espectro que el filtro debería bloquear, consigue pasar el filtro.
- La calidad de color de la imagen que se percibe es muy pobre, sobre todo en el espectro de los rojos.
- Para un óptimo resultado, es necesario una calibración perfecta. Sin embargo, es difícil que la calibración coincida con el patrón del usuario (en lo que corresponde al contraste, intensidad, temperatura del color...). Además las características de colorimetría de las diferentes pantallas de visualización (CRT, Plasma, LCD...) deben coincidir con las de los filtros de las gafas.

6.2 SISTEMAS DE POLARIZACIÓN

Es el sistema más comúnmente utilizado en la actualidad.

Si el método anteriormente explicado estaba basado en el fenómeno de colores complementarios, éste se basa en el fenómeno de luz polarizada complementaria. Este método consiste en superponer dos imágenes polarizadas, generalmente en planos perpendiculares entre ellas. El usuario lleva puestas unas gafas, también con filtros polarizados, uno perpendicular respecto el otro, de manera que cada ojo percibe solamente la imagen que se emite con la luz polarizada en la misma dirección que el filtro que se le antepone. Cada ojo, percibe una única imagen, con distinta perspectiva. El cerebro interpreta esta información y se percibe como una única imagen, tridimensional.

Existen dos tipos diferentes de sistemas de polarización; los circulares y los lineales, según sea el método que se utilice para filtrar las imágenes. Las explicamos detalladamente a continuación.

6.2.1 POLARIZACIÓN LINEAL

En este caso, generalmente, existen dos proyectores perfectamente sincronizados entre sí, y se colocan filtros frente a las lentes de proyección de cada uno de ellos, que emiten de acuerdo con cada uno de los filtros que se anteponen en las gafas.

Para las gafas se utilizan filtros ortogonales, que están orientados de manera perpendicular entre ellos, y coincidiendo con la dirección de cada uno de los proyectores, de manera que, sólo una de las dos imágenes que se proyectan de manera simultánea en la pantalla atraviesa cada filtro, produciéndose así la separación de imágenes.

Generalmente, el eje de polarización del filtro de las gafas es de 45° para un ojo y de 135° para el otro.

La desventaja de este sistema es que el espectador tiene que mantener la cabeza estática y no debe inclinarla, ya que se perdería el efecto de visión 3D.

En la imagen se puede apreciar como a la izquierda la fuente emite en varias longitudes de onda, pero el filtro sólo deja pasar aquellas que son verticales.

Dentro de este grupo, estaría el conocido comercialmente como IMAX 3D, por ejemplo.

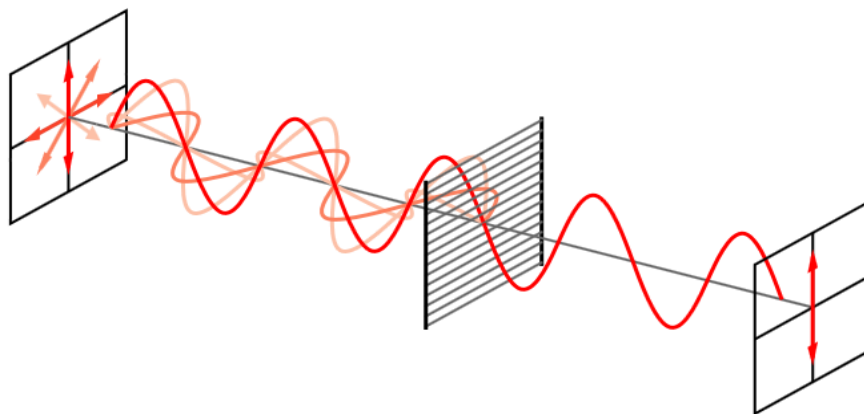


Figura 20. Esquema del funcionamiento de un filtro polarizador lineal (lámina central).

VENTAJAS

- El coste de las gafas de polarización es muy económico.
- Teniendo en cuenta la inversión que se realiza, se proporciona una muy buena experiencia de visualización 3D.

INCONVENIENTES

- La inclinación de la cabeza del usuario, supone una pérdida de la alineación entre los filtros de las gafas y el proyector, lo que repercute directamente en la pérdida de la visión 3D.
- Se necesitan dos proyectores de idénticas características.
- Es crucial que ambos proyectores estén perfectamente sincronizados entre sí.
- Las lámparas de los proyectores no se degradan de forma idéntica y pueden ocasionar problemas de ghosting en la proyección, con el paso del tiempo.

6.2.2 POLARIZACIÓN CIRCULAR

Se coloca frente al proyector una pantalla LCD (Z-screen en Real D) o una rueda giratoria de alta velocidad (Master Image), que lo que hace es, en sincronización con el proyector, polarizar la imagen circularmente. Esta emisión, llega a la pantalla, que tiene unas características específicas, de las que hablaremos más adelante, y que es conocida como silver screen. La luz se refleja, sin alterarse la polarización, y llega a las gafas de los espectadores.

Esta pantalla LCD tal y como su acrónimo indica, está conformada por moléculas de cristal líquido. El cristal líquido es una sustancia de moléculas lineales muy largas, que se comporta como un líquido, pero adquiere también alguna de las propiedades físicas de un sólido, la más importante para nosotros, es que sus moléculas tienden a mantener una cierta orientación, como las de un sólido pero, además, como líquido, estas moléculas tienen también capacidad de moverse en diferentes posiciones. A todo esto, el cristal líquido puede transmitir la luz y, su estructura se puede cambiar con la aplicación de un campo eléctrico y tienen capacidad de cambiar la polarización de la luz.

Concretamente, esta pantalla LCD actúa polarizando la luz que sale de éste, conformándola en luz polarizada circular dextrógira o levógira.

En la figura 21 se puede ver cómo obtener luz polarizada circular mediante el uso de un polarizador lineal y una lámina de lambda cuartos.

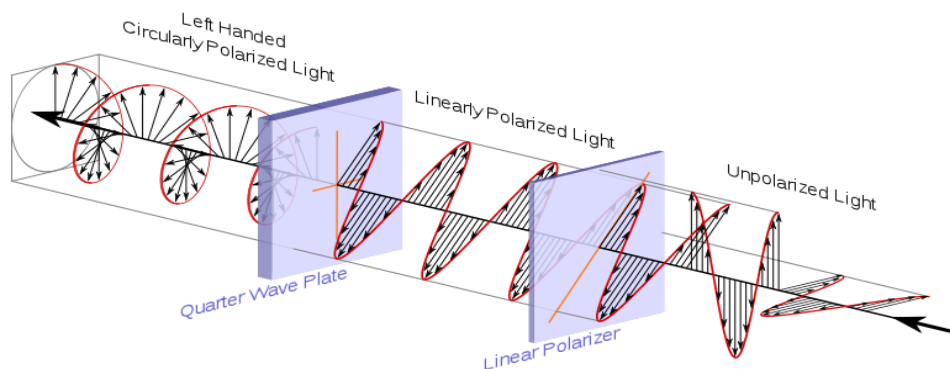


Figura 21. Esquema del funcionamiento de un filtro polarizador circular.

Los filtros de las gafas, son los que bloquean las ondas que giran en sentido inverso al suyo, y dejan pasar las que giran en el mismo sentido. De la misma manera que con el método de polarización lineal, cada ojo percibe una única imagen, produciéndose así la separación de imágenes, que interpretada por el cerebro, da lugar a la percepción 3D.

Este método tiene una ventaja respecto al método de polarización lineal, y es que el usuario puede inclinar ligeramente la cabeza hacia un hombro y el otro, y no perder el efecto.

Uno de los sistemas que utiliza este método, es conocido, comercialmente como RealD o Máster Image.

VENTAJAS

- Proporciona una de las mejores experiencias en visualización 3D
- El coste de las gafas de polarización es económico
- Permiten a los espectadores mantener la experiencia de visualización 3D aún inclinando la cabeza.
- Sólo es necesario un proyector, aunque éste debe ser de alta luminosidad.

INCONVENIENTES

- Es necesaria una “Silver-Screen” (pantalla plateada) en la sala de cine, para mejorar la luminosidad y conservar la dirección de la polarización de las imágenes.
- El fenómeno de ghosting está más presente que en otros sistemas
- Una gran parte de la luminosidad de la imagen se pierde en el proceso de polarización, lo que hace necesario adquirir proyectores más luminosos (y por tanto, más caros.)

6.3 MÉTODO VISIÓN ALTERNANTE

Este método emplea unas gafas conocidas como “shutter glasses” (gafas obturador) o gafas activas. Las lentes de estas gafas están compuestas de cristal líquido, e incorporan una batería.

Por otra parte, el proyector emite a una velocidad superior a la tasa habitual, una imagen para un ojo, y otra imagen para el ojo contrario, de manera alterna. La tasa de reproducción es de unas 60 a 150 veces por segundo, aproximadamente, del orden del doble-triple, que una reproducción normal, para evitar el efecto parpadeo. Para salas de cine se ha establecido 144Hz como standard de frecuencia.

Generalmente, las gafas y el proyector están conectados entre sí, mediante un sistema de infrarrojo o bluetooth, de manera que, cuando se proyecta en la pantalla una imagen para un ojo, las gafas activas oscurecen el filtro antepuesto en el ojo contrario, actuando como un obturador mecánico, que bloquea la luz.

En resumen, las gafas y la pantalla, se sincronizan de tal manera que cuando se emite una imagen para un ojo, las gafas bloquean la luz para el ojo contrario.

Respecto al resto de métodos de visualización 3D, este tiene la ventaja que elimina el efecto de “doble imagen” y el espectro de colores es total (a diferencia del sistema anáglifo, concretamente).

El principal de sus problemas es que si la tasa de reproducción no es lo suficientemente alta, se produce el indeseado efecto parpadeo.

VENTAJAS:

- Proporcionan la mejor experiencia de visualización de contenido 3D
- Para la industria cinematográfica, suponen la oportunidad de visionar contenido 3D sin reemplazar sus pantallas por una “silver-screen”
- El efecto ghosting prácticamente desaparece.

DESVENTAJAS:

- El coste de las gafas es muy alto, lo que obliga a las salas de cine a pedir que sean devueltas tras la sesión.
- Las gafas son frágiles y algunas necesitan ser activadas por el propio espectador. Además, son más pesadas que las demás alternativas.
- La batería que incorporan las gafas es de duración limitada, siendo preciso recargarlas, sustituir las pilas por unas nuevas, y en algunos modelos, incluso sustituir la gafa por otra nueva.
- Si entre el punto de emisión de infrarrojos (la pantalla) y el punto de recepción (las gafas) hay algún obstáculo, muy probablemente la experiencia de visionado 3D se verá frustrada.

6.4 TABLA RESUMEN

Tabla 1. Resumen de los apartados anteriores sobre sistemas de visionado 3D.

	ANAGLIFO	POLARIZACIÓN LINEAL	POLARIZACIÓN CIRCULAR	VISIÓN ALTERNANTE
ES NECESARIO ADECUAR LA PANTALLA	NO	SILVER SCREEN	SILVER SCREEN. DIFICULTA PROYECCIONES 2D.	NO
COSTE DE LAS GAFAS ASUMIBLE	SÍ	SÍ	SÍ	NO
COMODIDAD DEL USUARIO	BIEN	BIEN	BIEN	GAFAS PESADAS, PRECISAN RECARGO O REPOSICIÓN
VALORACIÓN DE EXPERIENCIA 3D	CORRECTA	BUENA	MUY BUENA	LA MEJOR
ESTABILIDAD DE LA EXPERIENCIA	ESTABLE (INCLINACIONES ADMISIBLES)	INESTABLE (INCLINACIÓN DE CABEZA NO ADMISIBLE)	ESTABLE (INCLINACIONES ADMISIBLES)	ESTABLE (INCLINACIONES ADMISIBLES). POSIBLES INTERFERENCIAS EN EL SISTEMA DE COMUNICACIÓN GAFAS-PROYECTOR.
NECESIDAD DE PROYECTORES:	UNO	DOS	UNO, DE ELEVADA LUMINOSIDAD	UNO
IMÁGENES FANTASMA	SÍ	SI, POR DESGASTE NO UNIFORME DE LOS PROYECTORES.	PUEDEN ESTAR PRESENTES	PRÁCTICAMENTE INEXISTENTES
CALIDAD DEL COLOR	BAJA	ALTA	ALTA	ALTA
CALIBRACIÓN	METICULOSA	ESTANDAR	ESTANDAR	SINCRONIZACIÓN METICULOSA

III. OBJETIVOS DEL TRABAJO

- Caracterizar geoméricamente una sala de cine de proyección 3D.
- Describir el sistema de proyección que utiliza.
- Obtener medidas de la ZVBSN en una pequeña muestra de observadores de distintas edades.
- Obtener un observador promedio con los datos conseguidos en el apartado anterior.
- Aplicar los criterios de confort de Percival y de Sheard para conocer a qué separación de los estímulos monoculares corresponde sobre la pantalla de proyección un determinado estímulo tridimensional.
- Aplicar los criterios de confort de Percival y de Sheard para conocer a qué distancia se percibiría el estímulo 3D en cada caso.
- Conocer cómo influye la posición del observador en la sala sobre la demanda de convergencia que se requiere.
- Conocer qué separación de los estímulos monoculares sobre la pantalla de proyección da lugar al límite de visión simple y nítida.
- Conocer a qué distancia se percibiría el estímulo 3D cuando nos encontramos al límite de visión simple y nítida.
- Realizar todos estos análisis para diferentes butacas características de la sala.
- Analizar la influencia de la DIP en la percepción tridimensional en una sala de proyección 3D.
- Conocer la distribución de luminosidad de la sala en distintas condiciones que se dan durante la proyección de la película.

IV. METODOLOGÍA

A partir de los resultados, podremos conocer qué posiciones son las más adecuadas para conseguir una buena estereopsis, así como el esfuerzo visual que requieren.

Características de la muestra de sujetos

Teniendo en cuenta que la población que frecuenta las salas de cine es muy variada, tomamos una muestra al azar. El único requisito imprescindible era que fueran pacientes con visión binocular bien establecida. – De lo contrario, no tiene sentido que los examinemos, porque no pueden alcanzar la estereopsis -. Está formada por 12 pacientes, con edades comprendidas entre 22 y 68 años, de los cuales, 6 son mujeres y 6 son hombres. Todos ellos, han realizado las pruebas con la corrección habitual puesta.

Materiales

Para la realización de las pruebas ha sido necesario un test Titmus, un foróptero y un test de letras verticales.

Descripción de los métodos de valoración concretos que se han utilizado

Para formar parte de la muestra, era imprescindible que los sujetos tuvieran una buena visión binocular establecida. Para asegurarnos de esto, nosotros evaluamos con un test muy conocido, el Titmus (conocido también como “el test de la mosca”) la estereopsis del paciente. Se trata de un test en el que aparece una gran mosca. Es preciso anteponer unas gafas polarizadas y debe colocarse a unos 40cm de los ojos del paciente. Primero se presenta monocularmente, para que el paciente observe que es una imagen plana, y pueda diferenciar esta sensación de la que se obtiene cuando ve el test binocularmente, en que la mosca, cuando hay visión estereoscópica, se ve en 3D. Se acostumbra a pedir al paciente que intente coger las alas de la mosca. Generalmente, intentan hacerlo a una cierta distancia del test, lo que indica que el paciente está viendo las alas sobresalir de la lámina y nos indica que existe visión estereoscópica.

Es un test que evalúa la estereopsis de manera cualitativa, y no cuantitativa, pero en nuestro estudio es suficiente, porque la idea no es determinar cuán fina es la visión estereoscópica del paciente sino confirmar que ésta exista.

Una vez hemos confirmado que existe visión estereoscópica, pasamos al siguiente paso. Es imprescindible que el usuario lleve puesta su corrección habitual antes de comenzar con las pruebas. En el caso de llevar gafas, comprobamos la graduación en el frontofocómetro, y colocamos la graduación en el foróptero para evaluar al paciente.

Tomamos medidas con el test colocado a 5m, distancia para la cual se define que el sistema visual se comporta como si miráramos al infinito. El test es de letras verticales, y se coloca la máxima agudeza visual que el paciente es capaz de ver.

Se recrea la misma situación que en una sala de cine, en la que el usuario está mirando hacia el “infinito”, por lo que la acomodación se considera prácticamente 0. El mecanismo que se requiere para fusionar estímulos estereoscópicos entonces es la convergencia. Por tanto, nosotros vamos a medir, cuál es la máxima convergencia que el paciente es capaz de realizar manteniendo el nivel acomodativo en 0. Para ello, anteponemos prismas de base temporal en ambos ojos de manera progresiva, hasta que el paciente indique que el test se percibe borroso mantenido o doble (hay que esperar un tiempo preventivo, sobre todo cuando el requerimiento de convergencia empieza a ser elevado, porque a veces el test se percibe borroso o doble al principio, pero finalmente el sistema visual reacciona y es capaz de enfocar y fusionar correctamente). De la misma forma que con los prismas de base temporal, repetiremos este método para los prismas de base nasal, con los que evaluaremos la divergencia.

Resultados de las pruebas optométricas

PACIENTE 1	
∇BT (5,2 m)	14
∇BN (5,2 m)	8
∇BT (70 cm)	14
∇BN (70 cm)	8
DIP	60mm
Edad	25
foria VL	2x'
foria VP	5x'

PACIENTE 5	
∇BT (5,2 m)	14
∇BN (5,2 m)	6
∇BT (70 cm)	20
∇BN (70 cm)	10
DIP	60mm
Edad	45
foria VL	Φ
foria VP	2x'

PACIENTE 9	
∇BT (5,2 m)	12
∇BN (5,2 m)	8
∇BT (70 cm)	22
∇BN (70 cm)	10
DIP	59mm
Edad	19
foria VL	Φ
foria VP	Φ

PACIENTE 2	
∇BT (5,2 m)	24
∇BN (5,2 m)	8
∇BT (70 cm)	30
∇BN (70 cm)	14
DIP	67mm
Edad	26
foria VL	Φ
foria VP	1x'

PACIENTE 6	
∇BT (5,2 m)	16
∇BN (5,2 m)	8
∇BT (70 cm)	20
∇BN (70 cm)	12
DIP	58mm
Edad	22
foria VL	Φ
foria VP	Φ

PACIENTE 10	
∇BT (5,2 m)	12
∇BN (5,2 m)	6
∇BT (70 cm)	14
∇BN (70 cm)	8
DIP	58mm
Edad	68
foria VL	Φ
foria VP	1x'

PACIENTE 3	
∇BT (5,2 m)	20
∇BN (5,2 m)	6
∇BT (70 cm)	30
∇BN (70 cm)	10
DIP	62mm
Edad	33
foria VL	1x'
foria VP	6x'

PACIENTE 7	
∇BT (5,2 m)	18
∇BN (5,2 m)	8
∇BT (70 cm)	28
∇BN (70 cm)	10
DIP	59mm
Edad	58
foria VL	3x'
foria VP	7x'

PACIENTE 11	
∇BT (5,2 m)	18
∇BN (5,2 m)	10
∇BT (70 cm)	22
∇BN (70 cm)	12
DIP	61mm
Edad	44
foria VL	Φ
foria VP	3x'

PACIENTE 4	
∇BT (5,2 m)	16
∇BN (5,2 m)	4
∇BT (70 cm)	18
∇BN (70 cm)	12
DIP	59mm
Edad	33
foria VL	Φ
foria VP	Φ

PACIENTE 8	
∇BT (5,2 m)	16
∇BN (5,2 m)	6
∇BT (70 cm)	20
∇BN (70 cm)	8
DIP	60mm
Edad	15
foria VL	Φ
foria VP	2x'

PACIENTE 12	
∇BT (5,2 m)	16
∇BN (5,2 m)	10
∇BT (70 cm)	20
∇BN (70 cm)	12
DIP	60mm
Edad	27
foria VL	2x'
foria VP	5x'

Conjunto de tablas 2. Datos de los 12 pacientes evaluados.

Para representar las siguientes gráficas hemos tenido en cuenta los siguientes valores de acomodación:

DISTANCIA	ACOMODACIÓN
0,7 m	1,43 D
5,2 m	0,19 D

Tabla 3. Valores de acomodación a las dos distancias evaluadas.

A la misma vez, para calcular la demanda de convergencia, hemos utilizado la siguiente fórmula:

$$C_L(\nabla) = A_L(D) \cdot DIP \text{ (cm)}$$

$$C_C(\nabla) = A_C(D) \cdot DIP \text{ (cm)}$$

Fórmula 1. Cálculo de convergencia en visión lejana (arriba) y en visión de cerca (abajo).

Donde C es la convergencia para lejos y cerca respectivamente, y A es la acomodación de lejos y de cerca, también. La DIP debe introducirse en centímetros para obtener el resultado de la convergencia en dioptrías prismáticas.

7. PARAMETRIZACIÓN DE LA SALA.

7.1 INTRODUCCION.

La sala está compuesta por 416 butacas repartidas en 17 filas colocadas a distintas alturas, para evitar que los observadores se obstaculicen la proyección unos a otros.

En cuanto al acceso de la sala, se hace por la parte anterior, más cercana a la pantalla. La primera fila, tiene butacas acondicionadas para personas con silla de ruedas y es accesible porque no es necesario subir escalones para ocuparla. Para las demás filas, si es necesario subir escalones. Hay un total de 45 escalones en toda la sala. Entre cada fila de butacas existe un desnivel de 3 escalones, que miden cada unos 14.5cm.

La sala está dotada de una Silver Screen, de 19m de ancho y 11m de alto. Esta no es totalmente plana, tiene una ligera curva, para un efecto más envolvente durante la proyección y está habilitada para proyectar películas 2D y 3D.

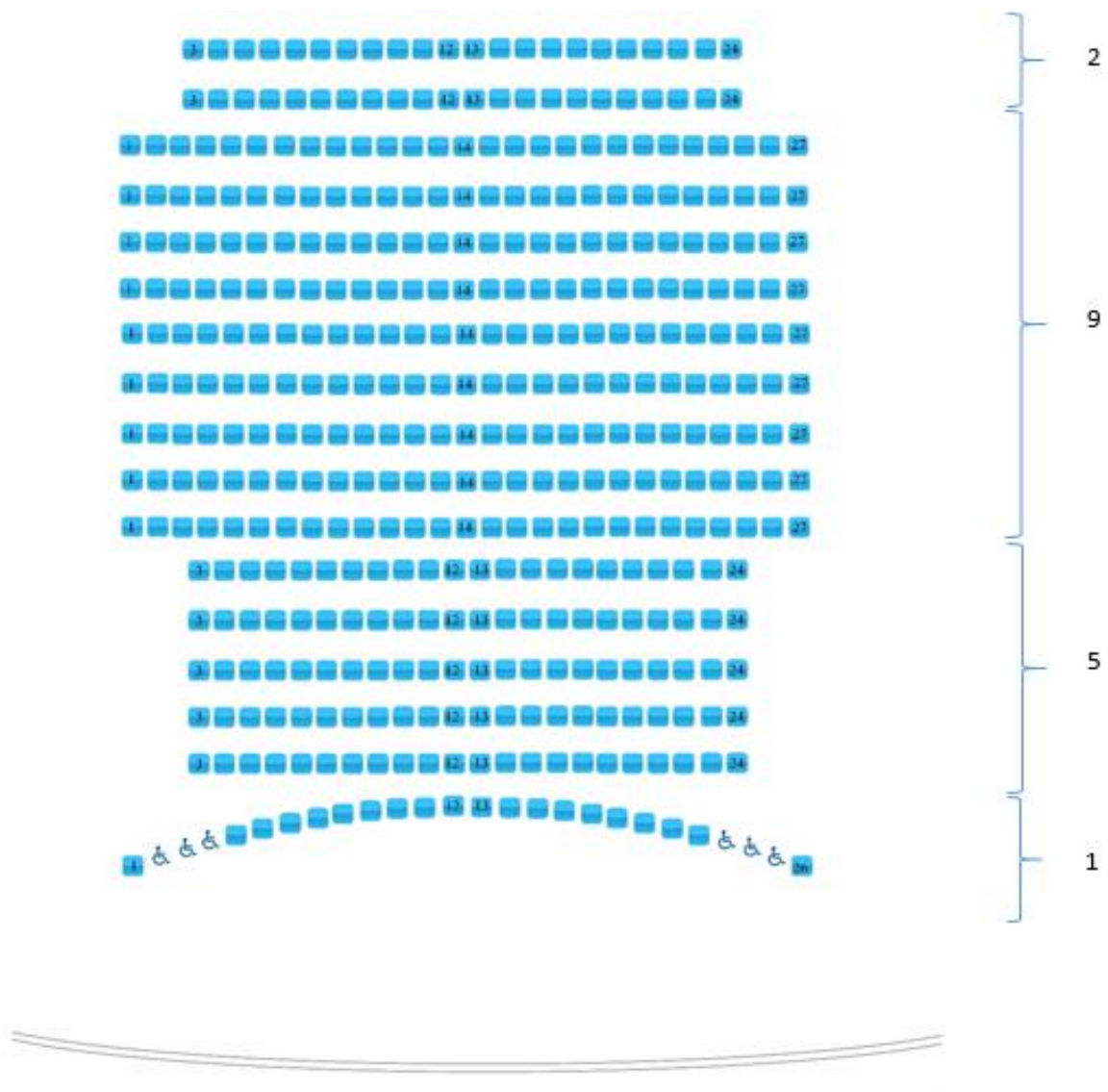


Figura 22. Esquema de la distribución de las filas de la sala.

Para poder reproducir películas en 3D, aparte de que es necesario anteponer la pantalla LCD tal y como se comentaba en apartados anteriores, también es preciso que el archivo que se reproduce sea diferente. Para películas 2D el archivo (que es digital) es de menor volumen que el archivo 3D, que ya contiene el desdoble de imágenes pertinente. Hemos querido hacer una estimación de la distancia que separa las dos imágenes desdobladas sobre la pantalla y hemos tomado algunas medidas experimentales en diferentes fotogramas de una película 3D escogida al azar. La media de estas medidas roza los 13cm.

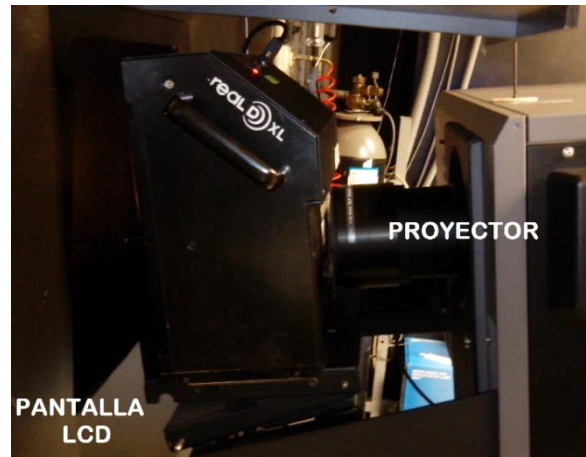


Figura 23. Fotografía del proyector de la sala con la pantalla LCD antepuesta

En cuanto a la luminosidad de la sala, podemos diferenciar 3 situaciones diferentes. Las luces están completamente encendidas cuando no se está proyectando nada, y éste es el momento en que los espectadores entran en la sala y se ubican. Una vez ubicados, la sala que queda a media luz, se reduce en un 50% la luminosidad de la sala, y se proyectan los tráileres y anuncios. La última situación se da cuando comienza la película, y las luces se apagan por completo, quedando operativas únicamente las luces que iluminan las escaleras, para poder abandonar la sala en caso de que fuera necesario. Para el trabajo, hemos medido la luminosidad de la sala durante los anuncios y durante la proyección. Para esta última hemos tenido en cuenta dos situaciones, una de ellas con las gafas polarizadas puestas y otra sin ellas. De esta manera hemos podido aproximar la absorbancia del filtro.

7.2 PROYECTOR

El proyector que se utiliza en esta sala es un NEC NC3204S-A. Se trata de un proyector de última tecnología y diseño en proyección 4K 3D. La proyección 4K alberga una alta resolución (4 veces mayor que el FullHD convencional, según nec display solutions) y es el complemento ideal para pantallas grandes, como la que se haya en esta sala. El proyector utiliza una bombilla de Xenon de 7KW, y tiene un máximo de emisión de 33.000 lúmenes. El sistema de ajuste o enfoque está completamente motorizado y tiene una resolución de 4096 x 2160.

Tal y como se comentaba en la introducción, es apto para proyectar imágenes tanto en 2D como en 3D. Tiene únicamente un cañón, y lo que diferencia el tipo de proyección es el propio archivo que se reproduce y una pantalla LCD, que debe anteponerse al cañón del proyector, para emitir películas 3D. Como se explica en el apartado de polarización circular, esta pantalla LCD, en resumen, lo que hace es polarizar la emisión de luz que sale del proyector, en luz polarizada circular dextrógira y levógira, que es una condición indispensable para poder conseguir el efecto 3D.



Figura 24. Imagen frontal del proyector de la sala.

7.3 PANTALLA

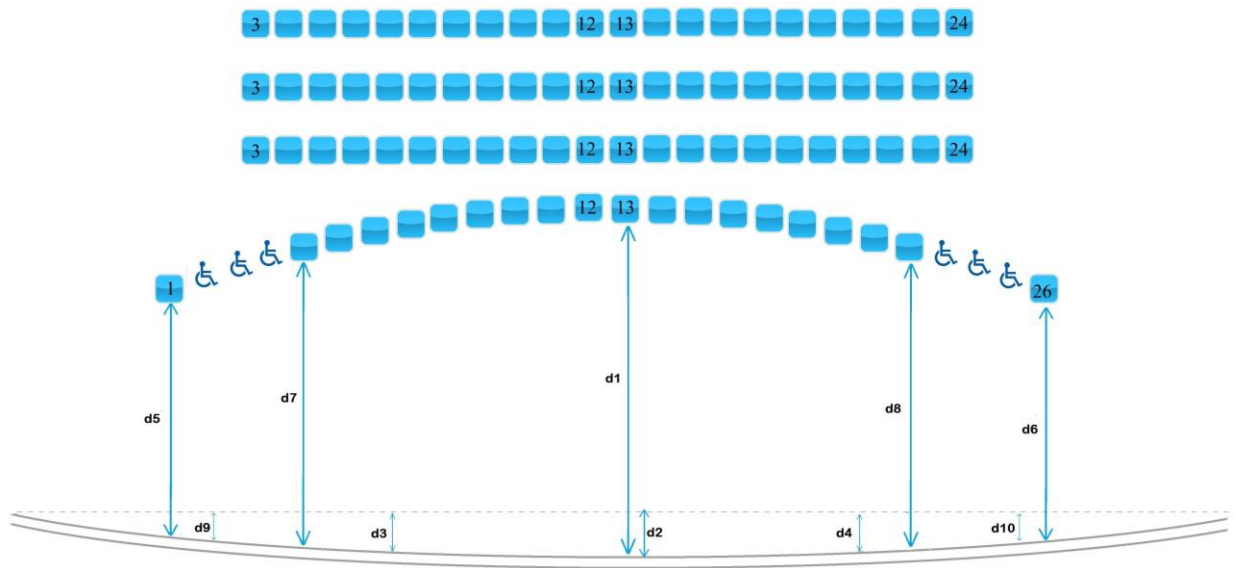


Figura 25. Esquema de las medidas realizadas en la sala en cuanto a la pantalla.

- D1:** 8m
- D2:** 80cm
- D3:** 40cm (tomado a 4m del extremo)
- D4:** 40cm (tomado a 4m del extremo)
- D5:** 5,80m
- D6:** 5,80m
- D7:** 7,20m
- D8:** 7,20m
- D9:** 25cm (tomado a 3m del extremo)
- D10:** 25cm (tomado a 3m del extremo)

Ancho de pantalla: 19m

Alto de pantalla: 11m

Se trata de una pantalla Silver Screen, imprescindible para el tipo de proyección 3D que se emite en esta sala. Su función principal es reflejar la luz incidente hacia el espectador sin alterar la polarización de la luz, que es circular. Abasta prácticamente todo el alto y ancho de la pared de la sala y se trata de la mayor pantalla de este tipo instalada en Catalunya.

Hemos tenido la posibilidad de tomar algunas medidas sobre las cartas que se utilizan para calibrar la pantalla y, los datos obtenidos para luminosidad máxima y mínima son los que se muestran en la tabla

Tabla 4. Medidas de luminosidad máxima y mínima

Luminosidad	E (lx)	L (cd/m ²)
Máxima	20	7.2
Mínima	3.16	0.06

Figura 26. Esquema de luminosidades.



Soporta proyecciones 3D, para la que está especialmente diseñada, pero también soporta formato 2D.

7.4 GAFAS

Sabiendo que se trata de una pantalla Silver Screen y de una proyección con luz polarizada circular ya podemos deducir que los filtros de las gafas son también polarizadores circulares.

Para comprobarlo, hicimos la prueba. Si se tratase de filtros de polarización lineal, en el momento que antepone dos gafas hay dos opciones, que los filtros sean coincidentes en cuanto a la dirección de la luz que polarizan, y por tanto continuará pasando luz, o la opción contraria, en el los filtros que se han antepuesto polarizan la luz en dirección contraria, por lo que no pasará nada de luz. En caso de que los filtros sean de polarización circular, este efecto no se produce. Al anteponer los filtros se reduce la luz, pero en ninguno de los casos se bloquea toda la luz, por lo que siempre podemos ver a través de ellos.

En nuestro caso en ninguna de las posiciones hemos encontrado un eje en que la luz quede bloqueada totalmente, por lo que sabemos que los filtros son polarizadores circulares.

7.5 BUTACAS

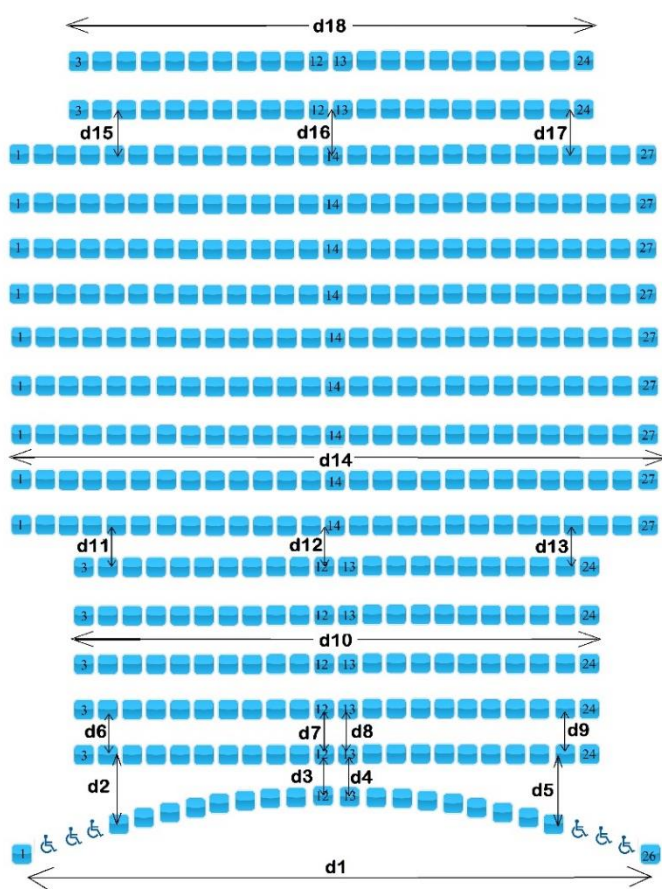


Figura 27. Esquema de las medidas tomadas en las butacas de la sala.

D1: 19m	D7: 1m	D13: 1m
D2: 2m	D8: 1m	D14: 19m
D3: 1m	D9: 1m	D15: 1m
D4: 1m	D10: 15m	D16: 1m
D5: 2m	D11: 1m	D17: 1m
D6: 1m	D12: 1m	D18: 15m

Número de filas: 17
Número de butacas: 416

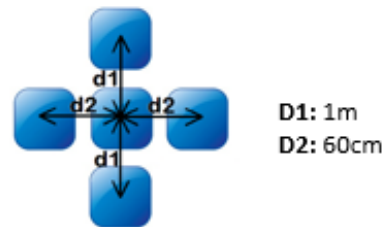


Figura 28. Esquema de las medidas relativas entre butacas.

Las 416 butacas de la sala se organizan en 17 filas, que pueden diferenciarse en 4 bloques según su longitud.

Uno primero, compuesto por una única fila, que se encuentra en la parte más baja de la sala. Esta fila está formada por 26 butacas que se organizan definiendo una curva envolvente de cara a la pantalla. En esta fila también hay 6 localizaciones especiales para personas con silla de ruedas. Las butacas centrales ocupan 13m de ancho, si consideramos las butacas más extremas y las acondicionadas para minusválidos, este ancho aumenta hasta 19m.

El segundo grupo de localizaciones está a continuación de esta primera fila. Está compuesto por 5 filas, de 21 butacas cada una, colocadas centradas y paralelas respecto al plano de pantalla, sin ningún tipo de curva. El ancho de las filas son 15m. Cabe decir que estos dos primeros bloques de butacas, no acostumbran a ocuparse, la mayoría del público escoge los dos grupos siguientes, situados más retirados de la pantalla.

El tercer grupo de butacas ocupa la zona media-alta de la sala. Está compuesto de 9 filas de 27 butacas cada una, situadas centradas respecto al plano de la pantalla. Su ancho es de 19m. En este caso, también estas filas están colocadas de manera paralela a la pantalla y totalmente rectas. Por último, el cuarto bloque, que se sitúa en la parte más lejana a la pantalla y está formado por dos filas de 24 butacas cada una, también situadas centradas respecto a la pantalla, paralelas y rectas. Igual que las del segundo bloque, la longitud de estas filas es de 15m. Respecto a la posición de las butacas en las filas, hay una distancia entre ellas de 60cm en las butacas de la misma fila. Entre la butaca de una fila y la fila posterior o anterior, esta distancia es de 1m. Estas medidas se han tomado de centro a centro de la butaca y son estables para toda la sala, excepto para las butacas de la primera fila, que están colocadas de forma curva, por lo que la distancia entre ellas y las butacas de la fila posterior varía a lo largo de toda la fila, siendo 1m entre las butacas centrales (12 y 13) y de 2m teniendo en cuenta las butacas más extremas (consideramos la 4 y 22 como las butacas más extremas, porque las butacas 1 y 26 prácticamente nunca son ocupadas). Para esta fila, igual que para las del resto de la sala, la distancia entre una butaca y la contigua es de 60cm.

La sala tiene un total de 45 escalones. Cada grupo de 3 escalones constituye un nivel, y en cada nivel hay una fila de butacas. El nivel mide 45cm de altura, por lo que cada escalón mide 15cm. Las butacas tienen una altura de 45cm. A partir de la fila 2, se inician los escalones, por lo que, la diferencia de altura entre la fila 1 y la 17, calculamos que es de aproximadamente 7,2m.

7.6 LUMINOSIDAD DE LA SALA

Para tomar estas medidas, hemos utilizado un fotómetro y hemos tenido en cuenta las posiciones más extremas de la sala. Las butacas más laterales y la central de la última fila, de la fila que ocupa el centro de la sala y de la segunda fila. Hemos desestimado tomar estas medidas en la primera fila, porque son butacas que no se utilizan, y porque su distribución no es recta, como la del resto de la sala. Hemos tomado medias de iluminancia en el plano de los ojos con la luz totalmente apagada, simulando el ambiente durante la proyección de la película, esta misma medida con las gafas polarizadas antepuestas al fotómetro, simulando la luz que llegaría al espectador y la medida a media luz, simulando el ambiente durante la proyección de los anuncios.

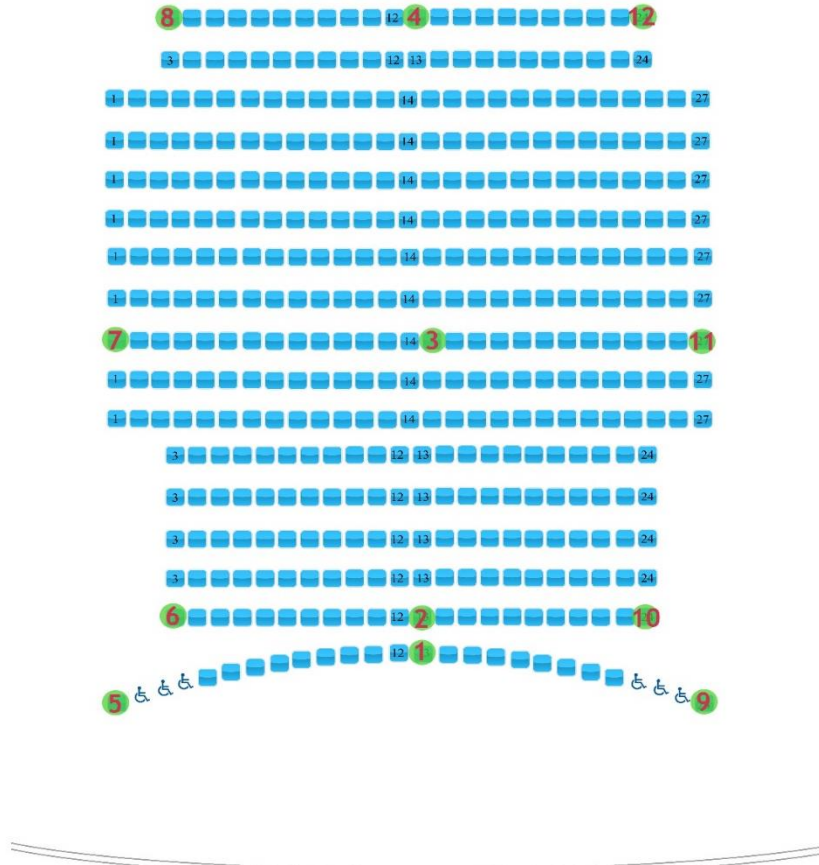


Figura 29. Esquema de las posiciones de las butacas evaluadas.

Para calcular la transmitancia del filtro hemos utilizado la siguiente fórmula:

Fórmula 2. Cálculo de transmitancia.

$$\text{Transmitancia} = \frac{E (\text{luz apagada} + \text{filtro})}{E (\text{luz apagada})}$$

Tabla 5. Medidas de luminosidad.

POSICIÓN BUTACA	A MEDIA LUZ	LUZ APAGADA	LUZ APAGADA + FILTRO	TRANSMITANCIA
2	1,87	1,25	0,42	0,336
3	1,45	0,58	0,25	0,431
4	2,64	0,22	0,08	0,3636
6	1,88	1,35	0,49	0,363
7	2,52	0,32	0,14	0,4375
8	2,23	0,17	0,07	0,4118
10	0,9	0,42	0,14	0,3333
11	3,85	0,2	0,06	0,3
12	1,7	0,14	0,05	0,3571

Para estimar el valor de la transmitancia del filtro, hemos hecho un promedio de todos los valores obtenidos. Este valor corresponde a 0,3704 lo que significa que la transmitancia del filtro es del 37% aproximadamente.

Como muestran los resultados, con la luz apagada, conforme nos alejamos de la pantalla hacia las butacas más traseras, disminuye el nivel de iluminancia. Esto tiene sentido porque la fuente principal de luz es la pantalla, y cuanto más lejos nos situamos, menor cantidad de luz recibimos. Por otra parte, a media luz, este fenómeno no se produce, porque la fuente principal de luz ya no es sólo la pantalla, sino que hay también luz ambiental distribuida de forma más o menos homogénea por la sala.

En cuanto al valor de la transmitancia de las gafas polarizadas es del 37%. El valor obtenido es coherente. Tan sólo por el hecho de ser un filtro polarizado ya asumimos una pérdida de transmisión del 50% de la luz.

Esto se debe a que del total de la luz polarizada circular que llega al filtro, tan sólo la que está polarizada en la misma dirección que la del filtro (dextrógira o levógira) se transmite. El resto de luz no atraviesa el filtro y se pierde. Con lo que, en el mejor de los casos, suponiendo que no se produjese el fenómeno de reflexión ni absorción, la transmitancia del filtro sería del 50%, pero no es así. Una parte de la luz que llega al filtro se pierde en forma de reflexión sobre la superficie, y esto hace disminuir aún más la transmisión del filtro.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la finalidad de determinar cuáles son los parámetros que afectan más directamente a la experiencia 3D, hemos realizado una serie de simulaciones que se exponen a continuación. Antes de empezar a analizar la sala, mostramos un esquema, dónde aparecen numeradas las butacas que hemos tenido en cuenta para el análisis, para poder interpretar los gráficos. Se toman las butacas 1,2,3 y 4 como las centrales, 5,6,7 y 8 laterales derechos (mirando hacia la pantalla) y 9,10,11 y 12 laterales izquierdos.

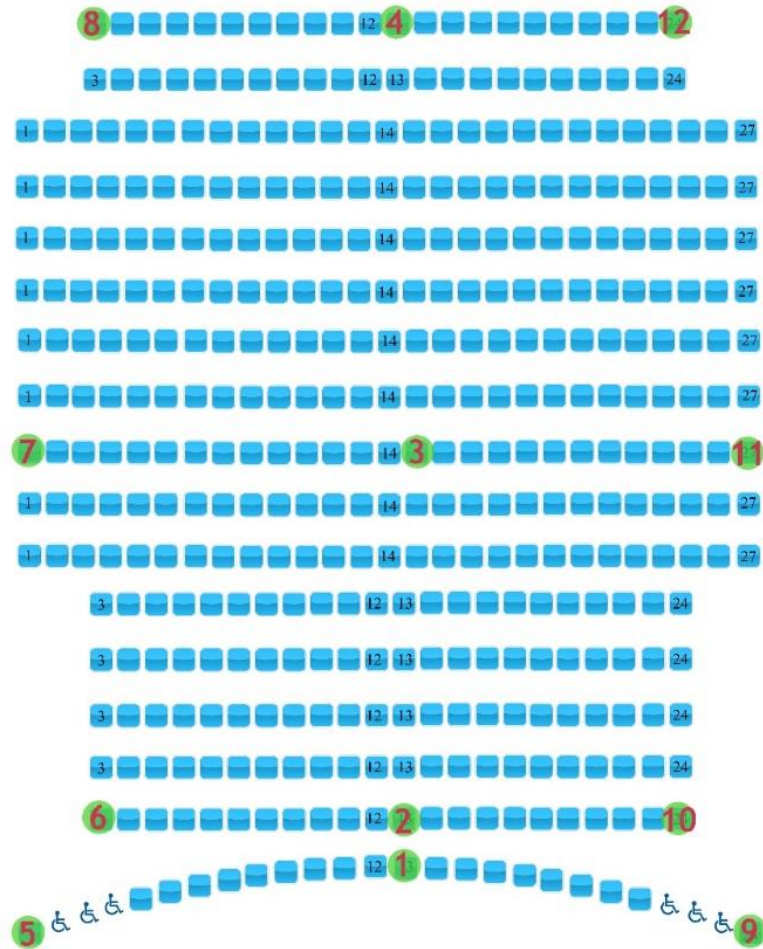


Figura 30. Esquema de las posiciones de las butacas evaluadas.

1. Definición del observador patrón.

Tabla 6. Resultados del paciente promedio.

		PACIENTE PROMEDIO	
		DIP (mm)	60,25
d (mm) = 5200	∇BT	16,33	
	∇BN	7,33	
	Fòria (∇)	-0,67	
d (mm) = 700	∇BT	21,50	
	∇BN	10,50	
	Fòria (∇)	-2,67	

ZVBSN

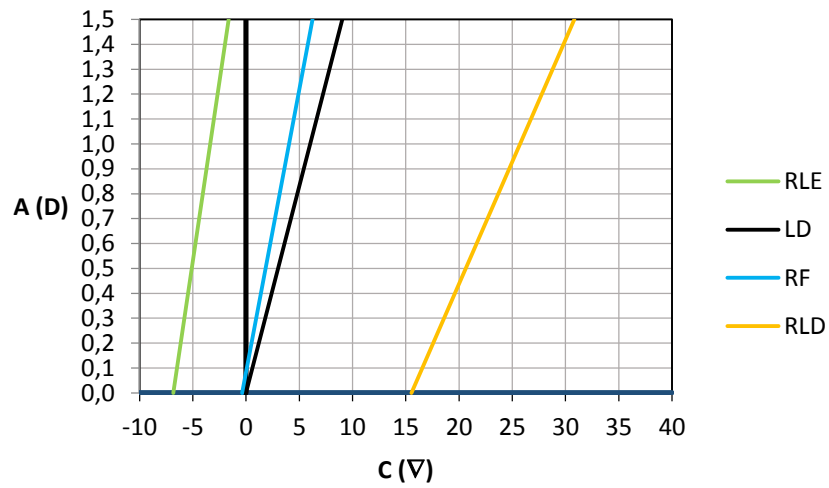


Figura 31. Resultados del área de ZVBSN del paciente promedio.

Criteri de Percival

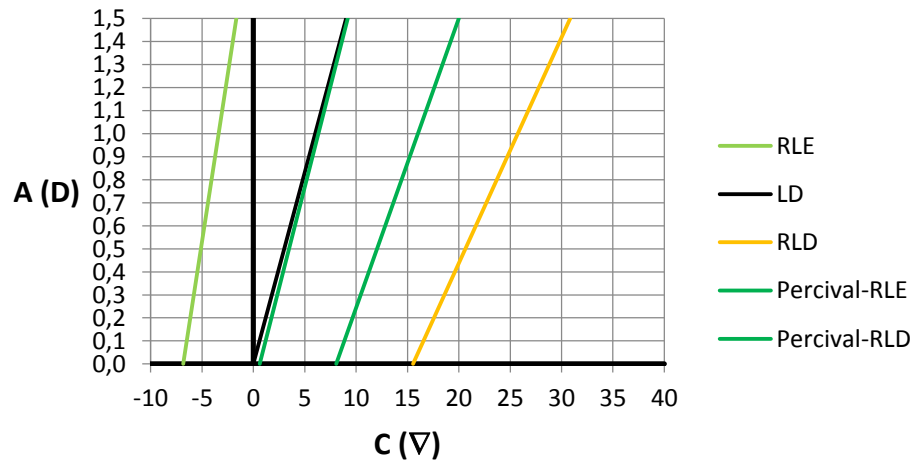


Figura 32. Resultados del área de visión cómoda según el criterio de Percival de la ZVBSN del paciente

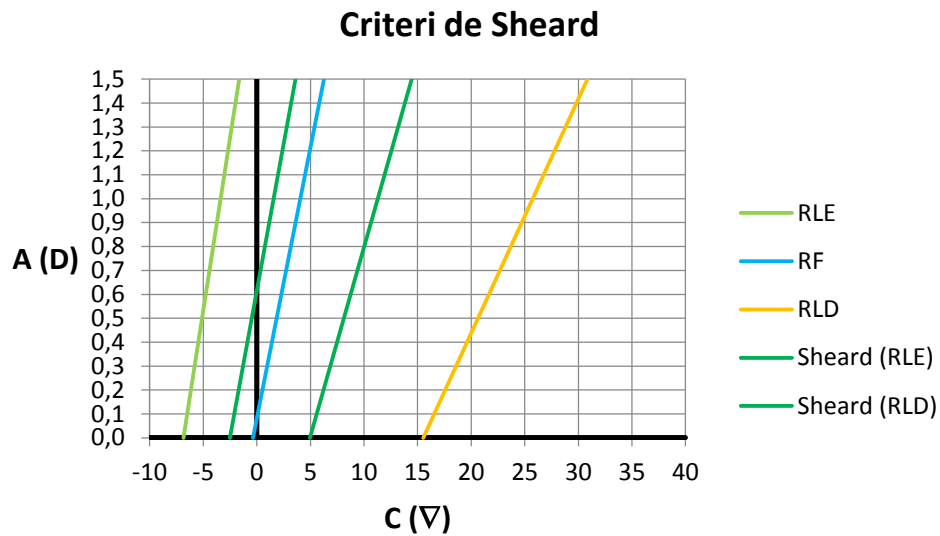


Figura 33. Resultados del área de visión cómoda según el criterio de Sheard de la ZVBSN del paciente

2. Variación de la convergencia y acomodación en función de la posición del observador en la sala y de la posición y magnitud del estímulo.

Tabla 7. Resultados para un observador patrón y un estímulo central de 200mm

4. ESTIMULO 1 (separación de 200mm)				
BUTACA	A (D)	C (∇)	D3D(mm)	DISPARIDAD(∇)
1	0,12	3,25	1854,01	2,50
2	0,11	2,88	2085,60	2,22
3	0,06	1,62	3704,11	1,25
4	0,04	1,08	5556,95	0,83
5	0,04	1,02	5892,81	0,78
6	0,08	1,5	4001,98	0,98
7	0,09	2,04	2953,55	1,49
8	0,05	1,34	4468,03	1,01

En esta tabla se analiza para un observador patrón cómo varían algunos parámetros considerando un estímulo de 200mm de separación situado en el centro de la pantalla. A continuación mostramos en un gráfico la convergencia requerida para cada butaca analizada.

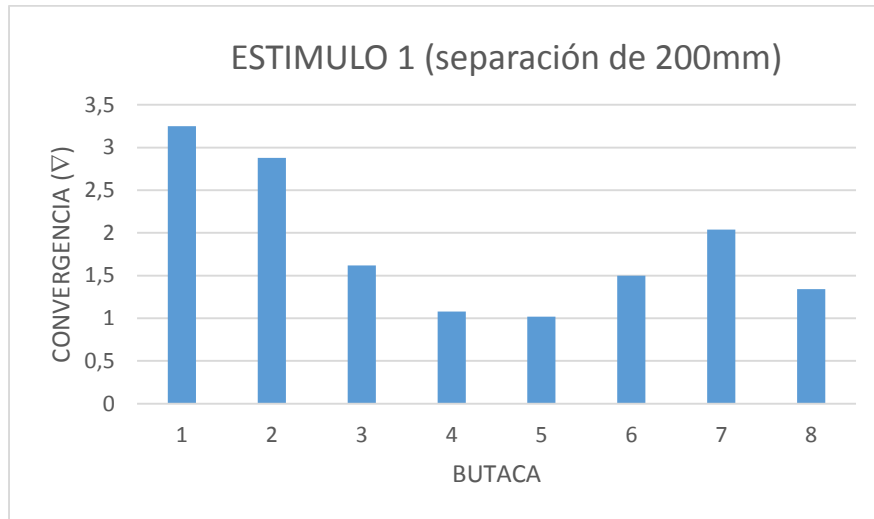


Figura 34. Gráfico de los resultados para un observador patrón y un estímulo central de 200mm

Para este estímulo, las butacas que requieren una mayor convergencia para fusionar las imágenes (por tanto el estímulo implica una mayor disparidad) son las situadas en la primera y segunda fila en el centro.

El resultado obtenido es coherente, porque estas butacas son las que se encuentran más cercanas al estímulo, y por ello el requerimiento visual es mayor. Por el contrario, los asientos situados al final de la sala, en la fila 17 son los que requieren una menor convergencia, no habiendo prácticamente diferencias entre la posición central y lateral.

Podemos observar, que para las primeras filas, si es relevante la posición relativa dentro de la fila. Es decir, el esfuerzo visual para converger varía dependiendo de si nos sentamos en el centro o lateral de la fila, siendo mayor cuanto más central sea la posición. Este fenómeno encaja con la explicación de que, cuánto más central es la posición, menor es la distancia hasta el estímulo.

Sin embargo, cuánto más nos alejamos de la pantalla, estas diferencias disminuyen, siendo prácticamente insignificante para la última fila.

Para determinar la relevancia de la posición del observador en la sala en cuanto a la demanda de convergencia requerida hemos calculado la variación que hay entre la butaca que requiere una mayor convergencia y la que menos. La fórmula empleada es la siguiente:

Fórmula 3: Cálculo de la máxima variación de convergencia para las diferentes suposiciones evaluadas

$$diferencia\ máxima\ (\%) = 100 \left(\frac{|convergencia_{m\acute{a}x} - convergencia_{m\acute{i}n}|}{convergencia_{m\acute{a}x}} \right)$$

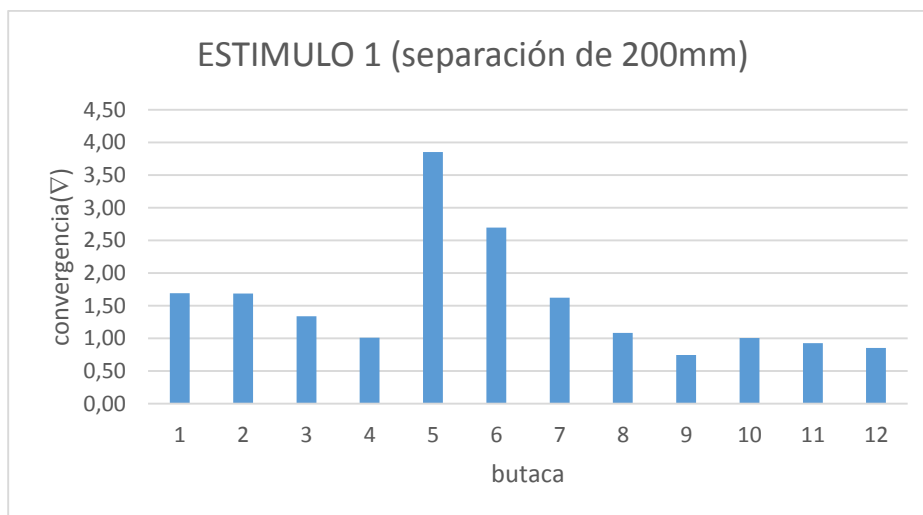
La diferencia obtenida es del 68.6%, y corresponde a una convergencia de 2.22D.

Por su lado, la acomodación se comporta de la misma forma que la convergencia. Cuanto más cerca del estímulo se sitúa la butaca, mayor es el requerimiento acomodativo, por el mero hecho de que el estímulo está más cerca de los ojos del observador. En cualquier caso, los valores del estímulo de acomodación son tan bajos que no precisan un análisis más profundo. Para el mismo observador, hemos calculado una tabla suponiendo que se proyecta el mismo estímulo, con una separación de imágenes de 200mm, pero esta vez en el lateral de la pantalla:

Tabla 8. Resultados para un observador patrón y un estímulo lateral de 200mm

ESTIMULO 1 (separación de 200mm)				
BUTACA	A (D)	C (V)	D3D(mm)	DISPARIDAD(V)
1	0,09	1,69	2.194,70	2.806,84
2	0,08	1,69	2.375,71	2.781,82
3	0,06	1,34	3.781,05	2.174,97
4	0,04	1,01	5.397,07	1.629,49
5	0,16	3,85	1.028,17	6.594,33
6	0,11	2,69	1.378,93	4.683,80
7	0,06	1,62	3.123,95	2.675,42
8	0,04	1,08	5.015,36	1.761,42
9	0,05	0,74	7.488,27	931,99
10	0,06	1,01	5.206,87	1.445,34
11	0,04	0,93	5.846,43	1.418,10
12	0,04	0,85	6.476,93	1.349,76

Figura 35. Gráfico de los resultados para un observador patrón y un estímulo lateral de 200mm



Esta vez, la butaca que, con diferencia, requiere un mayor esfuerzo de convergencia la que se encuentra en el lateral de la primera fila que se encuentra frente al estímulo. Si tenemos presente la distribución de la sala, recordaremos que es una butaca especialmente cercana a la pantalla y, ahora, le hemos colocado el estímulo junto enfrente, de manera que la distancia entre el observador y el estímulo es la menor de todas las posibles. También requiere más esfuerzo que el resto la butaca lateral que se encuentra frente al estímulo de la fila 2, que también está cerca de la pantalla y, en menor orden, la central de la primera fila.

Por otra parte, pudiera parecer que la butaca del lateral opuesto al que se proyecta el estímulo de la primera fila, también debería ser crítica, pero hemos comprobado numéricamente que el requerimiento de convergencia es inferior al de otras butacas situadas más hacia atrás en la sala.

Para el resto de la sala, ocurre como en la tabla anterior, cuánto mayor es la distancia entre el estímulo y el observador, menor es el requerimiento de convergencia. La acomodación también sigue esta misma teoría.

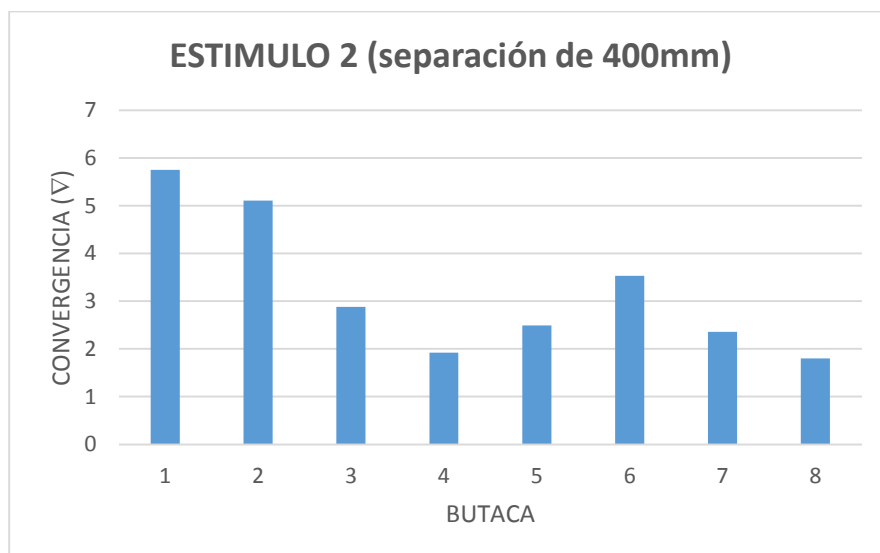
Esta vez, la variación que hay entre la butaca que requiere una mayor convergencia y la que menos y es de 80.7%, que corresponde a 3.10D.

También hemos analizado que ocurre cuando, para un mismo observador, y un mismo lugar de la sala, variamos el estímulo.

Tabla 9. Resultados para un observador patrón y un estímulo central de 400mm

ESTIMULO 2 (separación de 400mm)				
BUTACA	A (D)	C (∇)	D3D(mm)	DISPARIDAD(∇)
1	0,12	5,75	1.048,40	5
2	0,11	5,11	1.179,35	4,44
3	0,06	2,88	2.094,48	2,5
4	0,04	1,92	3.142,19	1,67
5	0,09	2,49	2.420,93	1,97
6	0,09	3,53	1.705,97	2,98
7	0,06	2,36	2.554,57	2,02
8	0,04	1,8	3.343,38	1,56

Figura 36. Gráfico de los resultados para un observador patrón y un estímulo central de 400mm



En esta tabla se representa la convergencia requerida para cada lugar de la sala para un estímulo de 400mm, el doble de separado que antes, situado en el centro de la pantalla. Hemos realizado un cálculo para ver cuánto varía en porcentaje el requerimiento de convergencia dependiendo de la posición relativa que ocupa el observador en la sala. Podemos decir que la variación afecta de manera más o menos homogénea en toda la sala. El requerimiento de convergencia aumenta aproximadamente un 40% al cambiar un estímulo central por otro lateral. Los resultados que se obtienen cuando el estímulo se proyecta en un lateral de la pantalla son los siguientes:

Tabla 10. Resultados para un observador patrón y un estímulo lateral de 400mm

ESTIMULO 2 (separación de 400mm)				
BUTACA	A (D)	C (∇)	D3D(mm)	DISPARIDAD(∇)
1	0,09	3,06	1.216,95	5.614,14
2	0,08	3,04	1.320,06	5.563,92
3	0,06	2,40	2.116,53	4.349,91
4	0,04	1,80	3.026,53	3.258,94
5	0,16	7,06	561,50	13.185,46
6	0,11	4,97	748,25	9.366,54
7	0,06	2,92	1.737,05	5.350,63
8	0,04	1,94	2.805,98	3.522,80
9	0,05	1,20	4.658,61	1.864,09
10	0,06	1,71	3.069,52	2.890,84
11	0,04	1,62	3.358,58	2.836,25
12	0,04	1,51	3.665,36	2.699,51

Figura 35. Gráfico de los resultados para un observador patrón y un estímulo lateral de 400mm



En este caso, sí se aprecian diferencias según la posición de la butaca. El asiento que se ve más afectado por el cambio es el que se encuentra en la primera fila en un lateral, de frente al estímulo. También se ven afectadas significativamente las butacas laterales de la primera y segunda fila. El resto también se ven afectadas, pero en menor orden.

En este caso, la diferencia de convergencia requerida para los casos más extremos es del 83%, unas 5.85D

De estos dos análisis, podemos concluir que, tanto cuando la posición del estímulo es central, como cuando es lateral, un aumento de la separación entre imágenes, requiere un aumento del esfuerzo de convergencia que varía bastante en función de la posición de la sala en qué se encuentra el observador. También es cierto, que esta variación produce más diferencias entre las butacas cuando la posición del estímulo es lateral. Es decir, cuando el estímulo es lateral, la diferencia de convergencia requerida por las butacas en función de la posición produce variaciones mayores que cuando el estímulo es central. Una vez más, cuánto mayor sea la distancia entre el observador y el estímulo, menos esfuerzo se requiere.

3. Variación del requerimiento de convergencia en función de la distancia interpupilar del paciente.

En el primer caso, suponemos un estímulo en el centro de la pantalla, con una separación de imágenes de 200mm. Hemos supuesto unas DIP de 40 mm y 80 mm, para llevar los valores hasta el extremo, puesto que con incrementos inferiores casi no se aprecian diferencias en los requerimientos de convergencias.

Para el observador patrón:

Tabla 11. Resultados para un observador patrón con DIP 60.25 en las diferentes posiciones de la sala

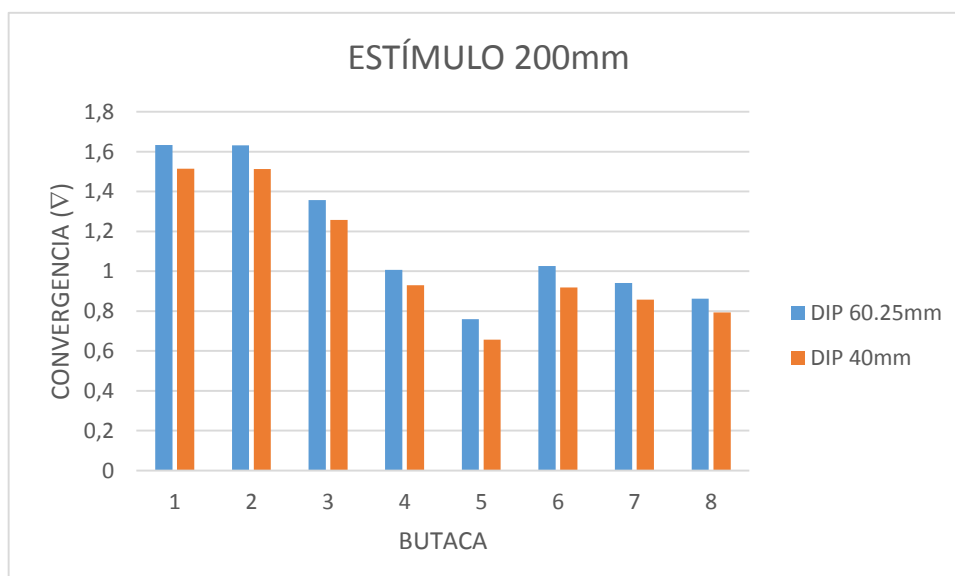
DIP 60,25 mm		
CONVERGENCIA (∇)	DISTANCIA 3D (mm)	DISPARIDAD (")
1,63	2.650	2635
1,35	3.891	2182
1,00	5.631	1609
1,02	5.316	1456
0,94	5.994	1424
0,86	6.659	1352
0,75	7.620	938
1,63	2.493	2641

Para el observador con DIP 40 mm:

Tabla 12. Resultados para un observador con DIP 40 en las diferentes posiciones de la sala

DIP 40 mm		
CONVERGENCIA (∇)	DISTANCIA 3D (mm)	DISPARIDAD (")
1,51	1898	2635
1,25	2790	2182
0,93	4043	1609
0,91	3942	1456
0,85	4371	1424
0,79	4808	1352
0,65	5848	938
1,51	1785	2641

Figura 36. Gráfico comparativo de los resultados obtenidos en las tablas anteriores. (11 y 12)



Si lo comparamos con el observador estándar, para el que se ha considerado una dip 60'25 mm, vemos que las exigencias de convergencia se han reducido en todos los casos. Es obvio, puesto que una DIP menor supone unos ojos más cercanos entre ellos, y que requieren converger una menor distancia que un paciente con una DIP de alrededor de 60mm para enfocar un objeto situado en un mismo punto. Las posiciones para las que la variación de la DIP es más crítica son las butacas laterales de la primera, segunda y novena fila, siendo menor cuánto más nos alejamos de la pantalla. Para el resto de butacas analizadas, en posición centro o al final de la sala laterales, la variación que se produce es prácticamente la misma, y ronda el 3'7%.

De este análisis, podemos concluir que, la DIP, (disparidad del estímulo o posición de la sala) es uno de los factores que nos afecta al requisito de convergencia, pero en comparación con otros, no es demasiado significativa, excepto para las primeras filas de la sala. Representa variaciones de alrededor de 0.12 ∇ en el peor de los casos, y para obtener este valor hemos considerado una DIP de 40mm para llevarlo al extremo, de modo que, en casos menos extremos, la variación que se produce es aún menor.

Digamos que, una DIP pequeña, no será un requisito determinante para tomar posición en la sala.

Hemos supuesto el mismo problema para el caso contrario, una DIP excesivamente grande. Hemos considerado 80mm, para llevarlo al extremo.

Figura 37. Gráfico de la convergencia para un paciente con una DIP de 80mm y un estímulo central de 200mm

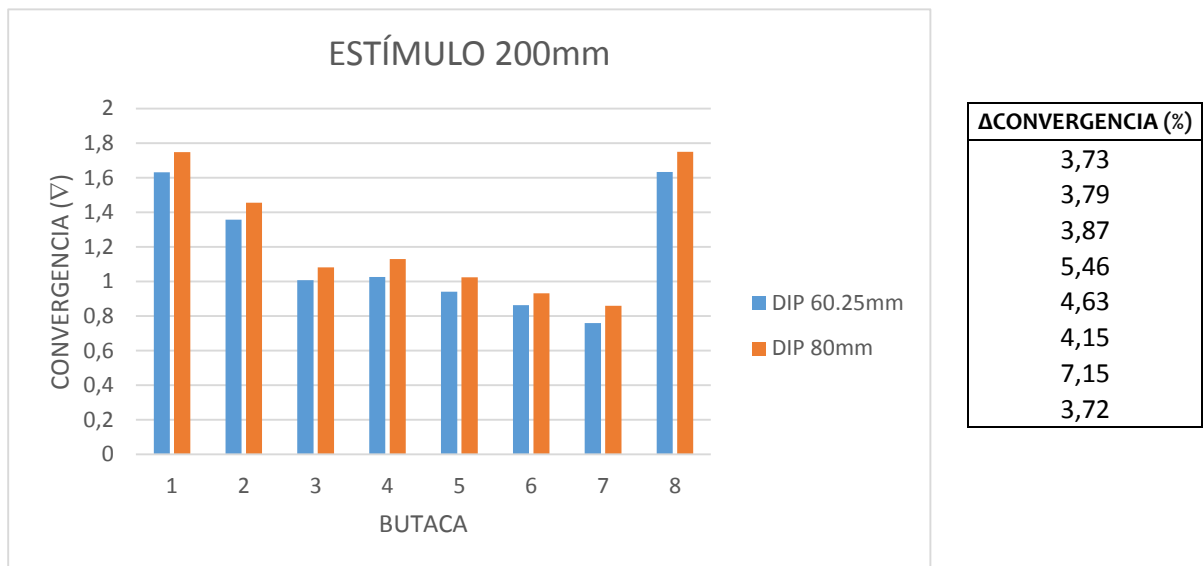


Tabla 13. Resultados para un observador con DIP 80 en las diferentes posiciones de la sala

DIP 80 mm		
CONVERGENCIA (∇)	DISTANCIA 3D (mm)	DISPARIDAD (")
1,74	3286	2635
1,46	4.819	2.182
1,08	6.964	1.609
1,13	6.405	1.456
1,02	7.319	1.424
0,93	8.197	1.352
0,86	8.941	938
1,75	3.092	2.642

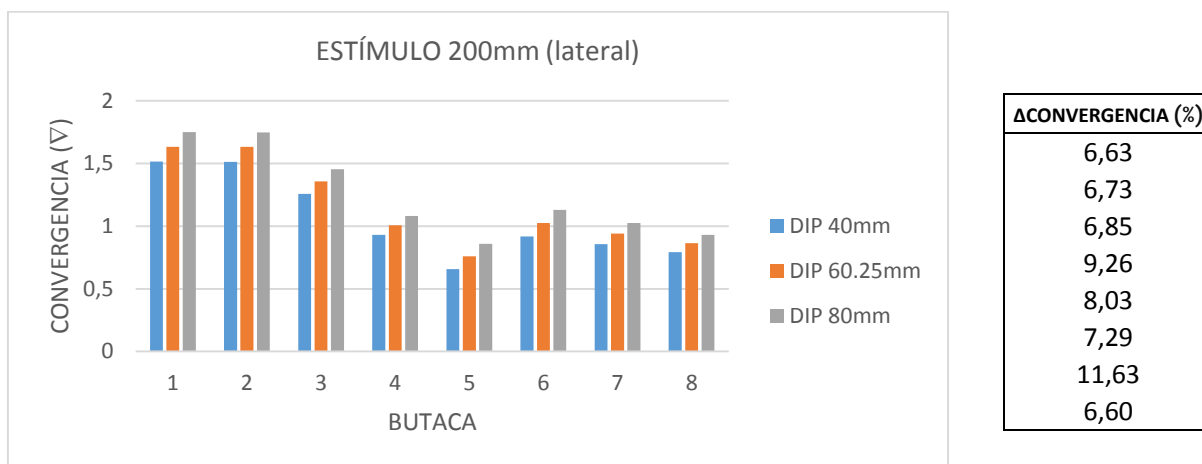
En este caso, se observa aproximadamente lo mismo. La convergencia que se requiere es del orden de un 7% superior. Esto se explica porque, al estar los ojos más separados, es preciso hacer un mayor esfuerzo de convergencia para fijar el mismo punto que un observador con una DIP de 60mm.

Las butacas más afectadas son las mismas que en el caso anterior, y la peor variación también es del orden de 0'15∇, teniendo en cuenta una DIP muy extrema, de 80mm.

Para la misma variación de la DIP, su efecto es más relevante para los casos en que las DIPs son grandes. Es decir, para una variación de 20mm de separación entre los ojos, la variación de convergencia que se produce es mayor cuando la variación es para aumentar la DIP, que no cuando es para disminuirla.

Si presentamos el mismo estímulo pero en un lateral de la pantalla, obtenemos que los resultados son prácticamente iguales. En el caso más extremo, hay una variación de un 2% respecto al supuesto anterior. De esta manera podemos concluir la DIP no es determinante para decidir dónde proyectar el estímulo.

Figura 38. Gráfico de la convergencia para un paciente con una DIP de 80mm y un estímulo lateral de 200mm



Hemos realizado las mismas suposiciones para un estímulo de mayor magnitud. En este caso la separación entre imágenes es de 1000mm. Lo que observamos en este caso, es que las variaciones de convergencia son aún mucho inferiores que cuando el estímulo era de 200mm. En lugar de un 3'7% pasan a ser de una media de 2%, y la afectación según la posición de la sala es la misma que en el anterior propósito.

Figura 39. Gráfico comparativo de la convergencia requerida por pacientes con distinta DIP para un estímulo central de 1000mm

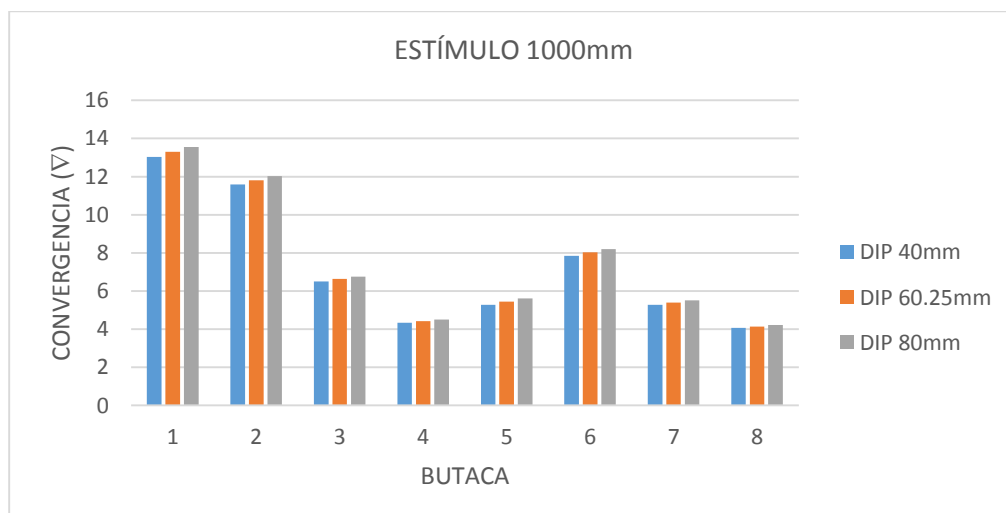
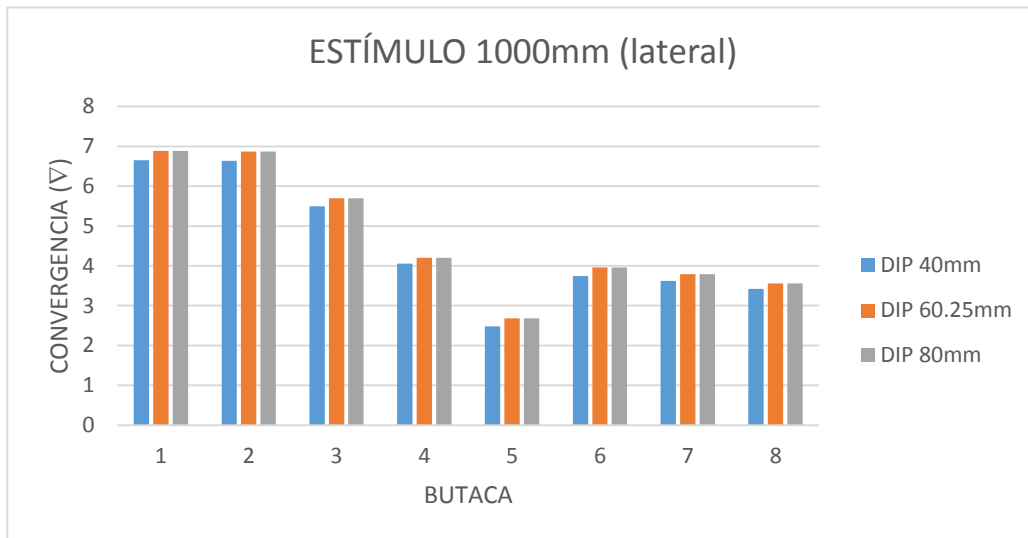
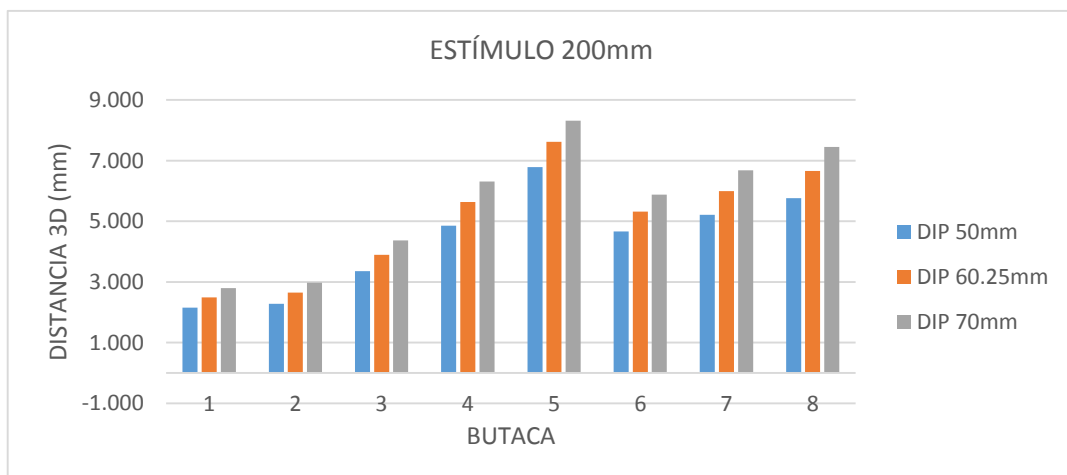


Figura 40. Gráfico comparativo de la convergencia requerida por pacientes con distinta DIP para un estímulo lateral de 1000mm



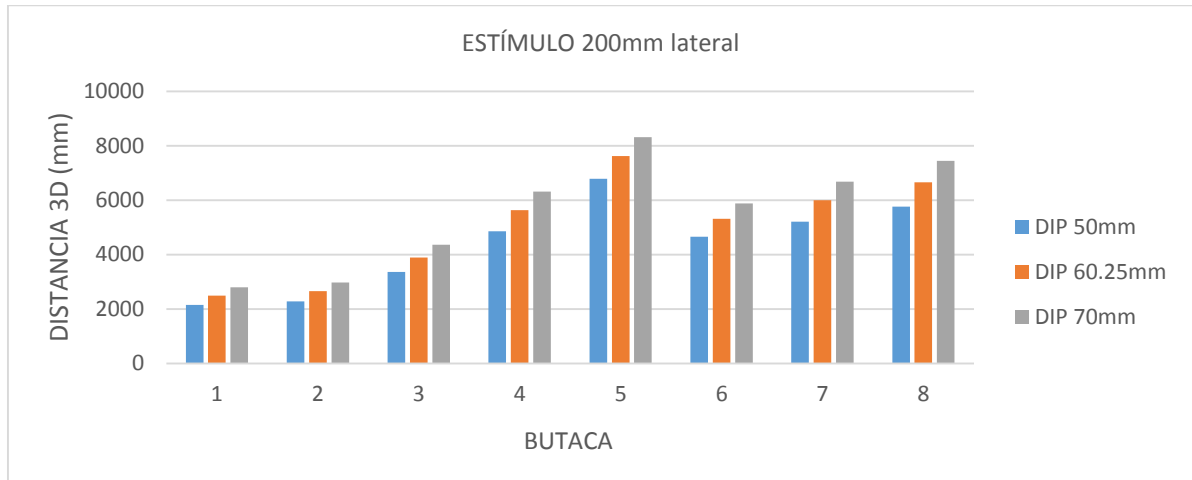
Otra de las cosas que hemos querido analizar es dónde percibe el paciente la imagen, en función de su DIP. Para ello, hemos supuesto un estímulo de 200mm, y unas DIP de 50, 60'25 y 70mm. En este caso hemos optado por unas DIP extremas pero con valores más cercanos a la realidad, porque con esta variación ya se pueden apreciar resultados. Las gráficas obtenidas son las siguientes: Para el estímulo de 200mm de separación en el centro:

Figura 41. Gráfico comparativo de la distancia a la que se percibe el estímulo por pacientes con distinta DIP para un estímulo central de 200mm



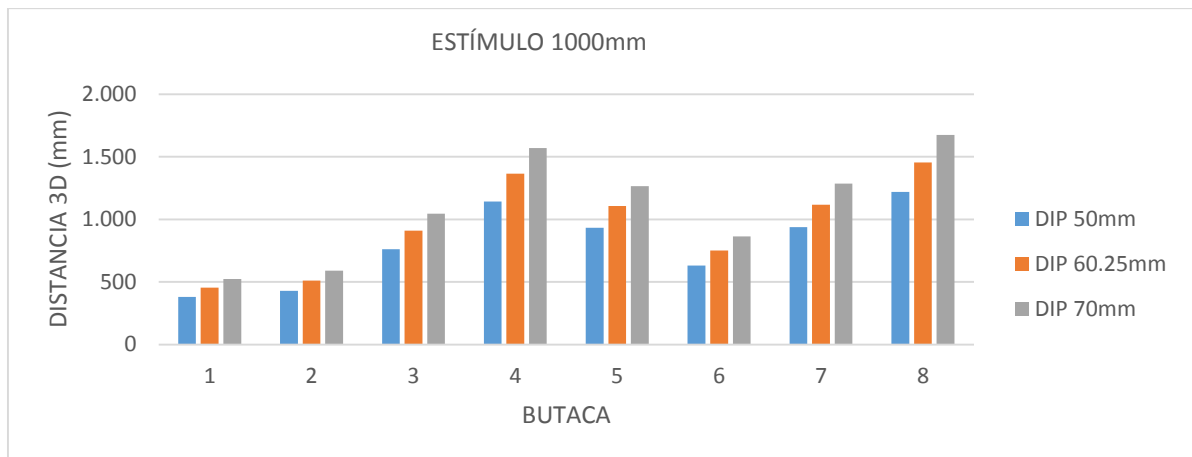
Para el estímulo de 200mm de separación en el lateral:

Figura 42. Gráfico comparativo de la distancia a la que se percibe el estímulo por pacientes con distinta DIP para un estímulo lateral de 200mm



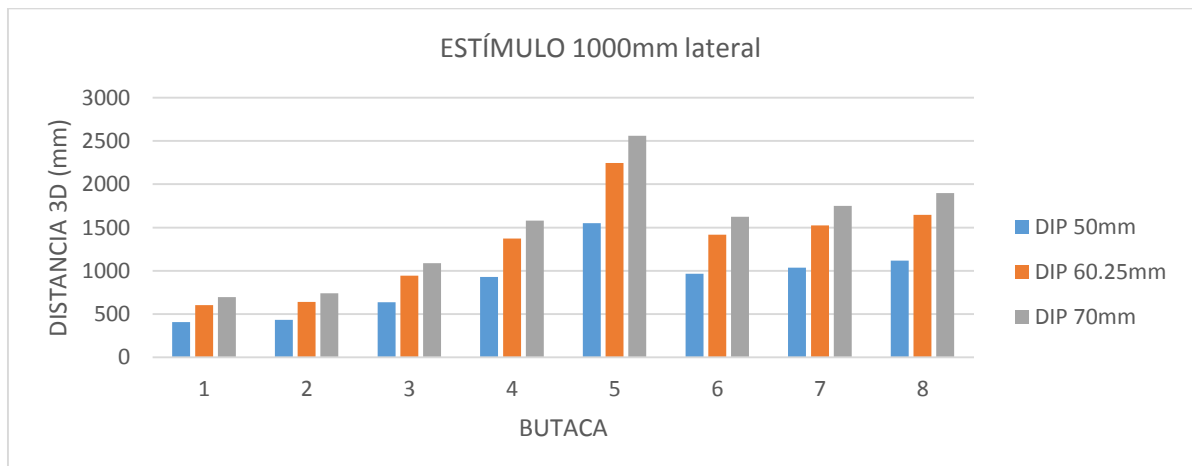
Para el estímulo de 400mm de separación en el centro:

Figura 43. Gráfico comparativo de la distancia a la que se percibe el estímulo por pacientes con distinta DIP para un estímulo central de 1000mm



Para el estímulo de 400mm de separación en el lateral:

Figura 44. Gráfico comparativo de la distancia a la que se percibe el estímulo por pacientes con distinta DIP para un estímulo lateral de 1000mm



Bien, para todas las DIPs es común que el estímulo más espectacular (que se observa más cerca) es el que se observa desde la butaca central de la primera fila. Tras éste, el que le sigue, con muy poca diferencia es el asiento central de la segunda fila. El menos espectacular es el que se sitúa en la última fila, en un lateral y le sigue la butaca central de la última fila.

También hemos comprobado que, a medida que la DIP aumenta, la distancia a la que se percibe la imagen se aleja. Para una DIP de 60,25mm un estímulo de 200mm de separación, visto desde la primera butaca central, se percibe a una distancia de 2493mm. Sin embargo, este mismo estímulo, visto desde la misma posición, se percibe a 2799mm para una DIP de 70mm. De la misma forma, para las DIP más pequeñas, el estímulo se percibe más espectacular. Cuanto menor es la DIP, más cerca se percibe el estímulo. Para una DIP de 50mm, el mismo caso anterior, percibiría la imagen a 2148mm.

En cualquier caso, hemos comprobado que además, esta variación se produce más rápidamente en el caso del aumento de la DIP que en el de disminución. Es decir, para un mismo incremento de DIP la distancia varía más en porcentaje, si se trata de un aumento de la DIP que no si se trata de una disminución.

También hemos comprobado que esta variación de la distancia a la que se percibe el estímulo, es homogénea para todas las butacas de la sala. Es decir, para una misma variación de DIP, la variación de la distancia a la que se percibe el estímulo que se produce es la misma. Del orden del 13 y 10% para los casos que nosotros hemos supuesto.

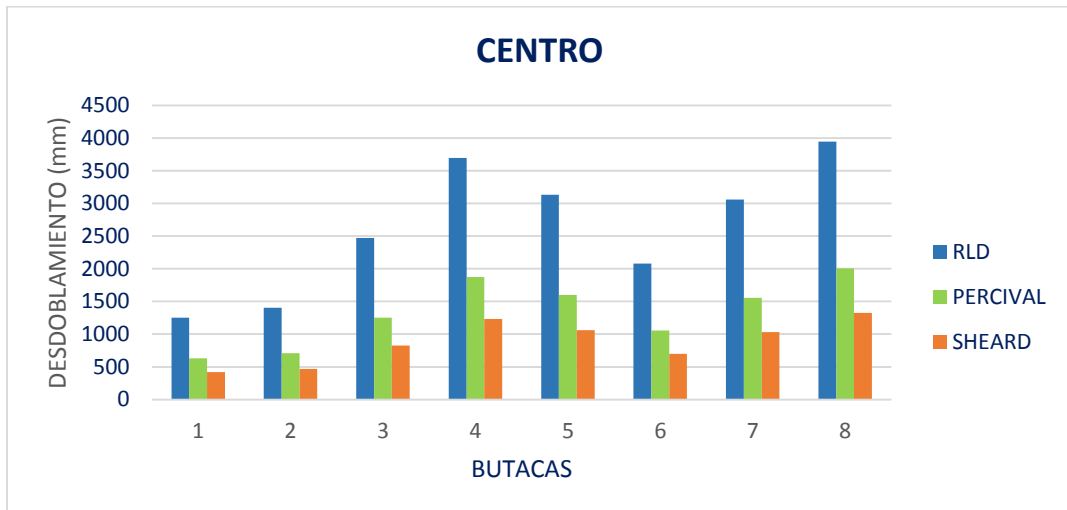
También hemos analizado qué ocurre cuando, para una misma DIP, se incrementa la distancia entre imágenes del estímulo. En todos los casos, se produce un aumento de la espectacularidad del estímulo, como era de esperar. Hemos calculado la variación de la distancia a la que se percibe el estímulo. Para absolutamente todos los casos, esta variación se mantiene muy estable. En nuestro caso, de pasar de un estímulo de 200mm de separación, a otro de 1000mm, la variación es del 75%. Este porcentaje se mantiene, para todas las butacas.

Por último, hemos supuesto un último caso, en que los estímulos se proyectan en el lateral de la pantalla. La variación afecta, como siempre, más significativamente a las butacas situadas en los laterales de las primeras filas. En general, llevarse un estímulo para uno de los dos laterales de la pantalla, supone, para las butacas centrales, y las del lado opuesto una disminución de la espectacularidad del estímulo. Para las butacas del mismo lateral en que se está proyectando el estímulo, aumenta la espectacularidad. En concreto, el observador que se sienta en la butaca lateral de la primera fila, experimenta una sensación 3D un 85% más extrema que si el estímulo se proyecta en el centro. Para la butaca lateral de la fila 9 es un 72%, y para la de la última fila un 46%.

4. variación de la separación necesaria entre las dos imágenes estereoscópicas proyectadas sobre la pantalla para generar un efecto 3D determinado.

Cada butaca contiene 3 líneas, una para la recta limitante derecha, que siempre es la más larga, por que corresponde a la convergencia máxima que puede realizar el paciente viendo simple y nítido. Después, en verde se representa el límite de la zona cómoda según Pércival, esta línea se encuentra en el centro para todos los pacientes, por el hecho de ser los pacientes exofóricos (como comentamos en el análisis de la distancia al estímulo 3D). Por último, en naranja, una última línea que representa el límite de comodidad según el criterio de Sheard.

Figura 45. Gráfico de las distancias de desdoblamiento asociadas a los límites de RLD, criterio de Sheard y Percival cuando el estímulo se proyecta en el centro de la pantalla.

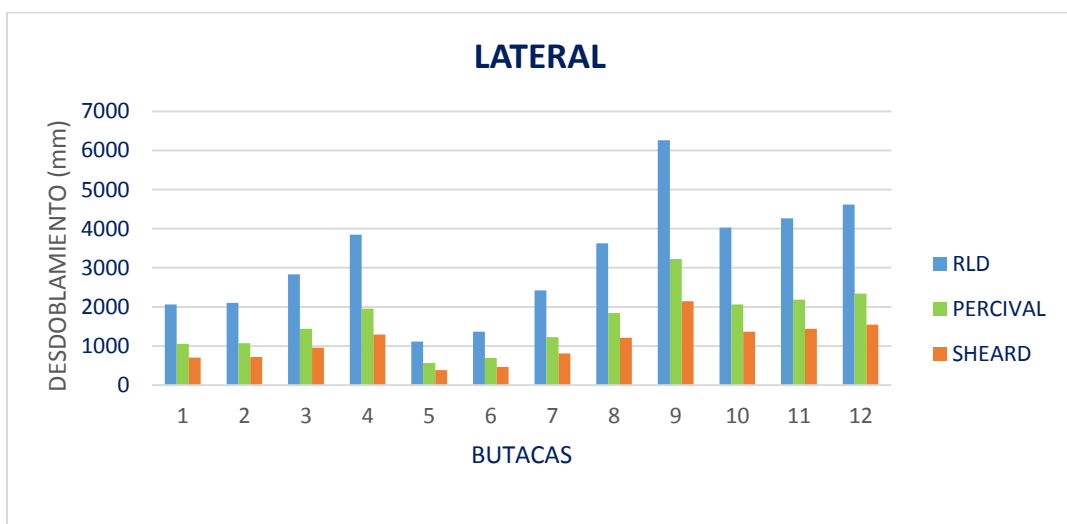


En la gráfica podemos ver que las butacas de las primeras admiten una separación menor que el resto. Esto es porque, una mayor separación entre las imágenes que forman el estímulo implican una mayor convergencia, que se añade a la convergencia que ya deben hacer las butacas de las primeras filas, sólo por el hecho de estar más cerca de la pantalla que el resto.

Llama la atención en concreto la butaca 5, que se corresponde con la posición lateral de la primera fila. Esperaríamos de esta butaca que admitiese una distancia pequeña, pero un poco superior respecto a la central. En cambio, la butaca admite una separación mayor que la de otras butacas situadas en localidades más atrás. Esto sucede porque la posición de esta butaca en concreto, está muy lateral respecto a la pantalla, y el ángulo de convergencia que se requiere es más pequeño.

Del mismo modo que en casos anteriores, hemos analizado también que sucede cuando el estímulo que se proyecta está en un lateral.

Figura 46. Gráfico de las distancias de desdoblamiento asociadas a los límites de RLD, criterio de Sheard y Percival cuando el estímulo se proyecta en un lateral de la pantalla.



En este caso el análisis es que para las butacas centrales ha aumentado el valor de desdoblamiento que pueden soportar. Al alejarse el estímulo, se requiere una mayor separación para conseguir el mismo valor de convergencia que en el caso en que el estímulo se proyectaba en el centro. Para las butacas laterales que se encuentran en el mismo lado en que se proyecta el estímulo, las distancias que soportan han disminuido, porque ahora están más cerca del estímulo. Para las butacas que se encuentran en el

otro lateral, el efecto es el opuesto, admiten mayores distancias de separación porque están más alejadas del estímulo que antes. En concreto, admiten los valores más grandes de desdoblamiento, porque son las butacas que se encuentran más alejadas del estímulo.

Hemos analizado la variación entre las butacas que dan valores más extremos para valorar si hay diferencias relevantes o no en función de la butaca que ocupa el observador. La fórmula que empleamos es la siguiente:

Fórmula 4: Cálculo de la variación de separación para las diferentes posiciones evaluadas

$$diferencia\ máxima\ (\%) = 100 \left(\frac{|separación_{máx} - separación_{mín}|}{separación_{máx}} \right)$$

En la proyección del estímulo centrado, la diferencia de separación entre imágenes que hay entre la butaca que ofrece el estímulo más espectacular y el que menos es de 68.3%, que corresponde a una distancia en milímetros de 2697mm.

Para la proyección del estímulo en un lateral, la diferencia es del 82.2%, que corresponde a unos 5144mm de diferencia, casi el doble que en el caso anterior.

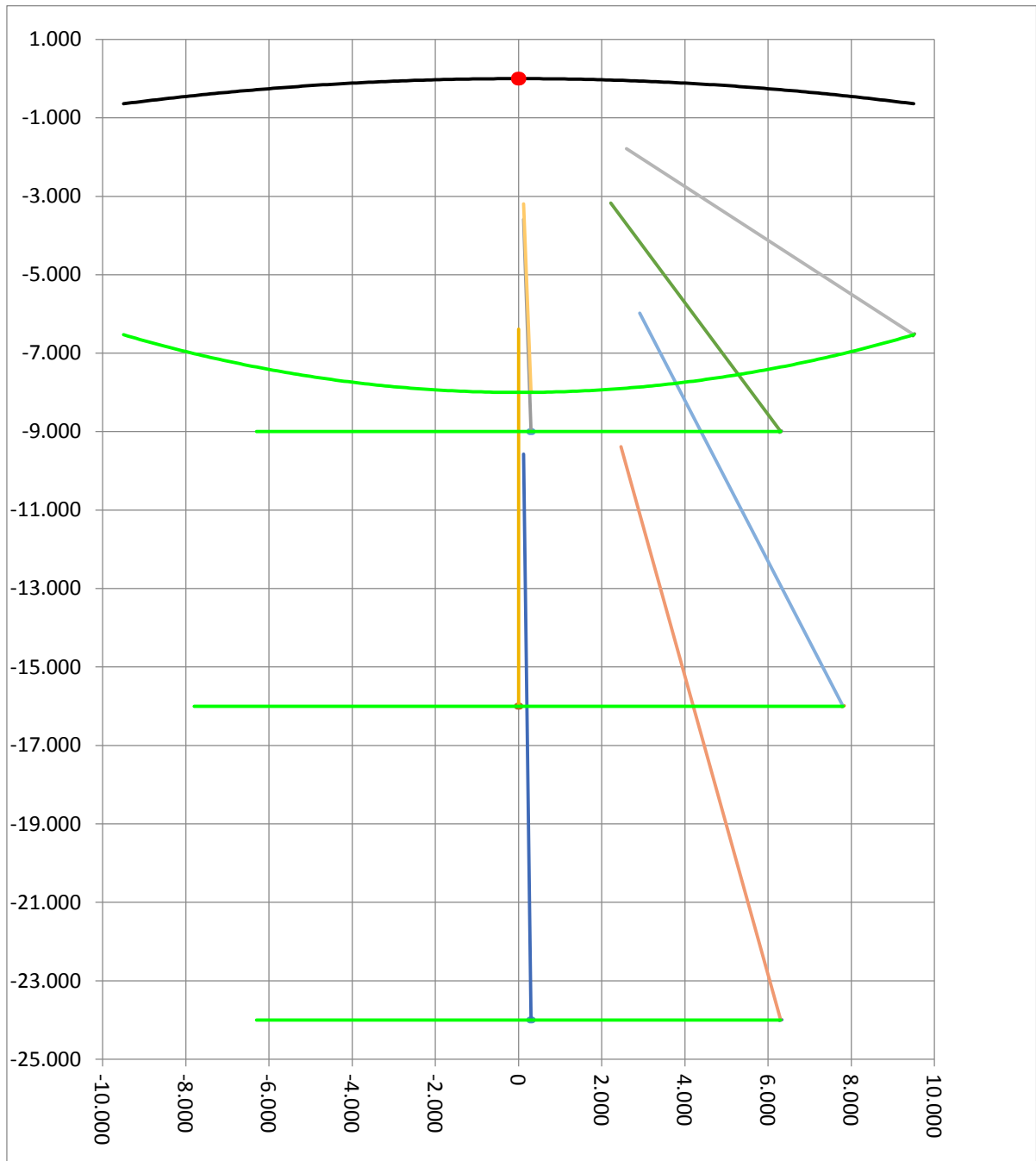
A partir de estos datos, podemos concluir que la posición del observador en la sala puede ser determinante para la experiencia 3D, sobre todo cuando los estímulos 3D que se proyectan son bastante periféricos.

5. Variación de la distancia a la que se percibe el estímulo 3D en función de la posición que ocupa el observador en la sala.

En el siguiente análisis evaluamos cómo varía la distancia a la que se percibe el estímulo 3D en función de la butaca en la que se encuentra el paciente. Hemos evaluado el comportamiento para 3 pacientes distintos, cada uno de ellos con una DIP y unos límites de la zona de visión binocular simple y nítida diferentes, pero en todos los casos el comportamiento es el mismo.

A continuación se adjuntan un par de esquemas representativos de la distancia a la que cada observador detecta el estímulo desde cada posición de la sala. Se ha tomado para el primer ejemplo un estímulo central con una distancia de desdoblamiento de 20mm. Las líneas de colores representan la distancia a la que el observador encuentra el estímulo. En el segundo ejemplo, el estímulo es central de 400mm, y el estímulo se percibe mucho más cerca, con lo que las líneas son más cortas respecto al ejemplo anterior.

Figura 47. Esquema gráfico de las distancias a las que un observador patrón percibe la imagen que genera un estímulo de 20mm de separación de desdoblamiento.



Además de la distancia a la que se percibe el estímulo, estas líneas también indican la dirección en que lo observaran. Para las posiciones centrales generalmente se encuentra de frente, y para posiciones laterales se encuentra desplazado hacia el centro de la pantalla respecto el observador.

Figura 48. Esquema gráfico de las distancias a las que un observador patrón percibe la imagen que genera un estímulo de 400mm de separación de desdoblamiento.

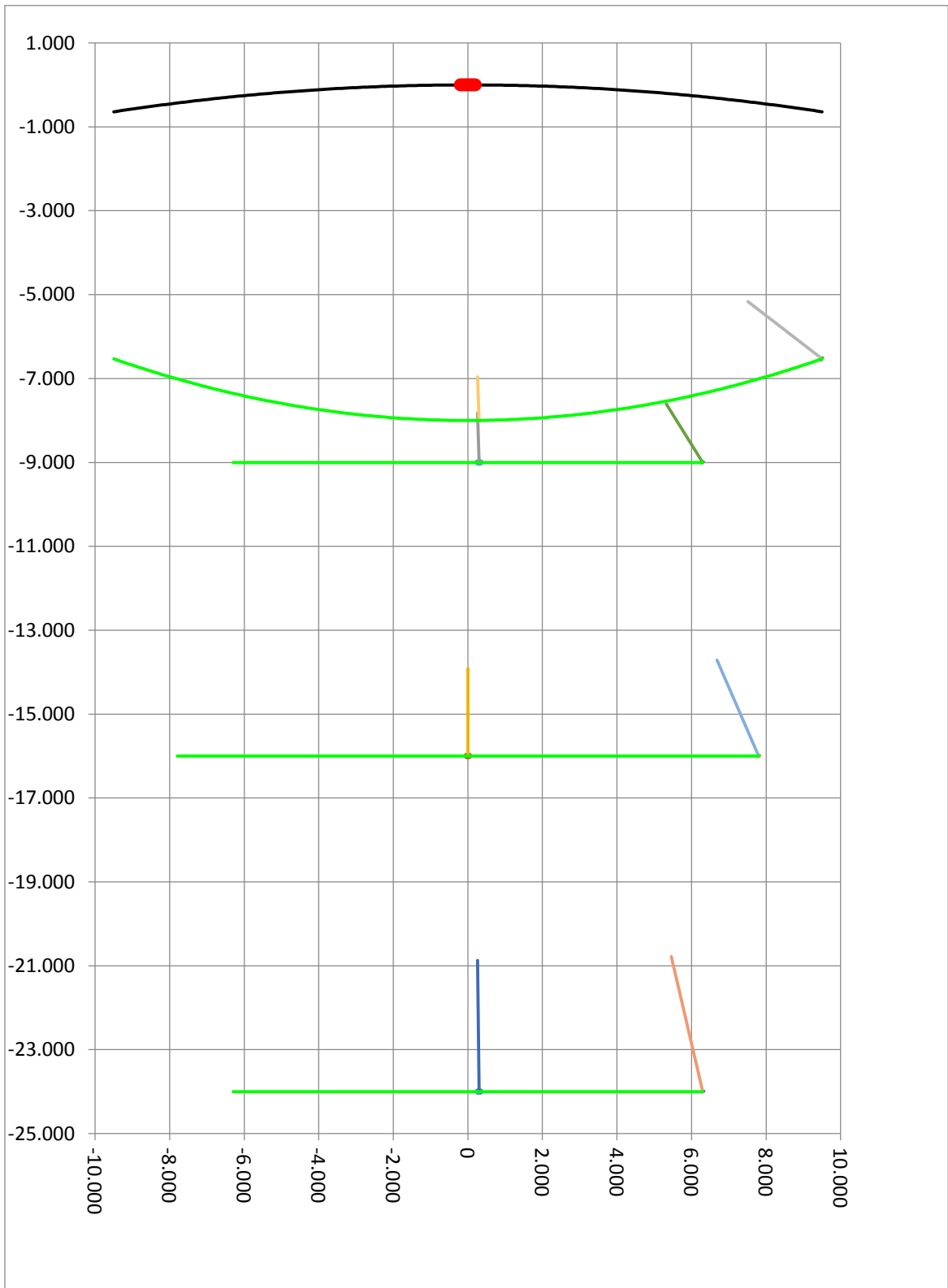
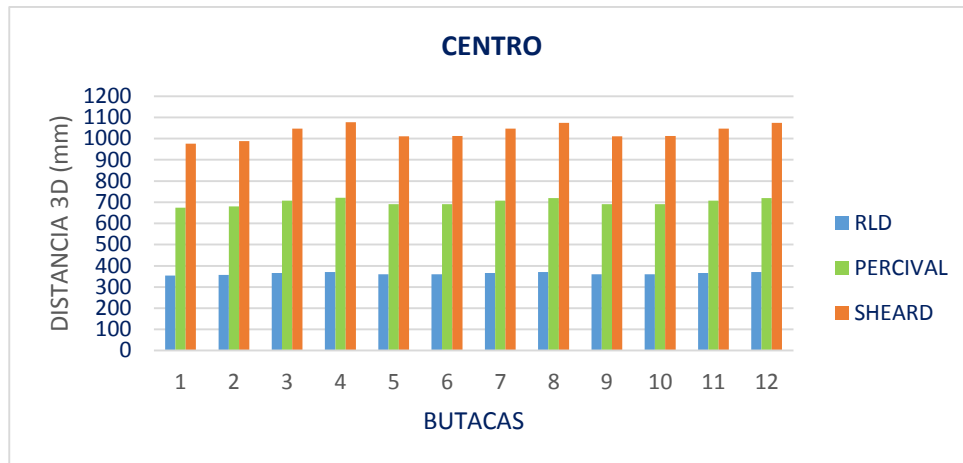


Figura 49. Gráfico de las distancias a las que un observador patrón percibe la imagen 3D para las distintas butacas cuando el estímulo se proyecta en el centro de la pantalla.

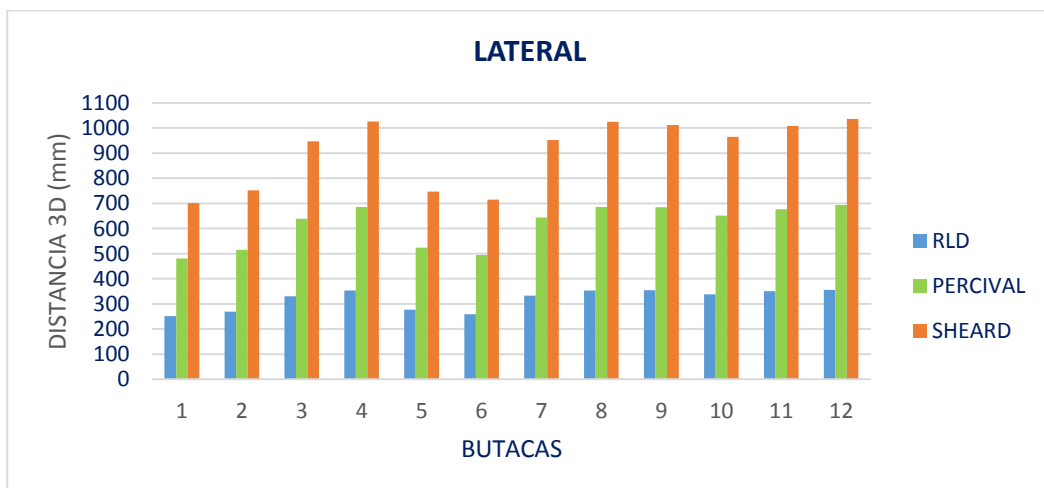


En general, observamos que la distancia a la que se percibe el estímulo 3D es muy similar para todas las butacas de la sala. Es cierto que las butacas más cercanas a la pantalla, (la 1,2 5 y 6) perciben el estímulo un poco más cerca que el resto, pero no hay un gran cambio respecto el resto de butacas. La conclusión clara que podemos extraer de este gráfico es que, cuando los estímulos se proyectan en el centro de la pantalla, la posición del observador en la sala no es determinante. Sea cual sea la posición de la butaca, el estímulo percibido por el observador será prácticamente el mismo. Las tres barras de cada butaca representan la distancia a la que se percibe el estímulo según si nos encontramos sobre la Recta Limitante Derecha o la comodidad según Pécival o Sheard, respectivamente. Obviamente, el valor de la RLD es la mínima distancia a la que el observador puede ver el estímulo sin perder la nitidez ni la fusión, por ello es el valor más pequeño en todas las butacas. Lo mismo ocurre para Pécival y Sheard, que son la mínima distancia en la que el observador puede ver el estímulo en comodidad.

En nuestro caso concreto, para todos los pacientes, el criterio de Pécival otorga a los observadores una mayor zona de comodidad en cuanto a convergencia. Esto ocurre, porque los pacientes que hemos evaluado son todos exofóricos por lo que el área de comodidad se ve desplazado hacia la derecha, de las bases temporales. Pécival considera que el área de comodidad es el tercio central de toda la ZVBSN, mientras que Sheard considera que es 1/3 a cada lado de la recta de las forias.

De la misma forma, hemos realizado el análisis para un estímulo representado en el centro de la pantalla y en los laterales.

Figura 50. Gráfico de las distancias a las que un observador patrón percibe la imagen 3D para las distintas butacas cuando el estímulo se proyecta en el lateral de la pantalla.



Para el estímulo que se proyecta en el lateral, podemos decir que en general, para las butacas de la primera y segunda fila, el estímulo se percibe más cerca que para el resto de butacas de la sala. Hay poca variación respecto al estímulo que perciben los observadores sentados en la zona media o fondo de la sala, pero la sensación es que cuanto más al fondo de la sala, menos impresionante se percibe el estímulo 3D. Otro de los efectos que podemos observar es que, dentro de la misma fila, la posición central o lateral afecta poco a la distancia a la que se percibe el estímulo.

VI. CONCLUSIONES

- El requerimiento de convergencia está ligado a la posición relativa entre la butaca que ocupa el observador y la distancia hasta el estímulo proyectado en la pantalla. Cuanto menor es la distancia entre el observador y el estímulo, mayor es el requerimiento de convergencia.
- La acomodación también está relacionada con la distancia relativa entre la posición del observador y el estímulo. Cuanto más cerca del estímulo se sitúa la butaca, mayor es el requerimiento acomodativo. En la práctica, en proyecciones 3D las variaciones acomodativas no son significativas, puesto que consideramos que en todo momento nos encontramos en visión lejana, por lo que la acomodación adquiere siempre valores cercanos a cero.
- Variar la posición del estímulo en la pantalla repercute sobre la convergencia requerida, las butacas para las que el cambio represente una menor distancia hasta el estímulo, se produce un aumento de la demanda de convergencia respecto la situación inicial y viceversa.
- Un aumento en la distancia de desdoblamiento entre imágenes requiere un aumento del esfuerzo de convergencia que varía bastante en función de la posición de la sala en que se encuentra el observador. Esta variación produce más diferencias entre las butacas cuando la posición del estímulo es lateral.
- Las variaciones en la DIP del observador afectan ligeramente al requerimiento de convergencia. Una DIP más pequeña requiere menor esfuerzo de convergencia para fijar un mismo punto que una DIP mayor y viceversa.
- La variación de la DIP es más crítica para posiciones en las que el estímulo se encuentra relativamente cerca del observador. Para las butacas a media distancia y lejanas, la variación menor.
- A medida que la DIP aumenta, la distancia a la que se percibe la imagen se aleja. Es decir, los observadores con DIPs grandes perciben menor espectacularidad en las imágenes 3D que otros observadores con una DIP más pequeña.
- Respecto del observador patrón, para un mismo incremento de DIP la distancia a la que se percibe el estímulo varía más (en porcentaje) si se trata de un aumento de la DIP que no si se trata de una disminución.
- Un incremento de la distancia de desdoblamiento entre imágenes produce un aumento de la espectacularidad del estímulo similar para todas las posiciones analizadas.
- Para posiciones del estímulo en un lateral respecto de la butaca se toleran distancias de separación entre imágenes más grandes que si se proyectara frente a la butaca.
- Para un determinado estímulo y observador, la distancia a la que se percibe el estímulo 3D es muy similar para todas las butacas de la sala cuando éste se proyecta en el centro. Las butacas más cercanas a la pantalla perciben el estímulo un poco más cerca que el resto, pero no hay un gran cambio respecto el resto de butacas. Cuando los estímulos se proyectan en el lateral de la pantalla, hay una mayor diferencia dependiendo de la posición del observador en la sala.
- En nuestro caso concreto, para todos los pacientes, el criterio de Pércival otorga a los observadores una mayor zona de comodidad en cuanto a convergencia. Esto ocurre, porque los pacientes que hemos evaluado son todos exofóricos por lo que el área de comodidad se ve desplazado hacia la derecha, de las bases temporales.

V.II BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- [1] GALÁN TERRAZA, Alicia; VISA NASARRE, Josep. *Diplopía: Manual práctico con vídeos demostrativos*. Barcelona: Editorial Glosa, S.L., 2005 ISBN: 8474292581, 9788474292589
- [2] MARTÍNEZ VERDÚ, Francisco M.; PONS MORENO, Álvaro M.. *Fundamentos de visión binocular*. Valencia: Universitat de València, 2004. ISBN: 8437059186, 9788437059181
- [3] PRICE Roland K.; VOJINOVI, Zoran. *Urban Hydroinformatics: Data, Models, and Decision Support for Integrated. (Una foto de perspectiva aerea)*. London: IWA Publishing, 2011. ISBN: 978-1780401362
- [4] FURLAN, Walter D.; GARCÍA MONREAL, Javier; MUÑOZ ESCRIVÁ, Laura. *Fundamentos de optometría, 2a ed.: Refracción ocular*. Valencia: Universitat de València, 2011. ISBN: 8437082870
- [5] PUELL MARIN, M^aCinta. *Óptica fisiológica. El sistema óptico del ojo y la visión binocular*. Madrid: Editorial Complutense, 2006. ISBN: 9788474918298 8474918294 9788474918298
- [6] ALONSO CAVIEDES, Santiago; COLLADO HORNILLOS, Jose A.; GÓMEZ DACASA Antonio. *Oftalmología II*. Cantabria: Editorial Universidad de Cantabria, 1992. ISBN: 8487412475 9788487412479
- [7] MONTÉS MICÓ, Robert. *Optometría. Principios básicos y aplicación clínica*. Editorial Elsevier España, 2011. ISBN: 8480865512 9788480865517

ARTÍCULOS

- [8] PIRODDI, Roberta. "Stereoscopic 3D Technologies" *Snell* p.1-10. 2010
- [9] SHIBATA, Takashi; KIM, Joohwan; HOFFMAN, David M.;BANKS, Martin S. "The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays", *Journal of Vision* 11(8):11, p. 1-29. 2011
- [10] HOFFMAN, David M.; GIRSHICK, Ahna R.; AKELEY, Kurt; BANKS, Martin S. "Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue" *Journal of Vision* 8(3):33, p.1-30. 2008
- [11] DALY, Scoot J.; HOFFMAN, David M. "Perceptual Issues in Stereoscopic Signal Processing" *IEEE transactions on broadcasting*, VOL. 57 / 2, p.1 -15. 2011
- [12] VAN DE GRIND, Wim A.; ERKELENS, Casper J.; LAAN Alfons C.; "Binocular correspondence and visual direction" VOL. 24 p. 215-235. 1995
- [13] SRIVASTAVA, Abhishek K.; de DOUGENET de la TOCNAYE, J. L.; DUPONT, Laurent. "Liquid Crystal Active Glasses for 3D Cinema" *journal of display technology*, VOL. 6 / 10, p.1-9. 2010
- [14] MACKENZIE, Kevin J.; HOFFMAN, David M.; WATT, Simon J. "Accommodation to multiple-focal-plane displays: Implications for improving stereoscopic displays and for accommodation control" *Journal of Vision* 10(8):22, p.1-20. 2010.
- [15] HOFFMAN, David M.; BANKS, Martin S. "Focus information is used to interpret binocular images" *Journal of Vision* 10(5):13, p.1-17. 2010.
- [16] WOODS, Andrew J.; ROURKE, Tegan. "Ghosting in Anaglyphic Stereoscopic Images" *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, VOL. 5291. p. 1-12. 2004
- [17] LÓPEZ, José M.; FERNÁNDEZ, Antonio; FERNÁNDEZ, Miguel A. "Conceptos y Técnicas de Estereovisión por Computador" *Revista Inteligencia Artificial* Vol.9 nº27. 2005