



UNIVERSIDAD DE LAS CIENCIAS INFORMÁTICAS  
CENTRO DE INFORMÁTICA INDUSTRIAL

# SISTEMA DE VISUALIZACIÓN ESTEREOSCÓPICA PARA EL ANÁLISIS DE FUNCIONES VISUALES

Tesis en opción al título de Máster en Informática Aplicada

**Autor: Ing. Liudmila Pupo Peña**

**Tutor: Dr. Santiago Martín  
González**

**Co-tutor: MSc. Yanoski Camacho  
Román**

La Habana, febrero de 2011

A mis padres, a mi hermano

a mi querida familia...

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA

Yo, Liudmila Pupo Peña, con carné de identidad 84090419697, declaro que soy la autora principal del resultado que expongo en la presente memoria titulada **Sistema de visualización estereoscópica para el análisis de funciones visuales**, para optar por el título de Máster en Informática Aplicada.

Este trabajo fue desarrollado durante el período 2009-2010 en colaboración con mis colegas de equipo de trabajo, quienes me reconocen como la autora principal del resultado expuesto en esta memoria.

Finalmente declaro que todo lo anteriormente expuesto se ajusta a la verdad, y asumo la responsabilidad moral y jurídica que pueda derivarse de este juramento profesional.

Y para que así conste, firmo la presente declaración jurada de autoría en La Habana a los \_\_ días del mes de febrero del año 2011.

-----

Ing. Liudmila Pupo Peña

## AGRADECIMIENTOS

En especial deseo agradecer a mis tutores Santiago y Yanoski por su amistad y contribución en mi formación como máster.

A Rudny por su preocupación y ayuda infinita en estos tiempos.

A todos mis profesores y amigos de la Facultad 5, quienes también contribuyeron a mi crecimiento profesional y humano en general.

A todos ellos, así como a otros amigos que no he mencionado por no cometer el error de olvidar alguno, les doy las más sinceras gracias.

## Resumen.

La Realidad Virtual y Visualización Estereoscópica se han destacado recientemente como medios prometedores para la presentación visual. Con estas técnicas es posible brindar información gráfica controlada, separada y diferente para cada ojo. En esta investigación se propone un nuevo enfoque de utilización de estas técnicas en la oftalmología. A partir del estudio realizado se ha delimitado que las funciones visuales de dominancia ocular, visión binocular y agudeza visual pueden ser analizadas con estas técnicas de visualización estereoscópica.

Se propone la utilización de la herramienta *Graphics Library for Stereoscopic Vision* (GLS<sub>Ve</sub>) para ser usada en este nuevo campo de aplicación. GLS<sub>Ve</sub> es una biblioteca de código abierto, desarrollada por el proyecto HDS<sub>Ve</sub>, implementada en C# y basada en OpenGL. Las imágenes izquierda y derecha que perciben los ojos, desde puntos de vista diferentes, se proyectan en una pantalla, y con técnicas estereoscópicas es posible que cada ojo perciba solo la imagen que le corresponde. Se incorporaron funcionalidades a esta biblioteca que le dan versatilidad y permiten el rápido desarrollo de actividades para el análisis de las funciones visuales. Se han desarrollado actividades que permiten validar el correcto funcionamiento de la biblioteca para el análisis de estas funciones visuales.

La utilización de esta propuesta puede representar un medio alternativo para complementar y en algunos casos mejorar los procedimientos médicos convencionales para medir y/o entrenar las funciones visuales de interés.

Según los estudios realizados, la técnica de visión paralela utilizando un visor de espejos como dispositivo de visualización es una solución adecuada para ser usada en las aplicaciones definidas.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Estructura del documento</b>	<b>4</b>
<b>2. Desarrollo</b>	<b>6</b>
2.1. Visualización Estereoscópica . . . . .	6
2.1.1. Elementos geométricos . . . . .	7
2.1.2. Sistemas estereoscópicos . . . . .	9
2.1.3. Valoración de las técnicas estereoscópicas . . . . .	13
2.2. Una breve revisión de las funciones visuales . . . . .	14
2.2.1. Visión binocular . . . . .	16
2.2.2. Dominancia ocular . . . . .	21
2.2.3. Agudeza Visual . . . . .	22
2.2.4. Enfermedades asociadas al trastorno de las funciones visuales . . . . .	22
2.3. Trabajos relacionados . . . . .	23
2.3.1. Incorporación de la visualización estereoscópica en las aplicaciones gráficas . . . . .	24
2.3.2. Utilización de las técnicas estereoscópicas en la oftalmología . . . . .	26
2.4. Descripción del problema . . . . .	29
2.4.1. Justificación de utilización de un software . . . . .	29
2.4.2. Funcionalidades necesarias . . . . .	33
2.5. Soluciones técnicas . . . . .	34
2.5.1. <i>Graphics Library for Stereoscopic Vision (GLSVe)</i> . . . . .	34
2.5.2. Funcionalidades incorporadas a GLSVe . . . . .	36
2.5.3. Actividades prototípicas . . . . .	43
2.5.4. Discusiones finales . . . . .	46
<b>3. Conclusiones</b>	<b>48</b>

4. Recomendaciones	49
5. Publicaciones derivadas	50
Referencias bibliográficas	51
A. Glosario de términos	56
B. Acrónimos	59

## Índice de figuras

1.	Proyecciones cónicas estereoscópicas . . . . .	7
2.	Concepto de paralaje . . . . .	8
3.	Perspectiva de cámaras estereoscópicas . . . . .	9
4.	Representación de las principales técnicas estereoscópicas . . . . .	13
5.	Visión Estereoscópica . . . . .	17
6.	Geometría de la estereopsis . . . . .	18
7.	Relación entre la disparidad geométrica y retinal . . . . .	19
8.	Relación entre el observador y la pantalla . . . . .	38
9.	Configuración del dispositivo de espejos y la pantalla . . . . .	43
10.	Diseño conceptual de la biblioteca GLSVe . . . . .	44

## Índice de tablas

1. Comparación de las principales técnicas estereoscópicas existentes . . . . . 15
2. Trabajos relacionados con el análisis de las funciones visuales . . . . . 30

## 1. Introducción

La visión estereoscópica (VE) constituye la fuente elemental de percepción de profundidad en los humanos. Es una señal binocular, producto de la posibilidad de que cada ojo perciba una escena diferente debido a la ligera separación entre ellos [Coon, 2005]. Es la principal responsable de que percibamos la distancia a la que estamos de los objetos que nos rodean.

La simulación de la VE por computadora (denominada visualización estereoscópica), puede ser utilizada en beneficio de varios campos de aplicación: Realidad Virtual (RV), visualización científica (física, médica, etc.), entretenimiento, apreciación de espacios arquitectónicos, Diseño Asistido por Computadora (*CAD*, del inglés *Computer Aided Design*) (CAD) [Bailey and Clark, 1998, McAllister, 1993]. La percepción de imágenes estereoscópicas facilita a los usuarios de estas aplicaciones la comprensión espacial de las escenas en tres dimensiones (3D).

El proyecto Herramientas de Desarrollo para Sistemas de Visión Estereoscópica (HDSVE)<sup>1</sup> cuenta con una herramienta nombrada *Graphics Library for Stereoscopic Vision engine* (GLSVE), una biblioteca estructurada en clases que permite la VE de los contenidos de forma fácil e intuitiva, cumpliendo las normas que rigen la estereoscopía y abstrayendo al programador final de todos sus elementos geométricos. Esta biblioteca ha sido desarrollada en C# utilizando la biblioteca gráfica OpenGL.

GLSVE ha sido utilizada anteriormente en el desarrollo del producto Visage, un sistema que permite la visualización y restitución mediante técnicas de visión estereoscópica de pares de fotografías aéreas, enfocada al campo de la cartografía geológica. Por las características de la biblioteca se avizoró también su uso en estudios de la visión humana, específicamente en el análisis de funciones visuales.

Las funciones visuales son las capacidades del Sistema Visual Humano (*HVS*, del inglés *Human Visual System*) (HVS) de interpretar la información y el entorno, de los

---

<sup>1</sup>El proyecto HDSVE lo conformaban inicialmente un grupo de profesores de la Universidad de Oviedo, como parte de un convenio de colaboración se ha comenzado a trabajar en un conjunto con la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI).

efectos de la luz visible que llega al ojo. La información sensorial que llega al ojo es transformada para producir experiencias de profundidad, tamaño, forma, orientación, color [Bruce et al., 2003]. La clasificación de las funciones visuales es diversa, entre ellas sobresalen agudeza visual, convergencia, visión binocular, sensibilidad al contraste, dominancia ocular, entre otras.

Estas funciones visuales pueden ser medidas con pruebas clínicas estandarizadas de la vista [Corliss and Bailey, 2002] y algunos estudios presentados en [Polat, 2009, Pambakian et al., 2004] corroboran que después de un entrenamiento puede ser mejorado su funcionamiento.

En los procedimientos convencionales para medir o entrenar las funciones visuales, la presentación visual es pobre y los datos de la ejecución de las tareas por parte del paciente no son recogidos automáticamente para ser procesados. Existen factores que afectan el resultado final de la prueba como la facilidad de comprensión y el aprendizaje. Además algunos tratamientos son incómodos (como el parche sobre el ojo bueno en la ambliopía), o no son completamente efectivos (el parche no entrena la visión binocular y sí la agudeza visual).

Por los inconvenientes planteados se avizora el uso de los sistemas informáticos para complementar y algunos casos mejorar la evaluación y entrenamiento de las funciones visuales. Específicamente la utilización de las técnicas de VE y RV, como medios prometedores para la presentación visual de estos contenidos. Con el empleo de estas técnicas, es posible simular un entorno tridimensional respetando las leyes de la perspectiva y la geometría estereoscópica, establecidas ya en 1838 por Charles Wheatstone [Silverman, 1993], y es posible transmitir información gráfica separada, controlada y diferente para cada ojo.

Por la novedad del tema, su aplicación en el campo de la medicina y los resultados obtenidos en beneficio de la salud humana, se ha comenzado a investigar la utilización de los sistemas estereoscópicos en esta nueva área de aplicación<sup>2</sup>. Se pretende usar para ello la biblioteca GLS<sub>Ve</sub> antes mencionada.

---

<sup>2</sup>Para esta nueva línea de investigación colaboran médicos oftalmólogos del Hospital de Arriondas (España) y el Hospital Pando Ferrer (Cuba).

GLS<sub>Ve</sub> había sido creada anteriormente con propósitos más generales y en su concepción inicial poseía algunas deficiencias en su diseño, todavía no tenía incorporadas algunas funcionalidades, ya sea porque eran básicas y no estaban implementadas en la versión hasta esa fecha o porque eran necesarias incorporar para asumir el desarrollo de aplicaciones en este campo.

Se plantea entonces el siguiente **problema de investigación**: ¿Cómo utilizar las técnicas de visualización estereoscópica, incorporadas en la biblioteca GLS<sub>Ve</sub>, en el análisis de las funciones visuales?

El **objeto** sobre el que se enfoca este estudio, tanto desde el punto de vista teórico como práctico, con vistas a solucionar el problema planteado consiste en las técnicas de visualización estereoscópica. El **campo de acción** es las técnicas de visualización estereoscópica aplicadas al análisis de las funciones visuales.

Con el propósito de brindarle una solución efectiva al problema, se plantea como **objetivo general** desarrollar las funcionalidades para la biblioteca GLS<sub>Ve</sub> que permitan emplear las técnicas de VE en el análisis de las funciones visuales.

Para darle cumplimiento al objetivo se han concebido las siguientes tareas:

- Constatar las técnicas y tecnologías utilizadas para la simulación de la VE por computadora.
- Seleccionar las funciones visuales que pueden ser analizadas utilizando las técnicas VE, identificando sus principales características, métodos convencionales de evaluación y entrenamiento.
- Evidenciar la utilización de la VE y RV en análisis de las funciones visuales de interés.
- Identificar las funcionalidades necesarias para permitir analizar las funciones visuales de interés mediante técnicas de VE.
- Adaptar la biblioteca GLS<sub>Ve</sub> para usar las técnicas de VE y RV en el análisis de las funciones visuales.

- Elaborar un sistema de actividades prototípicas que permitan validar el correcto funcionamiento de la biblioteca GLSVe para estos nuevos propósitos.

Como resultado de estas tareas, se espera adaptar la biblioteca GLSVe según las funcionalidades necesarias, brindando información gráfica controlada, separada y diferente para cada ojo. Esto permitirá contar con una herramienta para construir nuevas aplicaciones en beneficio de un reciente campo de aplicación: la oftalmología. Específicamente en estudios sobre percepción visual, dando la posibilidad de hacer estudios relacionados con la evaluación o entrenamiento de las funciones visuales. El uso de estas nuevas tecnologías cobra importancia como una forma alternativa a los métodos convencionales y en algunos casos se espera mejore estos métodos. Se aprovechará así, el uso de la computadora como un medio potente para la presentación y gestión de la información y los recursos.

La principal contribución del presente trabajo consiste en la propuesta de un nuevo enfoque de utilización de las técnicas de RV y VE en el análisis de funciones visuales. A partir del estudio realizado se han delimitado las funciones visuales que pueden ser analizadas con las técnicas de VE. Se incorporan seis funcionalidades en la biblioteca GLSVe que permiten el análisis de las tres funciones visuales de interés. Se han desarrollado actividades que permiten validar el correcto funcionamiento de la biblioteca para el análisis de estas funciones visuales.

Se han seleccionado un conjunto de métodos de investigación que establecen la forma de abordar el problema planteado. Los métodos teóricos de Análisis, Síntesis, Deducción e Inducción permiten identificar cómo la utilización de las técnicas de VE y RV puede incidir en el análisis de las funciones visuales de interés. A partir de los métodos Históricos y Lógicos se analizan las principales investigaciones desarrolladas en el tema en los últimos años. La Modelación permite presentar la propuesta de solución al problema planteado. Finalmente los métodos empíricos de Medición y Observación garantizan la validación de la propuesta de solución.

## Estructura del documento

El presente documento se encuentra estructurado en **Introducción**, **Desarrollo**, **Conclusiones** y **Recomendaciones**. Los tres primeros epígrafes del desarrollo constituyen el **Marco Teórico** de la investigación y se han agrupado de la siguiente forma:

En **Visualización Estereoscópica** se enuncian los elementos a tener en cuenta para la simulación de la VE por computadora, los sistemas estereoscópicos existentes, así como los formatos, técnicas y dispositivos usados en estos sistemas.

En **Una breve revisión de las funciones visuales** se presentan los conceptos básicos asociados a las funciones visuales, describiendo brevemente las técnicas tradicionales para medirlas o entrenarlas.

En **Trabajos relacionados** se exponen las principales alternativas o herramientas que se han desarrollado a nivel mundial para aplicaciones que incorporan VE y se describen las investigaciones constatadas que se orientan hacia el estudio de las funciones visuales.

En el epígrafe **Descripción del problema** se refiere inicialmente dónde fallan las técnicas tradicionales o por qué un sistema informático las mejora o complementa. Se definen las funcionalidades necesarias para para que un sistema informático de visualización estereoscópica pueda ser utilizado en el análisis de la funciones visuales.

En **Soluciones técnicas** se presenta la biblioteca GLS<sub>Ve</sub>, herramienta seleccionada para su utilización en este nuevo campo de aplicación. Se describen las adaptaciones realizadas a GLS<sub>Ve</sub>, evidenciando el cumplimiento de cada una de las funcionalidades que debe cumplir para ser usada en el análisis de las funciones visuales. Se presentan las actividades realizadas que permiten validar su correcto funcionamiento.

Finalmente se presentan los **Conclusiones y recomendaciones** obtenidas en la investigación.

## 2. Desarrollo

A continuación se presenta el desarrollo de cada uno de los epígrafes realizados en el transcurso de la investigación y se recogen los principales conceptos, trabajos y soluciones relacionados con el problema de investigación.

### 2.1. Visualización Estereoscópica

Se define como visualización estereoscópica a la simulación por computadora de la visión estereoscópica, para producir una mejor percepción de profundidad en las aplicaciones gráficas.

Cuando se utiliza una aplicación gráfica tradicional, ambos ojos están observando en una pantalla la misma imagen de una representación 3D producida a través de una única proyección cónica [Pfautz, 2002]. Aunque esta representación puede contener la mayoría de las señales de profundidad [Corporation, 1997], está ausente la más importante de ellas: la visión estereoscópica. Esta **limitación** dificulta tres elementos importantes: la inmersión de los usuarios en los entornos simulados, la interacción con los objetos a partir de una mejor percepción de profundidad y la posibilidad de contar con información gráfica separada para cada ojo.

Dotar de visualización estereoscópica a un sistema tiene muchas implicaciones tanto en el dispositivo de visualización como en el programa informático a utilizar. El programa informático tiene que ser capaz de mostrar al mismo tiempo una imagen diferente para cada ojo, con las características geométricas exigidas y el dispositivo de visualización tiene que ser capaz de que cada imagen llegue solo al ojo que le corresponde.

En este epígrafe se enuncian en este epígrafe los elementos a tener en cuenta para la simulación de la VE por computadora, los sistemas estereoscópicos existentes, las técnicas, formatos y dispositivos empleados en estos sistemas.

### 2.1.1. Elementos geométricos

Brindar el par de imágenes necesarias para lograr la visualización estereoscópica, requiere tener en cuenta las características geométricas exigidas. Desde el punto de vista gráfico, la principal diferencia entre las proyecciones estereoscópicas y las monoscópicas es que la escena se observa desde dos puntos de vista [Southard, 1992], que serían las posiciones de dos cámaras en la escena virtual. Estos puntos, que se denominarán  $V_i$  (ojo izquierdo) y  $V_d$  (ojo derecho), están separados entre sí a una distancia determinada, llamada  $d$  (distancia intraocular o interpupilar). En el caso de querer reproducir la visión humana, esta distancia sería de seis centímetros aproximadamente.

El resultado, en términos geométricos, son dos proyecciones cónicas monoscópicas, obtenidas para cada punto de vista  $V_i$  y  $V_d$ , que tendrán en común el plano de proyección  $\Pi$  y la ventana de visualización. La figura 1 muestra la interpretación geométrica de la situación anterior, donde  $V_o$  es la posición del observador (punto medio entre  $V_i$  y  $V_d$ ).

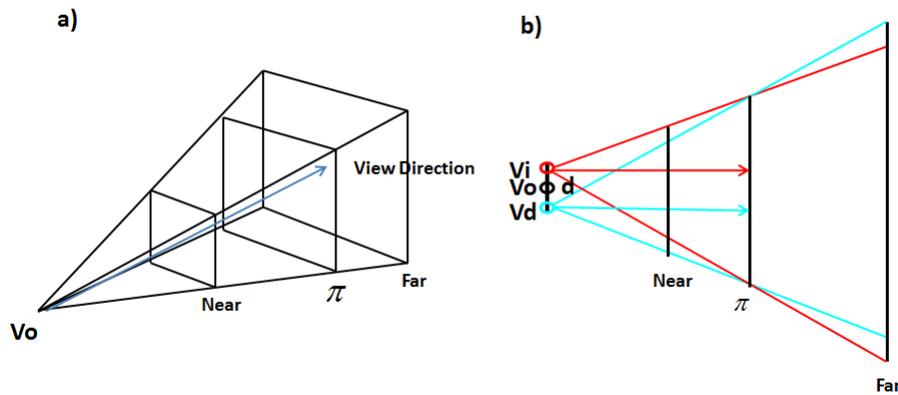


Figura 1: Vista perspectiva: (a) proyección cónica monoscópica, (b) proyección cónica estereoscópica (vista superior)

La distancia horizontal de las proyecciones del ojo izquierdo y derecho sobre el plano de proyección, es llamada paralaje horizontal. Obsérvese en la figura 2 que, dependiendo de la distancia de un punto  $P$ , al plano de proyección  $\Pi$  se presentan cuatro situaciones en la posición relativa entre  $P_i$  y  $P_d$  (proyecciones de  $P$  desde el ojo izquierdo y derecho respectivamente): paralaje negativo, paralaje cero, paralaje positivo y paralaje positivo

máximo, igual a la distancia intraocular  $d$ .

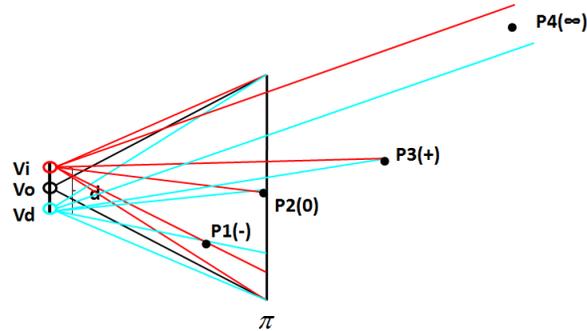


Figura 2: Concepto de paralaje

De forma análoga, se llamará paralaje vertical a la distancia vertical de las proyecciones para el ojo izquierdo y el derecho sobre el plano de proyección [Zambrano, 2008].

En la representación anterior se ha supuesto que la ventana es simétrica respecto a la visual de  $V_o$  trazada desde esa posición. Pero hay dos formas de ajustar las cámaras virtuales (Toe-In y Off-Axis) para representar un par estereoscópico a partir de los dos puntos de vista  $V_i$  y  $V_d$ , ver figura 3. En [Bourke, 1999] aparece una detallada explicación de cómo generar los pares estereoscópicos deseados.

En el método Toe-In [Zambrano, 2008] se considera que las cámaras están fijas, tienen una separación simétrica y apuntan al mismo punto de enfoque. En este caso, se generan problemas con la paralaje vertical, que causa incomodidad al mostrar las imágenes de una escena. La paralaje vertical se incrementa conforme aumenta la apertura de las cámaras.

El método Off-Axis es el más conveniente. No introduce paralaje vertical, la ventana no es simétrica ni para la visual desde  $V_i$  ni desde  $V_d$ , por lo que se requiere un tronco asimétrico de pirámide de la cámara.

Los volúmenes de visualización de  $V_i$  y  $V_d$  están formados por los seis planos que definen los límites de la cámara: cercano, lejano, izquierdo, derecho, arriba y abajo. Estos volúmenes deben ser asimétricos respecto a la dirección de la visual. Por último se realiza la proyección sobre la ventana de visualización.

En la Memoria Colectiva en su Capítulo 2 se detalla como sería la implementación de

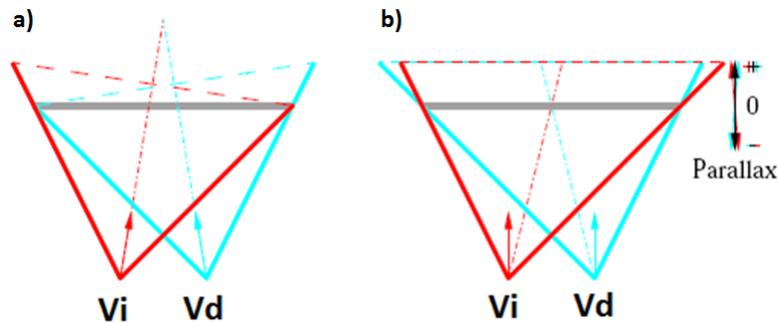


Figura 3: Perspectiva de cámaras estereoscópicas: (a) aproximación método “Toe-in”, (b) método “Off-Axis”, tronco asimétrico de la cámara [Stegmaier et al., 2002]

estos elementos haciendo uso de la biblioteca gráfica `OpenGL`.

### 2.1.2. Sistemas estereoscópicos

Después de haber analizado los elementos a tener en cuenta para la representación geométrica de la escena, faltaría definir cómo lograr la representación de las dos imágenes sobre el monitor con las características exigidas por el dispositivo de visualización.

Para que cada ojo perciba la imagen que le corresponde se puede utilizar lo mismo un sistema estereoscópico **activo** que **pasivo** [García, 2008]. En ambos casos el usuario debe llevar unas gafas o dispositivos especiales, pero la diferencia radica en que en el primero de ellos las gafas necesitan componentes electrónicos.

En estos sistemas se pueden utilizar en estos sistemas diferentes formatos estereoscópicos que definen de qué forma se representan las imágenes izquierda y derecha simultáneamente. Los formatos se pueden clasificar:

Basados en color:

- Anaglifo
- Infitec

Basados en líneas y columnas:

- Entrelazado vertical
- Entrelazado horizontal

Basados en *frame*:

- *Alternated images*
- *Above and below*
- *Side by side*
- *Quad buffering*

En el Capítulo 1 de la Memoria Colectiva se brinda el pseudocódigo necesario para implementar cada uno de estos formatos.

Dentro de los sistemas de representación **pasivos** se encuentran las técnicas de visión paralela, cruzada, anaglifo, polarización e infitec [Lipton, 1997]. A continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas:

**Visión paralela:** es el primer y más primitivo sistema de visualización. En este caso, el observador debe centrar su atención en un punto en el infinito manteniendo los ejes de visión paralelos. Las fotos que conforman el par estereográfico son montadas una junto a otra. El formato de representación de la imagen para usar en una computadora es el *side by side*. Se envían ambas imágenes a la vez, una junto a otra, tomando la máxima resolución que admita la tarjeta de video. La mitad izquierda del monitor recibe la imagen izquierda y la mitad derecha la imagen derecha. La tarjeta sufre poco, únicamente por la resolución que se le exija. Si se utilizan dos monitores configurados en escritorio extendido (para tarjetas gráficas con salida dual) se puede apreciar una escena en cada uno. Emplear un solo monitor tiene el inconveniente de que se pierde la mitad de la resolución horizontal. El visor puede ser un dispositivo de espejos o un visor de Holmes, aquí se incluyen lentes para acomodar la vista, o lentes refractivos para la acomodación y la convergencia.

**Visión cruzada:** Las fotos deben ser montadas una junto a otra pero invertidas, la izquierda para el ojo derecho y la derecha para el ojo izquierdo. El formato de representación es similar al *side by side*, la única diferencia es que en este caso se intercambian

las imágenes para cada vista. Las imágenes se pueden separar más de 6 cm, pero entonces hay que concentrarse en un punto fuera de pantalla y bizquear, y no se utilizan de lentes.

**Anaglifo:** Se basa en volcar las dos imágenes al buffer de visualización de la tarjeta de video aplicando previamente un filtro de color a cada una. Las imágenes son representadas superpuestas y se utilizan tonos complementarios de colores del RGB(R-GB, G-RB, B-RG). La imagen izquierda aparecerá teñida con color rojo, por ejemplo, mientras que la derecha en cian, el color complementario. El observador debe utilizar unas gafas con los filtros de color correspondientes. El resultado puede ser una imagen en color o en tonos de escala de gris. El formato utilizado, como su nombre lo indica, es el anaglifo.

**Polarización:** se basa en el fenómeno físico de polarización de la luz, las dos imágenes son proyectadas mediante sendos dispositivos dotados de filtros polarizadores, girados 90° uno respecto al otro o polarizados de forma circular. La pantalla debe conservar la polarización de la luz reflejada. El observador debe utilizar unas gafas con lentes polarizados de forma congruente con los proyectores. El sistema de polarización no altera los colores, aunque hay una cierta pérdida de luminosidad. Se utiliza tanto en proyección de cine 3D, como en monitores de ordenador mediante pantallas de polarización alternativa. El formato de representación es el *side by side*, enviando una imagen a cada proyector.

**Infitec:** es una novedosa técnica basada en los filtros de interferencia (*Interference filter technologie*). En este caso, las imágenes para el ojo izquierdo y derecho con los colores básicos se proyectan en diferentes longitudes de onda (multiplexación por longitud de onda). Para la proyección, en el mismo proyector se inserta un disco de cristal con un filtro que gira de manera sincronizada con la proyección de los fotogramas de manera que cada parte del disco filtre su fotograma correspondiente. La separación de las imágenes proyectadas entre los canales se hace con un par de gafas que tiene filtros selectivos de interferencia para cada ojo con la adecuada longitud de onda [[Jorke and Fritz, 2005](#)].

El sistema de representación **activo** se caracteriza por tener demandas específicas del hardware y la tecnología del proyector [[García, 2008](#)], la técnica usada en esta caso se denomina obturación. En este caso, las dos imágenes son mostradas por un monitor de forma alternativa y con una frecuencia de refresco suficiente. El observador debe utilizar

unas gafas que se conectan externamente a la tarjeta gráfica, estas gafas están dotadas de dos Lentes de Cristal Líquido (*LCD*, del inglés *Liquid Crystal Display*) (*LCD*) que se oscurecen alternativamente de forma sincronizada con el monitor. En dependencia de la tecnología con la que se cuente se utilizan diferentes formatos para mostrar las imágenes utilizando esta técnica.

En el entrelazado vertical/horizontal se lanzan las escenas derecha e izquierda a la vez, reduciendo la resolución a la mitad en vertical u horizontal según el modo escogido, pues las filas impares representan una escena y las pares la otra. Se pierde resolución vertical u horizontal pero se puede trabajar sobre ordenadores sencillos.

En los formatos *side by side* y *above and below*, se lanzan las imágenes una al lado de otra y arriba y abajo, respectivamente.

En *alternated images* se presentan las imágenes derecha e izquierda una detrás de otra alternativamente, coincidiendo con el refresco de pantalla. La tarjeta de video tiene que trabajar a su máximo rendimiento y, si la escena es complicada, puede perderse el sincronismo. Este formato es útil cuando la tarjeta de video responde a modelos básicos, con soporte estereoscópico pero no del tipo *quad buffers*.

En *quad buffers* se dispone de *buffers* independientes para las imágenes derecha e izquierda, lo cual permite generar ambas imágenes simultáneamente. Existen dos *buffers* *Front Left* y *Front Right* para visualizar el par estereoscópico durante todo el tiempo que la aplicación tarda en dibujar el siguiente *frame* en los *buffers* *Back Left* y *Back Right*. Se debe tener una tarjeta de video que responde a modelos de gama alta, con soporte estereoscópico, del tipo *Quad buffers*. La tarjeta de video de forma autónoma envía alternativamente las imágenes al monitor sincronizadas con el refrescamiento de la pantalla.

Además de los sistemas antes mencionados, existen otros dispositivos que permiten al usuario percibir la imagen estereoscópica, son los Cascos de Realidad Virtual (*HMD*, del inglés *Head Mounted Display*) (*HMD*) y los monitores lenticulares o auto-estereoscópicos [García, 2008].

### 2.1.3. Valoración de las técnicas estereoscópicas

La técnica de proyección estereoscópica activa produce excelentes efectos y generalmente es usada en ambientes de RV profesionales por su alto costo, por ejemplo, las Cuevas de Realidad Virtual (*CAVE*, del inglés *Computer-Animated Virtual Environment*) (*CAVE*). Una alternativa para ello son las técnicas pasivas, que tienen un montaje menos costoso y pueden ser empleadas por un mayor número de interesados. En la figura 4 se ofrece una representación visual de las técnicas descritas.

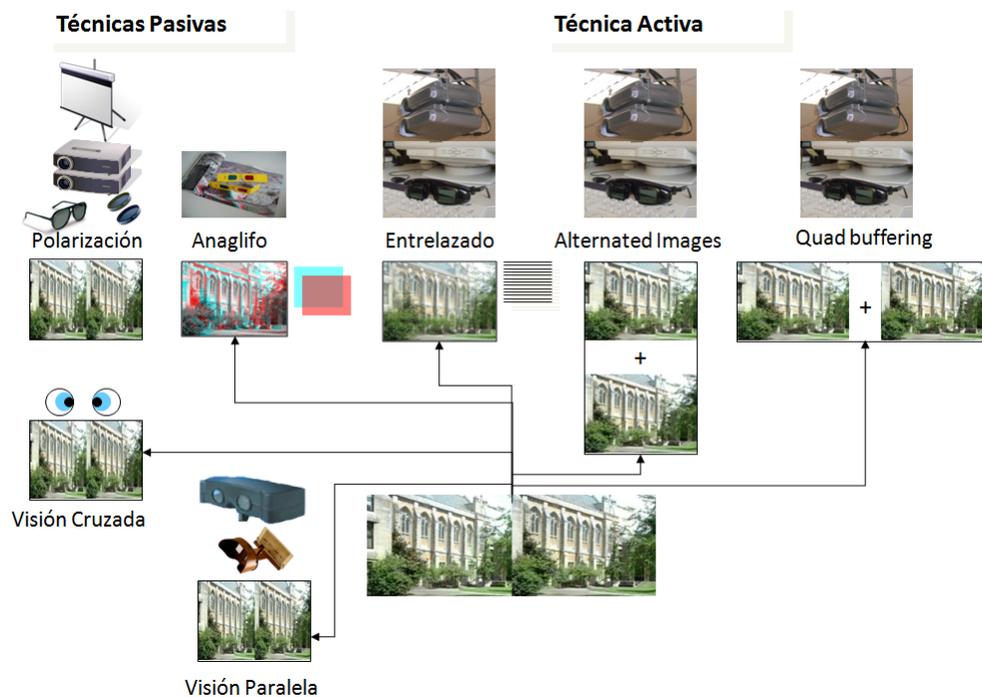


Figura 4: Representación de las principales técnicas estereoscópicas

La técnica de anaglifo es muy fácil de reproducir sin equipamiento especial y puede visualizarse en un monitor de computadora o un proyector sin utilizar una computadora con prestaciones especiales. Esta técnica es muy usada en publicaciones y en el cine. Por otra parte, al emplear filtros de colores se puede producir una pérdida de los tonos originales de la imagen, obstáculo ante el cual se puede utilizar como alternativa trabajar solo en escala de grises, aunque esto tiene el riesgo de que se pierde realismo en la escena,

se manifiesta pérdida de luminosidad, suele aparecer el fenómeno de imagen fantasma y después de un uso prolongado puede producir demasiada fatiga al observador.

Un mejor efecto estereoscópico que el anterior se logra con la polarización. En este caso las gafas son de muy bajo costo y no hay pérdida de colores en la imagen final, aunque tiene como principal inconveniente el uso de proyectores y una pantalla que permita conservar la polarización de la luz, o en el caso de monitores, la necesidad de usar una pantalla de polarización alternativa.

Una opción más económica y de muy buenos efectos es la de visión paralela usando un visor de espejos, la imagen final es de muy buena calidad con la ausencia total de imagen fantasma. El inconveniente de esta técnica para la mayoría de las aplicaciones es que por las características del dispositivo requiere mantener al observador a una distancia fija de la pantalla.

En el caso de la técnica infitec, su fundamentación ha sido muy reciente y no es ampliamente utilizada como las anteriores, está patentada y hay que pagar para su uso, con ella se logran muy buenos efectos y se usa mayormente para la proyección en cines.

En la tabla 1 se muestra un resumen comparativo de todos los elementos mencionados. La clasificación en la literatura científica es diversa, lo cual provoca que los conceptos de sistema de representación, técnica y formato de representación se empleen indistintamente por los diferentes autores, es por ello que, para realizar la presente investigación se ha adoptado la clasificación como se muestra en la tabla, que es a la cual se hará referencia en todo el documento.

## **2.2. Una breve revisión de las funciones visuales**

Después de haber analizado los elementos a tener en cuenta para lograr la visualización estereoscópica, se detallan a continuación las funciones visuales que pueden ser analizadas con estas técnicas informáticas. Se presentan aquí algunos temas básicos asociados a las funciones visuales que permiten comprender e identificar sus principales características. Se incluye una breve descripción de las técnicas tradicionales para medir o entrenar las

Técnica	Dispositivo	Formato de representación	Calidad de la imagen	Ergonomía	Costo
Visión Paralela	Visor de espejos o visor de Holmes	<i>Side by side</i>	Buena	Regular	Barato
Anaglifo	Gafas de separación cromática	Anaglifo	Perdida de color, imagen fantasma	Regular	Barato
Polarización	Gafas con filtros polarizados, pantalla de material especial, dos proyectores y filtros polarizados	<i>Side by side</i>	Perdida de luminosidad	Buena	Moderado
Infitec	Gafas con filtros espectrales de interferencia, discos de cristal giratorios para los proyectores	Infitec	Buena	Buena	Caro
Obturación	Gafas de obturación y monitores especiales conectados entre sí	<i>Side by side</i> <i>Above and below</i> Entrelazado vertical u horizontal <i>Alternated Images</i> <i>Quad buffering</i>	Buena	Buena	Caro

Tabla 1: Comparación de las principales técnicas estereoscópicas existentes

funciones visuales de interés.

El HVS agrupa todos los elementos necesarios para lograr el sentido de la vista. La percepción visual es la capacidad de interpretar la información y el entorno de los efectos de la luz visible que llega al ojo [Bruce et al., 2003]. A estas capacidades del HVS se les denomina funciones visuales. La información sensorial que llega al ojo es transformada para producir experiencias de profundidad, tamaño, forma, orientación, color, etc. La clasificación de las funciones visuales es diversa, entre ellas sobresalen: agudeza visual, campo visual, discriminación de color, adaptación a la oscuridad, sensibilidad al contraste, visión monocular, binocular y dominancia ocular [Koenig and Holbrook, 2000, Corn and Koenig, 1996].

Estas funciones visuales pueden medirse con pruebas clínicas estandarizadas de la vista [Corliss and Bailey, 2002] y a la vez puede mejorarse su funcionamiento después de un entrenamiento, lo cual ha sido corroborado por diversos estudios, algunos de ellos son recogidos en [Polat, 2009, Pambakian et al., 2004].

Esta investigación enmarca su interés en las funciones visuales: visión binocular, dominancia ocular y agudeza visual. Se han determinado estas funciones visuales y no otras por las posibilidades que pueden ofrecer las técnicas informáticas de VE en la medida o entrenamiento de ellas, teniendo en cuenta la posibilidad de presentar información gráfica separada, diferente y controlada para cada ojo. A continuación se definen brevemente estas funciones visuales y los métodos tradicionales utilizados para medirlas o entrenarlas que hemos tenido en cuenta para el desarrollo de la presente investigación.

### 2.2.1. Visión binocular

La visión binocular permite percibir el mundo desde diferentes puntos de vista, debido a que se tiene una separación de alrededor de seis centímetros entre los dos ojos, lo que se conoce como disparidad retinal [Howard and Rogers, 1995]. Esta diferencia se interpreta como una medida de la profundidad, ver la figura 5<sup>3</sup> y es la fuente elemental de percepción de profundidad [Coon, 2005]. La visión binocular se puede dividir en tres etapas, según

---

<sup>3</sup>Imagen seleccionada de: Vision 3D, What is Stereo Vision? <http://www.vision3d.com/stereo.html>

clasificación de Worth en el año 1900 [Borrás et al., 1998]:

1. Percepción simultánea o fusión motora: es la capacidad de mirar exactamente al mismo sitio con los dos ojos, producto del movimiento hacia adentro de los dos globos oculares para que sus ejes visuales se junten en el objeto que se mira. Esta primera etapa también es conocida como convergencia.
2. Fusión sensorial: el cerebro “funde” las dos imágenes en una sola. Por tanto, para una buena parte de lo que vemos, los objetos los percibimos a través de dos sitios diferentes.
3. Estereopsis: se aprecia la tridimensionalidad de los objetos, es la consecuencia de una buena fusión sensorial.

La visión binocular también es conocida como visión estereoscópica o vista tridimensional.

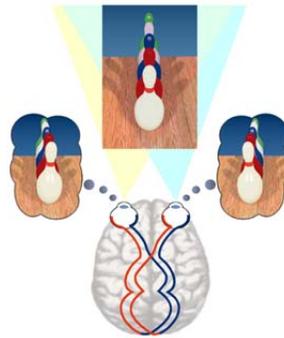


Figura 5: Visión Estereoscópica

La visión estereoscópica es el principal mecanismo de percepción de la posición relativa de los objetos en el espacio, pero no es el único. Generalmente los mecanismos de visión de profundidad se pueden clasificar en señales no fisiológicas y monoculares: superposición, perspectiva, sombras, paralaje por movimiento, tamaño relativo, etc. Se encuentran también las fisiológicas: acomodación, convergencia y estereopsis, las dos últimas binoculares y explicadas anteriormente. En [Corporation, 1997] se pueden consultar las señales existentes y sus características.

### Geometría de la estereopsis

Cuando dos objetos (A y F) son localizados a diferentes distancias, el ángulo de vergencia es diferente para cada uno de ellos. El intervalo de profundidad entre ellos puede ser cuantificado como una distancia lineal ( $\Delta D$ ), pero usualmente se expresa como una diferencia angular. La disparidad geométrica ( $\eta$ ) es la diferencia entre los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , como se muestra en la figura 6, donde PD es la distancia interpupilar [Schwartz, 2004].

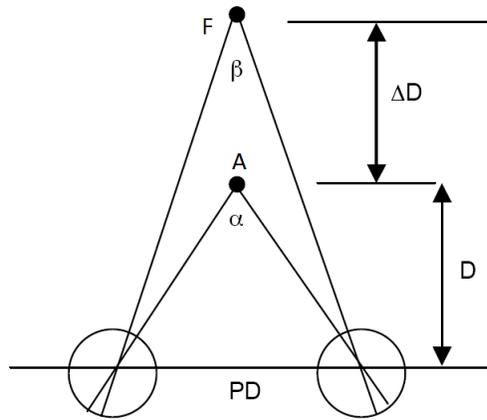


Figura 6: Geometría de la estereopsis

Esta disparidad angular (siendo los ángulos pequeños) se puede calcular usando la siguiente fórmula [Salmon, 2010]:

$$\begin{aligned}\angle\alpha &= \frac{PD}{D} & \angle\beta &= \frac{PD}{D + \Delta D} \\ \eta &= \angle\alpha - \angle\beta \\ \therefore \eta &= \frac{PD}{D} - \frac{PD}{D + \Delta D} = \frac{PD(D + \Delta D) - PD(D)}{D(D + \Delta D)} \\ \eta &= \frac{PD(D) + PD(\Delta D) - PD(D)}{D(D + \Delta D)} \\ \eta &= \frac{PD(\Delta D)}{D^2 + D(\Delta D)}\end{aligned}\tag{1}$$

La fórmula 1 permite calcular la disparidad en radianes (si PD, D y  $\Delta D$  están en la misma unidad). Para tener este resultado en segundos de arco, que es la unidad normalmente usada para la disparidad estereoscópica, se utilizará la siguiente fórmula 2:

$$\eta = \left| \frac{PD(\Delta D)}{D^2 + D(\Delta D)} \right| \frac{180 * 3600}{\Pi} \quad (2)$$

Se ha calculado la disparidad en el espacio objeto, teniendo en cuenta que la disparidad retinal total es igual a la disparidad geométrica, como se muestra en la 7.

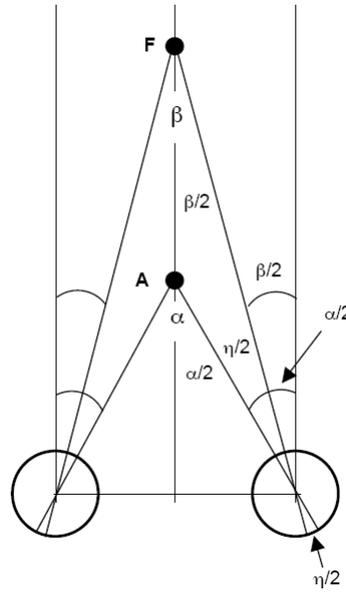


Figura 7: Relación entre la disparidad geométrica y retinal

Teniendo en cuenta que:

$$\eta = \alpha - \beta \quad (3)$$

Para el ojo derecho:

$$\eta/2 = \alpha/2 - \beta/2 \quad (4)$$

La misma geometría puede ser aplicada al ojo izquierdo y se obtendrá:

$$\eta = \eta/2 + \eta/2 \quad (5)$$

La disparidad geométrica causada por los objetos, causa disparidad retinal. La disparidad retinal es el estímulo que permite la percepción de profundidad estereoscópica.

### **Estereoagudeza o agudeza visual estereoscópica (AVE)**

La estereoagudeza es la mínima diferencia de distancias en que dos objetos son percibidos en posiciones diferentes, expresado en unidades angulares. La mínima disparidad binocular que somos capaces de percibir viene dada entonces por:

$$AVE = \left| \frac{PD(\Delta D_{min})}{D^2 + D(\Delta D_{min})} \right| \frac{180 * 3600}{\Pi} \quad (6)$$

La estereoagudeza corresponde al mejor nivel posible de las funciones binoculares [Peñalba, 2010]. Constatar el nivel de estereoagudeza esperado para la edad es un dato muy interesante, pues indica un desarrollo normal de las funciones sensoriales y motoras. Esto se debe a que para tener una buena estereoagudeza es necesario que la agudeza visual sea igual en los dos ojos, que ambos estén correctamente alineados y que el paciente haya tenido experiencia previa de binocularidad. Por ello, las pruebas para medir la estereoagudeza en visión próxima se utilizan comúnmente en la práctica clínica para identificar anomalías en las funciones binoculares como ambliopía y otras alteraciones de la visión binocular.

Hay diversas pruebas para evaluar la estereopsis, en general pueden unirse en tres grupos:

1. Estereogramas locales o *tests* de contornos, en los que se crea profundidad introduciendo una disparidad horizontal entre los límites de los dibujos vistos por cada ojo. La mayor desventaja de estos *tests* es la presencia de pistas monoculares de profundidad que pueden ser usadas por un observador astuto para elegir la opción correcta en ausencia de estereopsis.

2. Estereogramas de puntos al azar o *tests* de estereopsis global. Fueron introducidos por Julesz y en ellos la profundidad se crea mediante desplazamiento horizontal de un grupo de elementos aleatorios. Su principal ventaja es que no muestran pistas monoculares.
3. Tests de profundidad real. En ellos la profundidad real se crea mediante una separación real por lo que no es necesario equipar al paciente con filtros disociantes, sino que las imágenes son vistas por ambos ojos. También presentan pistas monoculares como el paralaje y las sombras.

En [Peñalba, 2010] se hace un estudio de la repetibilidad y concordancia de los diferentes *tests*. El *test* tradicionalmente más empleado ha sido el *test* de Titmus, pero con la introducción de estereogramas de puntos al azar, han aparecido nuevos *tests*, por ejemplo, el *test* Random-dot-E, el *test* TNO, el *test* de Randot y el *test* de Frisby, entre otros.

### 2.2.2. Dominancia ocular

La dominancia ocular se define generalmente como una preferencia monocular por el uso de uno de los ojos cuando la imagen no puede ser fusionada (ej. durante una estimulación dicótica<sup>4</sup>) o cuando se requiere visión monocular (ej. al apuntar con un rifle) [Valle-Inclán et al., 2008]. Es posible determinar en la mayoría de los casos el ojo dominante de una persona.

Se utilizan generalmente dos tipos de pruebas para determinar la dominancia ocular. Las más populares son las *sighting-dominance* en las que se representan situaciones donde los ojos no pueden usarse simultáneamente. En [Valle-Inclán et al., 2008] se presenta una descripción de cada una de ellas, estas pruebas necesitan el uso de las manos y la dirección de la mirada. Se ha demostrado que estos elementos y el conocimiento acerca de lo que se ha medido influye en los resultados.

Otro método alternativo está basado en la rivalidad binocular, se presenta una imagen diferente y al mismo tiempo a cada ojo. El cerebro tiene dificultades para integrar las

---

<sup>4</sup>presentación simultánea de los estímulos de forma separada para cada ojo

señales recibidas por ambos ojos. Si ambas señales son lo suficientemente distintas, lo que ocurre es que el cerebro resuelve el conflicto suprimiendo la información recibida por uno de los ojos. Las pruebas generalizadas no se basan en este método. Investigaciones realizadas recientemente en [Ehrenstein et al., 2005, Valle-Inclán et al., 2008, Yang et al., 2010] evidencian las ventajas de las pruebas basadas en la rivalidad binocular respecto a las *sighting-dominance*.

### 2.2.3. Agudeza Visual

La agudeza visual (AV) es la capacidad para discriminar detalles finos de un objeto en el campo visual, es la inversa del ángulo desde el cual los objetos son contemplados [Cline et al., 1997]. La prueba estándar en el mundo para medir la agudeza visual es denominada ETDRS (*Early Treatment Diabetic Retinopathy Study*), que es una extensión del *test* original de Snellen, que se aplicaba desde 1862.

En el caso de esta investigación no se analizan las pruebas estándares para su medición, debido a no encontrarse utilidad de las técnicas de VE para ello. Pero sí presta especial atención a su entrenamiento en el caso de la enfermedad visual ambliopía que será tratada en el siguiente apartado.

### 2.2.4. Enfermedades asociadas al trastorno de las funciones visuales

Se pueden encontrar enfermedades asociadas al trastorno de las funciones visuales que se han analizado. El objetivo en tratamientos pediátricos del estrabismo y la ambliopía es lograr una normal visión binocular y agudeza visual.

El **estrabismo** es la desalineación de los ejes visuales. Es una de las principales causas de ambliopía en niños, así como la pérdida de la visión binocular, debido a la ausencia del paralelismo de los ojos. El tratamiento del estrabismo depende de su tipo y su causa, pero los objetivos fundamentales son: conservar o recuperar la AV del ojo desviado, alinear los ejes visuales y mantener o recuperar la estereoagudeza. En [Salgado, 2005] se ofrece una clasificación general de los tipos existentes, sus causas y tratamientos.

Por su parte la **ambliopía** u ojo vago o perezoso consiste en la reducción de la AV en uno o ambos ojos debido a experiencias visuales anormales en la primera parte de la infancia, dando lugar a cambios funcionales de los centros visuales del cerebro. Estos cambios se deben a defectos visuales como el estrabismo, los errores de refracción (por ejemplo: la hipermetropía, miopía y astigmatismo). Otras condiciones que afectan la claridad de visión son las cataratas congénitas, las cuales también puede causar ambliopía. En cada una de estas situaciones el cerebro recibe la información visual inferior o inapropiada, que suprime el paso del tiempo [Holmes and Clarke, 2006].

El tratamiento de la ambliopía consiste en primer lugar en corregir las causas originarias (mediante la prescripción de lentes en casos de problemas de graduación o la corrección quirúrgica en problemas como el estrabismo) y, en segundo lugar, en promover el uso del ojo vago mediante técnicas que dificulten la visión con el otro. Para ello se recurre habitualmente a un parche, aunque también es posible el tratamiento con atropina [Cleary, 2000, Harvey, 2009, Scheiman et al., 2005].

En [Holmes and Clarke, 2006] se ofrece una valoración general de este padecimiento, su definición, causas, diagnósticos y tratamientos.

Ambos problemas son muy complejos y sobre ellos todavía existen muchos aspectos por descubrir y analizar: aquí solo se brinda un acercamiento a estos padecimientos con el objetivo de analizar más adelante cómo se pueden crear herramientas informáticas atractivas que mejoren o complementen los tratamientos actuales.

### 2.3. Trabajos relacionados

Después de analizar los elementos a tener en cuenta para lograr la simulación de la VE por computadora, las técnicas existentes y las funciones visuales que pueden ser analizadas con ellas, en este epígrafe se incluyen los trabajos relacionados con el área de investigación. Inicialmente se describen las investigaciones que incorporan visualización estereoscópica en distintas aplicaciones, y finalmente los trabajos que se han realizado asociados a la aplicación de las técnicas de VE en el análisis de las funciones visuales.

### 2.3.1. Incorporación de la visualización estereoscópica en las aplicaciones gráficas

En los últimos años, con el auge del cine 3D, ha aumentado el número de herramientas que permiten incorporar la visualización de los contenidos de forma estereoscópica. Tal es el caso de los motores gráficos y los *drivers* estereoscópicos.

#### Motores gráficos

Entre los motores gráficos se han estudiado diversas soluciones libres, sobresaliendo las que se brindan en OpenSceneGraph y Ogre.

#### *OpenSceneGraph*

*OpenSceneGraph* (*OSG*)<sup>5</sup> es un motor gráfico de código abierto utilizado para aplicaciones en campos como la simulación visual, videojuegos, realidad virtual, visualización científica y la modelización. Escrito enteramente en C++ estándar y OpenGL funciona en todas las plataformas Windows, OS X, GNU/Linux, IRIX, Solaris, HP-UX, AIX y sistemas operativos FreeBSD.

*OSG* tiene soporte para la representación estereoscópica según las técnicas: anaglifo (rojo/verde, rojo/cian), polarización y obturación (*Quad Buffer* y entrelazado). Permite la configuración de algunos de los parámetros de la escena, como distancia a la que está la pantalla, tamaño de la pantalla y separación intraocular.

#### *Object-oriented Graphics Rendering Engine*

*Object-oriented Graphics Rendering Engine* (*OGRE*)<sup>6</sup> es un motor gráfico de código abierto. Está escrito en C++ y utiliza las APIs gráficas OpenGL y DirectX. Presenta una colección de *plugins* que lo hacen una herramienta sumamente potente, se integra fácilmente con bibliotecas de sonido, red, física, entre otras. Hace un uso óptimo de la aceleración por hardware. Tiene buena documentación para su empleo y está respaldado por una comunidad de desarrollo extensa. Su uso es bajo licencia LGPL.

*Ogre* tiene un *plugins* para estereoscopia, con soporte para las técnicas de anaglifo (rojo/azul), polarización y obturación (formato entrelazado). Este motor gráfico permite

---

<sup>5</sup>Sitio Web: <http://www.openscenegraph.org/projects/osg>

<sup>6</sup>Sitio Web: <http://www.ogre3d.org>

solo la configuración de la distancia focal.

### **Drivers estereoscópicos**

Otra solución es a través de los *drivers* estereoscópicos. Fabricantes tanto de tarjetas gráficas *NVidia*<sup>7</sup> como de dispositivos de visualización, han desarrollado *drivers* con funciones para la visualización estereoscópica. Estos *drivers* definen dos o más cámaras para una sola escena. El resultado es un estereograma que se puede mostrar en los diversos dispositivos que soportan el *driver* en cuestión (las gafas de obturación, monitores auto-estereoscópicos, etc.). Obviamente, el ofrecimiento de estos controladores representa una ventaja competitiva de primer orden para los fabricantes de hardware. El problema para emplear estos *drivers* es que no son multiplataforma, no implementan la mayoría de los formatos estereoscópicos existentes y el programador no tiene el control total de los parámetros asociados con la naturaleza estereoscópica de la escena.

### **Otras investigaciones**

En la literatura científica consultada se han encontrado un gran variedad de aplicaciones que proponen la incorporación de visualización estereoscópica en diversos campos.

En [Stegmaier et al., 2002] se analiza la utilización de una biblioteca genérica que puede ser usada para incorporar la técnica pasiva de anaglifo, representando una alternativa de bajo costo disponible frente a la técnica activa que requiere hardware especializado. Esta biblioteca esta basada en el uso de `OpenGL` y no requiere ningún tipo de hardware adicional.

Por su parte en [Zelle and Figura, 2004] se hace un propuesta para obtener visión estereoscópica también de bajo costo, pero usando la técnica de polarización, se definen las consideraciones que deben tenerse en cuenta para su desarrollo y se propone introducir en las clases y las investigaciones propias de los estudiantes en el tema de gráficos 3D. La solución es implementada en `C++` y usa `OpenGL`.

En [Zambrano, 2008] se incorporó visión estereoscópica activa para facilitar la visualización y manipulación de la malla de objetos deformables, se hace un análisis de la interpretación geométrica de la visión estereoscópica y se propone una solución con el uso

---

<sup>7</sup>Sitio Web: <http://www.nvidia.com/object/3D-Vision-Main.html>

de OpenGL y la interfaz gráfica QT, empleando una tarjeta gráfica *NVIDIA QuadroFx 1500*.

Por su parte en [García, 2008] se desarrolla un sistema de visión estereoscópica basado en anaglifo para aplicaciones de Realidad Virtual y desarrollado con Java y la API de 3D. Este es un sistema de bajo costo que puede utilizarse en Sistemas de RV inmersivos y no inmersivos, y genera salidas tanto para una cabina de proyección como un monitor de computadora.

Como observación de estas investigaciones se puede decir que en la mayoría de los casos se coincide en el uso de OpenGL para desarrollar este tipo de aplicaciones por las ventajas que ofrece para definir la escena, de ninguna de las investigaciones se pudo obtener la solución código brindada, solo la información de como funciona su propuesta, por lo que la alternativa de utilización de código libre disponible es nula. Ninguna de las propuestas incorpora más de una técnica para dar la posibilidad de evaluar la más conveniente en cada caso.

### **2.3.2. Utilización de las técnicas estereoscópicas en la oftalmología**

Aquí se muestran las investigaciones encontradas que evidencian el uso de las técnicas estereoscópicas en el campo de la oftalmología.

Se ha constatado el uso de los sistemas estereoscópicos para determinar la dominancia ocular. En [Valle-Inclán et al., 2008] se presenta un nuevo método verificado en observadores con normal agudeza visual y estereopsis. El método consiste en presentar, dicóticamente (para cada ojo por separado), series de caracteres alfanuméricos seleccionados al azar, a una frecuencia alrededor de 5 Hz, y pedir al observador que detecte un carácter en particular dentro de la serie. La mayoría de los observadores no percibieron las letras presentadas dicóticamente como solapadas, sino una única letra cada vez, lo que permite establecer el ojo dominante. En la mayoría de los sujetos fueron obvias diferencias intraoculares en la detección de objetivos, de forma que los objetivos presentados a uno de los ojos se detectaban con facilidad, mientras que los mostrados al otro no se percibían. Las puntuaciones de dominancia ocular o diferencia intraocular obtenidas, muestran una

distribución normal y una alta fiabilidad *test-retest*. El dispositivo usado es un estereoscopio de espejos, la técnica de visión paralela y como software se empleó el Matlab y específicamente el Toolbox Psychophysics [Brainard, 1997].

Las investigaciones presentadas en [Carvalho et al., 2008] proponen la utilización de juegos de computadora para entrenar la visión binocular, específicamente los problemas de convergencia. Los tratamientos convencionales para estos propósitos son monótonos y tienen bajos niveles de cumplimiento. Presentan la utilización de una versión estereoscópica del juego Pac-Man, que puede tener varios niveles de complejidad adaptables al paciente y se guardan los resultados para un posterior análisis. Las pruebas realizadas demostraron mejoras en los pacientes, así como una alta motivación y niveles de cumplimiento. Proponen alternativas de bajo costo, una computadora de prestaciones moderadas y como dispositivo de visualización un visor de espejos. Concluyen con sus resultados en la promesa clínica que representa esta alternativa para las terapias visuales.

En [Handa et al., 2009] se presenta “Cyber Dome”, un nuevo aparato para pruebas de la visión binocular con un sistema hemisférico de visualización. En este caso los sujetos fueron capaces de experimentar la percepción visual al proyectarles en una pantalla las imágenes derecha e izquierda utilizando la técnica de polarización. Se evalúan tres parámetros: percepción simultánea (ángulo subjetivo del estrabismo), la amplitud del motor de fusión (convergencia y divergencia), y la estereopsis (disparidad binocular). El ángulo subjetivo del estrabismo y la amplitud del motor de fusión mostraron una correlación significativa entre este *test* y las mediciones con el *amblyoscope*. Todos los sujetos podían percibir el objetivo estereoscópico con una disparidad binocular de 480 segundos de arco. Los resultados obtenidos permitieron evaluar cuantitativamente la visión binocular.

*Visual Training* [Vis, 2010] es una empresa especializada en el desarrollo de software médico para ser utilizado en el campo de la Oftalmología y Óptica, así como el público en general. Brindan el paquete *TopVision Professional 2.0* es un conjunto de tres aplicaciones: *PC Acuity 2.0*, *PC Perimetry 2.0* y *TopVision 2.0*. Estas aplicaciones, asociadas a una base de datos de pacientes, plantean diferentes pruebas de visión que se guardan automáticamente para su supervisión por el especialista.

En particular *TopVision 2.0* está diseñado para evaluar y tratar distintas funciones visuales, como la estereopsis, convergencia y fijación ocular. En el se incluye un test específico: el *PC Stereopsis* (evaluación, entrenamiento y almacenamiento de resultados de la percepción de profundidad). Entre los campos de aplicación, según el fabricante, está el tratamiento de la ambliopía. Para la visualización emplean una computadora personal y la técnica de anaglifo.

Se ha identificado además el uso reciente de RV y VE en el tratamiento de niños con ambliopía. El sistema encontrado es el ***I-BiT<sup>TM</sup> system: interactive binocular treatment for amblyopia***, esta investigación ha sido llevada a cabo por el grupo *VI-RART* de *Nottingham University Hospital (Directorate of Ophthalmology)* y la *University of Nottingham*. Los primeros resultados han sido publicados en [Cleary et al., 2009].

Las actividades se diseñan para sesiones de 30 minutos, utilizando preferentemente juego para atraer la atención del niño. Se realizan 1-2 sesiones durante 6-12 semanas (12 sesiones en total de media). Se ensayan dos sistemas de visualización: el primero un *HMD* y el segundo, más práctico a juicio de los autores, un visor estereoscópico de espejos para utilizar el formato de representación *side by side*. Los resultados de los ensayos realizados con 39 niños presentan las siguientes conclusiones:

- El sistema es bien tolerado por los niños: únicamente 2 no quisieron utilizarlo.
- Los resultados son muy rápidos: como promedio la mejora se alcanza en 4 sesiones (2 horas), no registrándose a partir de ese punto una mejora apreciable.
- Al parecer, algunos pacientes mejorarían la ambliopía residual utilizando el clásico parche, pero otros ya no obtendrían mejora pese a posteriores tratamientos.

El tratamiento actúa más rápido de lo esperado y con un patrón distinto, lo que abre cuestiones relativas a la explicación neurológica de la ambliopía. Si solo en 2 horas se obtienen resultados, no se puede recurrir a una interpretación por crecimiento de enlaces neuronales sino más bien por reactivación de redes neuronales ya existentes (pero “aletargadas”). Ello permite que el tratamiento no necesariamente se limite a niños menores de

8 años (período crítico del desarrollo cerebral) sino que pueda prolongarse incluso a los adultos [Cleary et al., 2009].

La tecnología *I-BiT<sup>TM</sup>* ha sido registrada por *Carleton Optical Equipment Ltd* (<http://www.carleton-direct.co.uk/>). Esta experiencia se considera la más interesante recogida en la literatura científica, aun así, no se han encontrado citas que demuestren su validez y rigor en ensayos clínicos.

En las investigaciones presentadas se evidencia que las incursiones en este campo son recientes y no están generalizadas en la práctica médica, por lo que pueden aportarse nuevos resultados a este campo de aplicación. Algunas investigaciones solo tratan una de las funciones visuales de interés, mientras que otras identifican que pueden abarcar más de una función visual en futuros trabajos. En la Tabla 2 se relacionan a manera de resumen los trabajos sobresalientes en el área, el objetivo que persiguen y la técnica empleada.

## 2.4. Descripción del problema

En este epígrafe se enuncia inicialmente dónde fallan las técnicas tradicionales o por qué un sistema informático las mejora o complementa. Se definen las funcionalidades necesarias para que un sistema informático de visualización estereoscópica pueda ser empleado en el análisis de las funciones visuales de interés.

### 2.4.1. Justificación de utilización de un software

En los procedimientos convencionales enunciados en el epígrafe 2.2 para medir o tratar las funciones visuales, la presentación visual es pobre y los datos de la ejecución de las tareas por parte del paciente no son recogidos automáticamente para ser procesados. En la mayoría de los casos se requiere de un especialista asesorando al paciente para hacer los ejercicios, por lo que solo se pueden hacer en hospitales categorizados para ello.

En los estudios realizados en [Peñalba, 2010] se señala que hay grandes variaciones de precisión entre las pruebas médicas para medir la visión binocular. Las pruebas deben ser bien diseñadas de forma que solo se evalúe la estereopsis. En el caso del *test* TNO que se

Autor	Trabajo	Objetivo	Técnica y Dispositivo
[Valle-Inclán et al., 2008]	A New Method to Assess Eye Dominance	Evaluar la dominancia ocular	Visión paralela con un visor de espejos
[Carvalho et al., 2008]	Computer Gaming for Vision Therapy	Entrenar la visión binocular	Visión paralela con un visor de espejos
[Handa et al., 2009]	A novel apparatus for testing binocular function using the CyberDome	Evaluar la función binocular	Polarización con un CyberDome
[Cleary et al., 2009]	I-BiT <sup>TM</sup> system: interactive binocular treatment for amblyopia	Tratar la ambliopía, entrenando la AV del ojo vago	Visión paralela con un HMD y un visor de espejos
[Vis, 2010]	Visual Training	Evaluar y entrenar visión binocular	Anaglifo

Tabla 2: Trabajos relacionados con el análisis de las funciones visuales utilizando sistemas de visualización estereoscópica

utilizan gafas rojo/verde se puede mejorar o degradar artificialmente la función binocular. El estudio concluye en que existen grandes diferencias entre los distintos tipos de pruebas disponibles y su efectividad. No es fácil decidir la más adecuada para la práctica clínica, lo que muestra la necesidad de mejores diseños que reúnan en un solo *test* todas las cualidades deseadas.

Por su parte las terapias visuales para mejorar la visión binocular pueden ocupar en muchos casos largos períodos de tiempo, son monótonas y aburridas, por lo que en algunos casos el cumplimiento efectivo de la terapia es muy bajo [Carvalho et al., 2008].

En el caso de la evaluación de la dominancia ocular, han quedado constatadas en [Ehrenstein et al., 2005, Valle-Inclán et al., 2008, Yang et al., 2010] las ventajas de las pruebas basadas en la rivalidad binocular respecto a las *sighting-dominance*. Las *sighting-dominance* necesitan el uso de las manos y la dirección de la mirada. Se ha demostrado que estos elementos y el conocimiento acerca de lo que se ha medido influye en los resultados. En el caso de las basadas en la rivalidad binocular, se necesita el uso de un medio que posibilite transmitir señales distintas y sincronizadas a cada ojo.

En el tratamiento de ambliopía, por más de dos centurias, prácticamente no hay alternativas viables para el tratamiento con el parche en el ojo bueno y mejorar la agudeza visual del ojo vago, el parche requiere sumisión por parte del niño, lo que es un problema para el 59% de ellos y su familia [Waddingham et al., 2006]. Se detecta además que no se trata tampoco la estereopsis [Holmes and Clarke, 2006], el niño sigue mirando con un parche potenciando la agudeza visual del ojo vago pero sin ejercitar la estereopsis.

Es importante investigar métodos alternativos para la evaluación y terapia de estas funciones visuales, comparando su cumplimiento y eficacia respecto a los enfoques convencionales. El uso de los sistemas informáticos se presenta como alternativa para estos propósitos.

Utilizando un computadora, se puede tener en una misma aplicación varias pruebas para medir o entrenar las diferentes funciones visuales y los datos del comportamiento del paciente pueden ser recogidos para su posterior análisis. Las técnicas de VE y RV se muestran atractivas para el estudio de las funciones visuales en las que se necesite mostrar

información gráfica separada, controlada y diferente para cada ojo.

Logrando una correcta simulación de la VE por computadora pueden plantearse ejercicios donde se evalúen cuantitativamente y entrenen los diferentes estadios de la función binocular. Las investigaciones presentadas en [Handa et al., 2009, Carvelho et al., 2008] así lo confirman. Se pueden probar varias técnicas estereoscópicas y seleccionar la más adecuada. En [Peñalba, 2010] se precisa que es conveniente seleccionar instrumentos electrónicos y mecánicos para reducir la variabilidad de las pruebas existentes.

Para determinar la dominancia ocular mediante rivalidad binocular, utilizando una computadora y una presentación estereoscópica del contenido se pueden diseñar varias pruebas.

Con estas técnicas se pueden ofrecer alternativas al tratamiento con el parche para la ambliopía, al ser una enfermedad que se trata en niños, es posible plantearse actividades atractivas para que sean mejor asimiladas que el tratamiento convencional. Al transmitir información diferenciada para cada ojo pueden plantearse ejercicios donde la imagen que recibe el ojo sano esté penalizada respecto de la que llega al ojo ambliope, generando un parche virtual que afecte a toda la escena o a una parte de ella. De esta forma el cerebro del niño deberá esforzarse por interpretar la imagen recibida a través del ojo vago. Se puede además tratar la estereopsis, pues el niño puede estar mirando la escena con sus dos ojos y solo penalizar los objetos de interés en una de ellas. Estos sistemas se pueden emplear para la evaluación de esta enfermedad y su posterior tratamiento. Además, pueden ser recreados ejercicios donde se entrenen y evalúen la agudeza visual, estereopsis y convergencia simultáneamente.

La introducción de estas tecnologías es aún tímida. Los ejemplos recogidos en la literatura científica no están respaldados (al menos hasta donde se conoce) por ensayos clínicos rigurosos. Algunas de estas tecnologías están siendo protegidas comercialmente, pero es necesario demostrar su validez con mayor rigor.

De ninguna de las soluciones estudiadas en 2.3.2 se ha encontrado documentación de la herramienta informática utilizada, solo se conoce su propuesta y qué resultados han tenido hasta el momento. Es por eso que se ha comenzado a trabajar en este tema de

investigación y se necesita contar con una herramienta que posibilite el desarrollo de contenidos para estos fines.

#### **2.4.2. Funcionalidades necesarias**

Una vez realizada la investigación de cómo pueden influir las nuevas tecnologías en el análisis de las funciones visuales, se han definido un grupo de funcionalidades en conjunto con los médicos, que debe brindar la herramienta para que pueda utilizarse en el desarrollo de actividades que permitan validar la introducción de las tecnologías de VE y RV.

Las funcionalidades que se deben brindar son las siguientes:

- Permitir la visualización de la escena según las diferentes técnicas estereoscópicas existentes, para valorar la opción más adecuada en función del objetivo final a lograr.
- Cumplir las normas que rigen la estereoscopía, donde se tengan en cuenta para una correcta representación de la escena en dimensiones reales, los atributos asociados al observador (posición, orientación, distancia intraocular) y a la pantalla (posición, orientación, tamaño en mm, resolución en píxeles).
- Lograrse una relación 1:1 entre el espacio usuario y el espacio modelo para brindar una representación exacta en el monitor de las dimensiones reales de los objetos que se necesitan representar.
- Brindar la posibilidad de variar la propiedad de transparencia de los objetos de la escena para cada ojo (objetos por ejemplo que estén total o parcialmente ocultos para un ojo y representados nítidamente para el otro) para entrenar la agudeza visual de uno de los ojos o para visualizar objetos diferentes para cada ojo en ejercicios de fusión y estereopsis.
- Visualizar objetos 3D a distintas profundidades en una escena, permitiendo la selección de estos, para obtener datos del comportamiento óculo-manual (con el uso del mouse) y con ello analizar o entrenar el comportamiento de cada uno de los ojos.

- Presentar estímulos diferentes para cada ojo, controlando el tiempo de exposición de los mismos.
- Permitir la medida en grados y segundos de arco del grado de fusión, convergencia y estereopsis del observador.

Contar con una herramienta que cumpla estas funcionalidades, permitirá desarrollar las actividades necesarias para los ensayos clínicos que permitan analizar las funciones visuales de agudeza visual, dominancia ocular y visión binocular. El proyecto HDSVE cuenta con la biblioteca GLS<sub>Ve</sub> que pretende usar para estos fines. La biblioteca ha sido desarrollada en conjunto por los investigadores del proyecto, pero en su concepción inicial tenía algunas deficiencias en su diseño, y no tenía incorporadas algunas funcionalidades ya sea porque eran básicas y no estaban implementadas todavía en la versión hasta esa fecha, o porque era necesario incorporarlas para asumir este nuevo campo de aplicación.

## 2.5. Soluciones técnicas

Se han definido en el epígrafe 2.4.2 las funcionalidades necesarias para el análisis de las funciones visuales de interés. Se presenta inicialmente en este epígrafe la biblioteca GLS<sub>Ve</sub>, herramienta seleccionada para los nuevos estudios. A continuación se describen las funcionalidades incorporadas en GLS<sub>Ve</sub>. Se presentan las actividades realizadas que permiten validar su correcto funcionamiento.

### 2.5.1. *Graphics Library for Stereoscopic Vision (GLS<sub>Ve</sub>)*

En el epígrafe 2.1 se han brindado de forma general los elementos necesarios para la creación de contenidos estereoscópicos. La incorporación de la VE en las aplicaciones gráficas es posible mediante la utilización de bibliotecas gráficas, también conocidas como Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, del inglés *Application Program Interface*) (API) gráfica y los *drivers* con funciones estereoscópicas que brindan los fabricantes de tarjetas gráficas y dispositivos de visualización. Estas soluciones no incorporan de forma

intuitiva la posibilidad de creación de contenidos estereoscópicos [Martín et al., 2008], el programador tiene que comprender plenamente las normas que rigen la estereoscopía y no tiene un control total de los parámetros asociados con la naturaleza estereoscópica de la escena.

Por los inconvenientes planteados ha sido desarrollada la biblioteca GLS<sub>Ve</sub>, una biblioteca estructurada en clases que resuelve los problemas enunciados anteriormente, permitiendo representar objetos a distintas profundidades, que se observen por delante del monitor, en este, o detrás, según los paralajes correspondientes, brinda una interfaz fácil e intuitiva para su uso y tiene las siguientes características:

- La visualización de la escena puede ser en modo monoscópico.
- La visualización de la escena puede ser en modo estereoscópico según las técnicas: visión paralela, visión cruzada, anaglifo, polarización y obturación (en los formatos de representación entrelazado horizontal, *alternated images* y *quad buffering*).
- Brinda un puntero 3D, útil para la selección y manipulación de los objetos de la escena a distintas profundidades.
- Brinda sonido 3D para permitir al usuario mayor nivel de inmersión.
- Una vez compilada la biblioteca es posible añadir nuevas primitivas gráficas.
- Permite realizar transformaciones de pan, zoom y parallax.
- El usuario puede gestionar las funciones implementadas para hacer su propio código.

La biblioteca ha sido desarrollado en el lenguaje C#, utilizando el recubrimiento *TaoFramework* para emplear la biblioteca gráfica **OpenGL**, la cual brinda facilidades para implementar las técnicas estereoscópicas con los elementos geométricos a tener en cuenta.

Para más detalles de las funcionalidades, arquitectura y características de diseño de GLS<sub>Ve</sub> consultar la Memoria Colectiva en su Capítulo 3.

### 2.5.2. Funcionalidades incorporadas a GLSVe

La biblioteca GLSVe en el momento de comenzar esta investigación se encontraba en pleno desarrollo. Es por eso que hubo que mejorar algunas funcionalidades e incorporar otras para permitir el desarrollo de actividades para el análisis de las funciones visuales. Se describen a continuación los trabajos realizados.

#### **Incorporación de una estructura de datos**

Para el control de los objetos de la escena fue necesario seleccionar e implementar la estructura de datos más adecuada. En la actualidad se encuentran disponibles diversas estructuras de datos para la representación geométrica, entre las que se destaca el grafo de escena. Se escogió el grafo de escena, una estructura jerárquica muy abarcadora empleada en la mayoría de programas gráficos 3D actuales [Sowizral, 2000]. El grafo de escena establece la estructura jerárquica de entidades en la escena que pueden ser dibujadas, como cámaras, luces y geometrías. En su forma de jerarquización, un grafo de escena es un árbol que tiene asociaciones entre padres e hijos, estos a su vez pueden ser hojas (no son padres).

La implementación escogida para usar en GLSVe del grafo de escena es similar a las planteadas en [Foster, 2010, Woolford, 2003, Román and López, 2009]. En la clase principal GLSV se tiene el nodo raíz `SceneGraphRoot`, al que se le van añadiendo los demás nodos de la escena.

En cada `Node` del grafo de escena se guarda la información espacial del objeto de posición, orientación y escala. Los nodos se pueden agrupar en un `GroupNode`, que almacena la lista de sus hijos. Un nodo padre, contiene espacialmente a sus nodos hijos.

A su vez la clase `Model` almacena la información no espacial del objeto como color, materiales, grado de transparencia y capa a la que pertenece. `Model` también brinda los atributos de `visibleLeftEye` y `visibleRightEye`, que permiten gestionar si un modelo se va dibujar para ambos ojos o solo uno de ellos y `alphavalue` el grado de transparencia.

De esta clase `Model` heredan los modelos básicos definidos (`Esfera`, `Cubo`, `Texture`, `Mesh`, `PhotoPair`, `AnimationCollectionPP`, `Pointer3D`, etc.). Pero se

deja al usuario de la herramienta la posibilidad de añadir otros modelos que definan nuevos tipos de datos.

Una variación del grafo de escena de GLSVe es que las cámaras no están asignadas a un `Node` como en otras soluciones estudiadas. Aquí solo se usan dos cámaras en la escena, que representan los ojos del observador y están definidas en la clase `Observer`, así como la información espacial referente a ella.

### Gestión del dibujado

Al incorporarse un grafo de escena fue necesario definir la gestión del dibujado aprovechando las características del grafo de escena. La gestión del dibujado se realiza desde la clase principal `GLSV`, que brinda un `Mode` de dibujado diferente en función de la técnica estereoscópica que esté activa teniendo en cuenta que un objeto puede ser visto por el observador desde tres puntos de vista, por lo que se ha definido y se tiene el control del `EyeActive` en cada momento, que puede ser `SingleEye`, `LeftEye` y `RightEye`.

Para dibujar todos los objetos visibles de la escena en cada ciclo se recorre el grafo de escena según los pasos siguientes:

1. Primeramente se recorre el grafo actualizando el estado espacial (posición, orientación y escala) de todos los modelos de la escena para su estado geométrico mundial y local (respecto a su padre). Existe un atributo `Active` que define si el nodo puede cambiar su posición o no en el tiempo. Si el `Node` no está `Active` no se actualizan sus hijos, en este caso no se recorre esa rama.

2. En un segundo paso se recorre el grafo para dibujar los objetos de la escena según el modo estereoscópico activo:

- 2.1 Si el `Mode` activo es `MonoMode` la escena se dibujará desde una sola cámara (`SingleEye`). Se procede a crear el `frustum` de la cámara y se define la mira (`lookat`) para este único ojo del observador. Se invoca el método `DrawHead()`.

- 2.2 Si el `Mode` activo es `StereoMode` la escena se dibujará desde las dos cámaras (`LeftEye` y `RightEye`). Se calcula el `frustum` y la mira (`lookat`) para ambos ojos del observador. Se activa el filtro asociado al modo estereoscópico activo y se invocan los métodos `DrawLeft()` y `DrawRight()` en el momento determinado, en función de la técnica

activa.

Se recomienda usar este grafo de escena, aprovechando sus funcionalidades, para incorporar técnicas de optimización, animaciones mediante estructuras de huesos y orientarlo a las características de `OpenGL`.

### Gestión independiente del observador y la pantalla

Por la importancia en este tipo de aplicaciones de tener el control total de los que se está representando, para no dar margen a fallos en las mediciones y representar en la pantalla lo que realmente se necesita con las medidas adecuadas, es necesario tener un control estricto de los datos correspondientes al observador y la pantalla.

Se crearon clases independientes para gestionar el observador (`Observer`) y la pantalla (`Display`) con los atributos que permiten definir sus principales propiedades. Esta solución ofrece una gran flexibilidad en el diseño, por ejemplo de esta forma en la clase principal `GLSV` se pueden tener múltiples instancias de `Display` (asentando las bases para un sistema interactivo multi pantalla) y garantizando un bajo acoplamiento entre los dos conceptos. Las llamadas a `gluLookAt` y `glFrustum`, que contienen atributos comunes, se realizan en la clase principal `GLSV`, que al tener instancias de `Observer` y `Display` puede obtener los parámetros que se necesitan. Quedando los principales atributos definidos como se muestra en la figura 8.

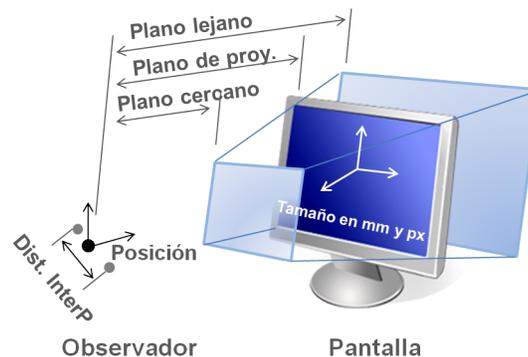


Figura 8: Relación entre el observador y la pantalla

La definición de esta forma de `Observer` y `Display` permite establecer fácilmente una relación 1:1 (Ej. una unidad en `OpenGL` representa un milímetro en el mundo real) entre

el espacio usuario y el espacio modelo, lo que hace posible la representación virtual en dimensiones reales de la escena. Permite también una fácil configuración de los atributos asociados a ellos.

Es posible gestionar fácilmente por el usuario final de la herramienta todos los parámetros recomendados del observador y la pantalla de una forma intuitiva. Para ello existen las siguientes funciones:

```
_engine.SetObserverParams(ObserverPosicion, ObserverHorizontal,  
INTERAXIAL_MM, NEAR_MM, FAR_MM);  
  
_engine.SetDisplayParams(DisplayPosicion, DisplayHorizontal,  
DisplayPerpendicular, DISPLAY_WIDTH_MM, DISPLAY_HEIGHT_MM);  
  
_engine.SetViewportParams(simpleOpenGLControl1.Width,  
simpleOpenGLControl1.Height, DISPLAY_WIDTH_PX, DISPLAY_HEIGHT_PX);
```

En ninguna de las aplicaciones gráficas consultadas se ofrece este nivel de detalle al definir estos dos objetos, y en muchas de ellas no es posible modificar los valores de los atributos una vez definidos. Es posible aquí, en tiempo real modificar la información espacial del `Observer` y del `Display`. Esta solución permite además el acople intuitivamente a GLSve de módulos que realicen seguimiento del usuario o de la pantalla a través de las diferentes soluciones existentes (usando cámara, wiimote, etc.). De estos módulos se obtendría los valores en cada instante de tiempo de posición y orientación de las entidades para visualizar la escena desde diferentes puntos de vista, esto es útil para estudios donde el observador pueda moverse al realizar las pruebas.

### **Presentación de estímulos diferentes para cada ojo**

La presentación de estímulos diferentes para cada ojo fue necesario incorporarla por dos motivos, para presentar estímulos controlados y diferentes para cada ojo, útil en la detección de la dominancia ocular por el método de estimulación dicótica y para presentar animaciones, logrando una mayor motivación en las actividades a desarrollar para terapias visuales.

La visualización de estas imágenes hay que realizarlas con estricto control para no tener efectos no deseados. Se utilizan los objetos de tipo `PhotoPair` (que almacena un

par de imágenes estereoscópicas) y se tiene el control en la clase `AnimationCollectionPP` de que par de fotos se está visualizando en cada instante de tiempo.

Las imágenes aquí, tienen la característica que son estereoscópicas, es diferente la imagen que se muestra para cada ojo, y deben ser correctamente diseñadas en herramientas de diseño 3D donde sea posible posicionar dos cámaras simulando la visión humana e ir obteniendo un par de fotos para cada fotograma.

El dibujado ocurre en los métodos `DrawLeftEye()` y `DrawLeftRight()` de la imagen correspondiente para cada ojo en cada instante de tiempo. Con los atributos `_delayTime`, `_currentTime` y `_backTime` se controla el tiempo necesario para cambiar la presentación de estímulos.

### **Presentación de objetos y texturas con posibilidad de variar la transparencia**

Fue necesario incorporar transparencia a los texturas y objetos por dos motivos: sobreponer unas imágenes con otras que se encuentren en diferentes planos sin que los fondos de las primeras tapen partes de las últimas y dar la posibilidad de variar la intensidad de la transparencia (útil para poder visualizar un objeto más nítido para un ojo y menos nítido para el otro ojo).

Para el caso de las texturas se usan los mapas de bits que almacena en cada pixel el color correspondiente a él, la posibilidad de ampliar la cantidad de colores posibles por cada pixel depende los bits que se dedique a ello. En el caso de las imágenes con soporte para transparencia hay que tener en cuenta cargar los formatos que almacenen y permitan modificar el canal alfa, en la solución se debe brindar soporte para el formato *Portable Network Graphics* (PNG) en su opción RGBA, por cada bits de la imagen se almacena información de cuatro canales: rojo, verde, azul y alfa.

Para la carga de imágenes en memoria se usa el *wrapper* `TaoFramework`, se ofrecen dos opciones, usar la biblioteca `Tao.SDL` o `SDL.Net`, el primero de ellos solo soporta la carga del formato “bmp”, y el segundo ofrece un amplio rango de formatos incluyendo el “png”, es por eso que ha sido la opción seleccionada.

Se especifica la textura con `glTexImage2D(GLenum objetivo, GLint nivel,`

`GLint` componentes, `GLsizei` ancho, `GLsizei` alto, `GLint` borde, `GLenum` formato, `GLenum` tipo, `const GLvoid *pixels`). Teniendo en cuenta que el número de componentes para texturas con soporte a transparencia es cuatro y el formato el `GL_RGBA`.

OpenGL no tiene una interfaz directa para la presentación de objetos parcialmente opacos. Pero se puede crear un efecto de transparencia con la función de mezcla (`GL_BLEND`), siempre teniendo en cuenta el orden en el que se envían las primitivas a dibujar [Site, 2010].

Para habilitar el efecto de *blending* se usan las funciones `glEnable(GL_BLEND)` y `glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA)`.

Para especificar la opacidad del objeto se usa la función `glColor4f()`, los tres primeros parámetros indican el color de la primitiva y el cuarto su opacidad, valor que se debe encontrar entre 0 (totalmente opaco) y 1 (totalmente visible).

Con esta funcionalidad incorporada se pueden realizar actividades que incidan directamente en el entrenamiento de la agudeza visual del ojo vago en pacientes con ambliopía. Se puede ajustar en tiempo real y en función de como responde el paciente al ejercicio, el grado de opacidad del objeto objetivo. A diferencia de otras propuestas donde el parche se aplica completamente al objeto objetivo, es posible aquí presentarlo también parcialmente opaco.

### **Conversión entre medidas lineales y medidas angulares**

En las aplicaciones gráficas tradicionales las medidas de las distancias se hacen en unidades lineales, que es la unidad estándar para este tipo de aplicaciones, pero en este caso, al proponerse la biblioteca para el análisis de la visión binocular, fue necesario incorporar un componente que permita además ofrecer los datos en segundos de arco y grados, que son las unidades estándares para los *test* tradicionales de medir visión binocular. El componente, con los datos del observador (distancia a la pantalla y distancia intraocular), los datos de la pantalla (tamaño en milímetros y resolución horizontal en píxeles) brinda:

- La disparidad geométrica entre el observador, un ObjetoA y un ObjetoB en grados,

segundos de arco y milímetros.

- La resolución de segundos de arco por píxeles para una configuración del sistema.
- La disparidad geométrica sobre la pantalla de un objeto.
- Conversiones entre cada una de estas unidades.

No se han encontrado soluciones similares en las que se incorpore esta funcionalidad, que será necesario para establecer una relación entre la aplicación gráfica y los datos que interpretan los especialistas. Facilita además la interpretación de los resultados desde el punto de vista clínico.

### **Selección de la técnica y dispositivo recomendados**

GLSVe brinda la mayoría de las técnicas estereoscópicas existentes. Finalmente para este tipo de aplicaciones ha sido seleccionado como el más adecuado un sistema de representación pasivo, utilizando la técnica de visión paralela, el formato de representación *side by side* y como dispositivo un visor de espejos. Un sistema de este tipo trabaja en una computadora convencional y su puesta en funcionamiento implica un bajo costo. La calidad y nitidez de la representación final lograda con los espejos es muy buena, no se produce pérdida de colores y no se observa ningún tipo de imagen fantasma. El dispositivo de espejos puede ser diseñado de forma que el observador debe encontrarse a una distancia fija del monitor, lo que permitirá lograr un mejor resultado en las pruebas que se apliquen y se evita la búsqueda de otras señales de profundidad distintas a la disparidad retinal (en particular el paralaje por movimiento). En la figura 9 se muestra una representación de la configuración propuesta de los espejos y la pantalla.

Otro elemento para la selección de esta técnica es que ha sido la opción seleccionada por tres de las cinco investigaciones consultadas y resumidas en la tabla 2.

### **Diseño conceptual final de la biblioteca GLSVe**

Se presenta en la figura 10 el diseño conceptual final de las principales clases incorporadas o modificadas para permitir las funcionalidades antes descritas. Queda bien definida una estructura para el grafo de escena, un observador y una pantalla relacionados con la

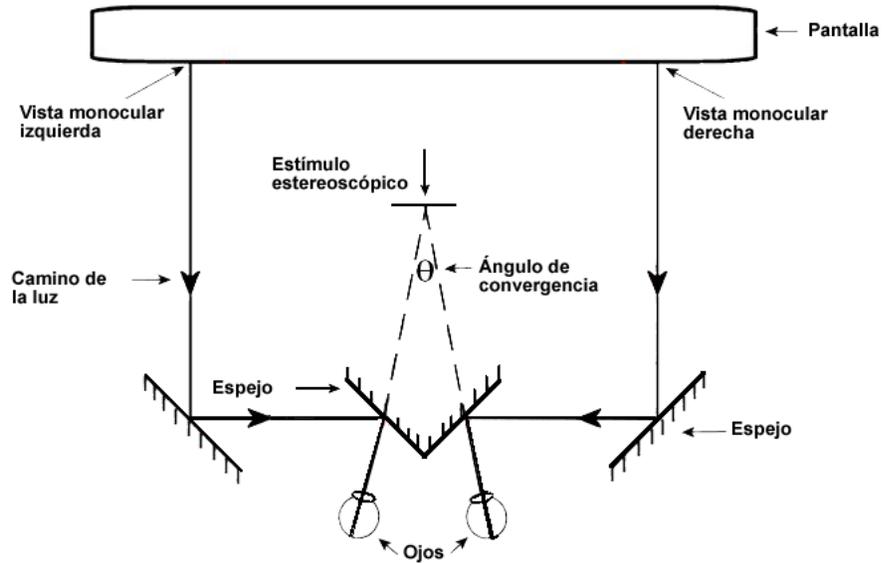


Figura 9: Configuración del dispositivo de espejos y la pantalla

clase principal GLSV, un componente para el cálculo de las disparidades. Y unos modos de visión que implementan las diferentes técnicas existentes.

Han sido creadas además interfaces bien definidas para la utilización intuitiva de la biblioteca por el usuario final. No se han encontrado herramientas similares a la biblioteca mostrada.

### 2.5.3. Actividades prototípicas

Con el cumplimiento en GLSVe de las funcionalidades necesarias, se han podido desarrollar un conjunto de actividades que permiten validar el correcto funcionamiento de la herramienta y han sido enfocadas al análisis de las funciones visuales.

El sistema está diseñado para un monitor de 17 pulgadas a una resolución de 1024x768 píxeles. Se supone una escena cuyo centro de atención está a 350 mm del observador. El observador tiene una distancia intraocular de entre 45 y 65 mm. La escena tendrá un plano near a unos 280 mm y un plano far a unos 500 mm.

En el Capítulo 5 de la Memoria Colectiva hay una detallada explicación de la configuración del sistema de visualización para casos en que se necesiten variar estos parámetros.

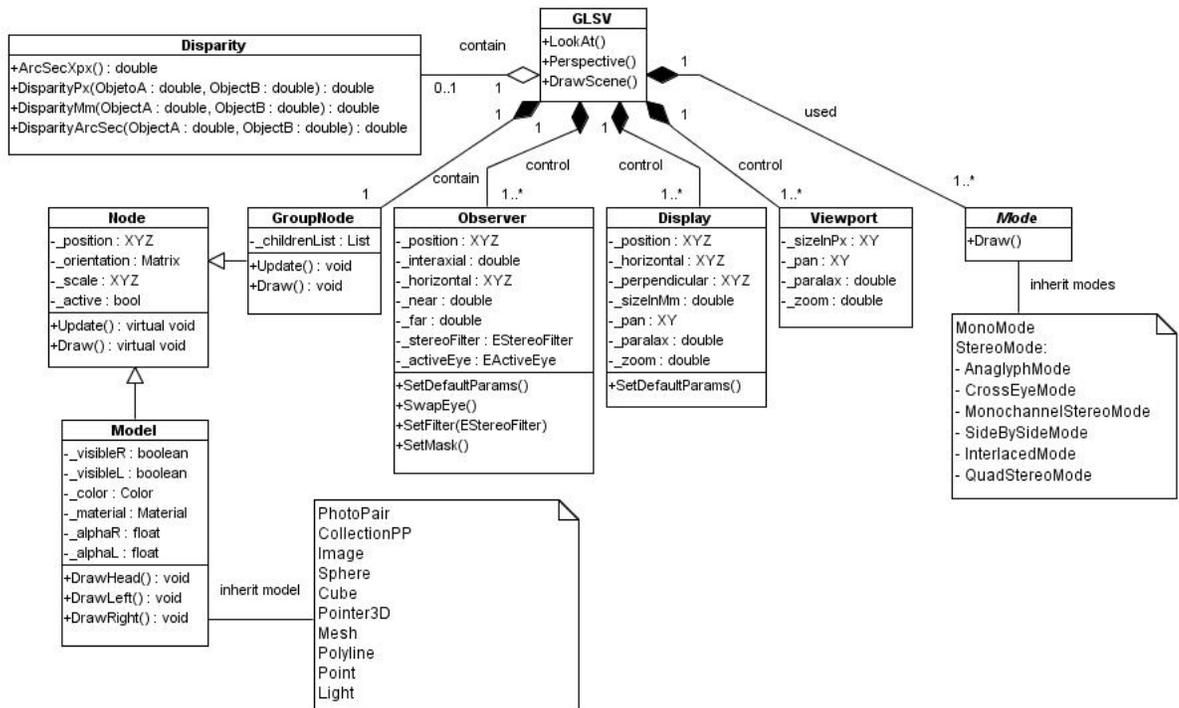


Figura 10: Diseño conceptual de la biblioteca GLSVe (solo se muestran los conceptos relevantes)

Con esa configuración es posible lograr una resolución de 194 segundos de arcos por pixel. Para alcanzar otras resoluciones habría que estudiar otras configuraciones del sistema o el uso de lentes para estos fines.

Se presenta aquí una breve descripción de cada una de las actividades realizadas:

**Simulación del Test TNO.** [Cooper et al., 1991] Se visualiza un *Random Dot Stereograms* de puntos aleatorios [Qian and Sejnowski, 1988]. Observada monocularmente, la imagen no ofrece ninguna información, pero de forma binocular muestra una imagen tridimensional. Este *test* permite medir la agudeza visual estereoscópica del paciente, en segundos de arco. Se utiliza el ratón en un espacio 2D para señalar una imagen igual a la descubierta de entre varias ofrecidas. Este *test* lo utilizan los médicos en las consultas con los pacientes en versión dura en el formato de representación anaglifo.

**Búsqueda de objetos parcialmente ocultos por paralaje.** Se presenta una escena compleja donde se debe localizar varios objetos. Estos están solapados por otros elementos

más cercanos, de forma que, por efecto de la paralaje, se ve con suficiente detalle con un ojo y sin embargo permanecen prácticamente ocultos para el otro. Se utiliza el ratón en un espacio 3D. La actividad se propone para ejercitar la estereopsis, agudeza visual y convergencia. No se han encontrado herramientas similares que intenten este tipo de ejercicios para entrenar la estereopsis haciendo uso del efecto de paralaje.

**Trazado de contornos 3D.** Se debe trazar un contorno tridimensional seleccionando con el ratón puntos a distintas profundidades hasta descubrir una figura oculta. Se utiliza por tanto el ratón en un espacio 3D. Esta actividad como la anterior se propone para ejercitar la estereopsis, agudeza visual y convergencia, pero además de ello incorpora la posibilidad de medir la estereopsis presente para cada ojo. Esta última característica es distintiva, con los *tests* tradicionales no es posible obtener el ojo que prevalece en determinados pacientes para la percepción de profundidad.

**Búsqueda de objetos con penalización del ojo sano.** Se presenta una escena donde se tienen que seleccionar distintos elementos que con un ojo se perciben nítidos y con el otro no se visualiza correctamente. Para ello, a estos objetos se les aplica un filtro de transparencia en una de las proyecciones. Se utiliza el ratón en un espacio 2D. La actividad se propone para ejercitar la agudeza visual. Sobre todo se avizora su uso en el tratamiento de la ambliopía.

**Dominancia ocular.** Se ha reproducido un ejercicio similar al presentado en [Valle-Inclán et al., 2008], donde se prestan series de caracteres alfanuméricos seleccionados al azar, a una frecuencia alrededor de 5 Hz, y pedir al observador que detecte un carácter en particular dentro de la serie, con el objetivo de establecer el ojo dominante.

La autora de este trabajo ha contribuido también en el diseño y arquitectura de una aplicación denominada Ambly, que reúne inicialmente las últimas cuatro actividades descritas. Esta aplicación tiene como objetivo detectar, evaluar y tratar la ambliopía. Es posible almacenar y gestionar los datos relativos a los pacientes y como evolucionan en el tratamiento. Mediante archivos XML se configuran y almacenan los datos de las actividades y pacientes, cuenta además con una aplicación en la que el médico puede configurar y analizar los datos. Para más información consultar la Memoria Colectiva en su Capítulo

5.

#### 2.5.4. Discusiones finales

Las investigaciones sobre la utilidad de los gráficos por computadora en estudios de percepción visual es relativamente reciente y todavía tiene muchas áreas que abarcar y mostrar su aplicabilidad.

No se ha encontrado en la literatura estudiada una herramienta con características similares a GLS<sub>Ve</sub>, que permita el análisis de las funciones visuales seleccionadas. Los artículos estudiados han sido presentados en revistas de las ciencias visuales, donde el objetivo principal no es presentar en detalles la herramienta que se utiliza, por lo que las alternativas de código disponible para hacer estudios similares en la literatura científica son nulas hasta donde se ha consultado. Una herramienta de este tipo puede ser bienvenida por los investigadores en estudios de la visión.

GLS<sub>Ve</sub> es posible usarla para un mayor número de ejercicios que los planteados, es posible implementar actividades de evaluación y entrenamiento de las tres fases de la visión binocular o cualquier otra actividad diferente para tratar la agudeza visual y estimar la dominancia ocular.

El **Test TNO** realizado, usando la técnica de visión paralela con el dispositivo de espejos elimina la desventaja enunciada en [Peñalba, 2010] del **Test TNO** tradicional en el que se utilizan gafas rojo/verde, con las que se puede mejorar o degradar artificialmente la función binocular.

La posibilidad del uso de un puntero 3D, que se mueve no solo en X y Y, también en profundidad Z, como se ha mostrado en la actividad de **Trazado de contornos 3D** permite un análisis del comportamiento óculo-manual del usuario y hacer una evaluación cuantitativa de cada uno de los ojos. Sobre este tema no han sido encontrados estudios similares.

Se proponen estas tecnologías de VE para entrenar la agudeza visual, convergencia y estereopsis simultáneamente en niños con ambliopía, lo que no se logra con el tratamiento convencional con el parche y no ha sido propuesto en las investigaciones presentadas en

[Cleary et al., 2009], donde solo se presentan dos imágenes para ejercitar la agudeza visual de uno de los ojos y no la estereopsis.

Las actividades propuestas, por las características descritas, pueden representar un enfoque alternativo a los métodos convencionales para medir o tratar las funciones visuales de interés, la realización de estudios directamente con pacientes permitirá arrojar resultados para emitir conclusiones finales.

Por las características de la biblioteca GLSve no solo tiene campo de aplicación en esta rama, sino también en cualquier otro tipo de aplicación que necesite una representación tridimensional estereoscópica. Se ha puesto a disposición <sup>8</sup> de la comunidad internacional como una herramienta de código abierto y puede ser útil para investigadores de diversas ramas en sus proyectos.

---

<sup>8</sup>Se puede descargar la biblioteca y ejemplos básicos desde: <http://glsve.sourceforge.net>

### 3. Conclusiones

En el transcurso de la investigación realizada se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Se ha propuesto un nuevo enfoque utilizando técnicas de VE, para el análisis de las funciones visuales dominancia ocular, agudeza visual y visión binocular.
- La herramienta propuesta (GLS<sub>Ve</sub>) permitió realizar actividades prototípicas, cumpliendo con las funcionalidades establecidas para su uso en las aplicaciones oftalmológicas definidas.
- La técnica de visión paralela, utilizando un visor de espejos como dispositivo de visualización, es una solución adecuada para ser usada en las aplicaciones definidas.

## 4. Recomendaciones

Se proponen como recomendaciones para investigaciones futuras las siguientes:

- Desarrollar nuevas actividades que permitan contar con amplio banco de ejercicios para aplicar con pacientes, ya sea para la evaluación de las funciones visuales o su posible entrenamiento.
- Realizar en conjunto con los médicos un período de ensayos clínicos con pacientes de acuerdo a los procedimientos médicos establecidos para validar la aplicación de la propuesta.
- Investigar la posible aplicación de esta propuesta al estudio de otros elementos de percepción visual (Ej. campo visual, sensibilidad al contraste, discriminación de color, etc.) y el análisis del movimiento y posición de los ojos (acomodación).

## 5. Publicaciones derivadas

Durante la investigación presentada se realizaron las siguientes publicaciones y presentaciones:

### **Análisis de GLSVe como biblioteca para estudios sobre el Sistema Visual Humano**

Autores: L. Pupo, Y. Cabrera, S. Martín, R. Rubio

*VIII Congreso Internacional de Informática en la Salud,*

XVI Convención y Feria Internacional Informática 2011<sup>9</sup>.

### **Aplicación de las técnicas de realidad virtual en el tratamiento de la ambliopía**

Autores: S. Martín, L. Pupo, Y. Cabrera, R. Rubio, P. Aduriz

*XI Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador* Valencia, España. pp 343-348 ISBN: 978-84-92812-52-3

III Congreso Español de Informática. CEDI 2010.

### **Desarrollo de una biblioteca de clases para la visión estereoscópica**

Autores: L. Pupo, S. Martín, Y. Cabrera, R. Rubio

*V Taller de Visualización Gráfica y Realidad Virtual* ISBN: 978-959-286-011-7,

V Conferencia Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas. UCIENCIA 2010.

---

<sup>9</sup>Aceptado en ponencia presencial, pendiente de publicación en la fecha de impresión de este documento

## Referencias

- [Vis, 2010] (2010). Visual training. <http://www.visualtraining.com/esp/produccion.htm>.
- [Bailey and Clark, 1998] Bailey, M. and Clark, D. (1998). Using chromadepth to obtain inexpensive single-image stereovision for scientific visualization. *Journal of Graphics Tools*, 3(3):1–9.
- [Borrás et al., 1998] Borrás, M. R., Ondategui, J. C., Peris, E., Castañé, M., Pacheco, M., and Varón, C. (1998). Optometría. manual de exámenes clínicos. capítulo 5: Grados de la visión binocular. <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/OP00203M.pdf>.
- [Bourke, 1999] Bourke, P. (1999). Calculating stereo pairs. western australian supercomputer program website. <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/miscellaneous/stereographics/stereorender/>.
- [Brainard, 1997] Brainard, D. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10:433–436.
- [Bruce et al., 2003] Bruce, V., Patrick, R. G., and Mark, A. G. (2003). *Visual perception: physiology, psychology, and ecology*. Psychology Press, 4th edition.
- [Carvalho et al., 2008] Carvalho, T., Allison, R., Irving, E., and Herriot, C. (2008). Computer gaming for vision therapy. In *Virtual Rehabilitation, 2008*, pages 198–204.
- [Cleary, 2000] Cleary, M. (2000). Efficacy of occlusion for strabismic amblyopia: can an optimal duration be identified? *Br J Ophthalmology*, 84(6):572–578.
- [Cleary et al., 2009] Cleary, M., Moody, A. D., Buchanan, A., Stewart, H., and Dutton, G.Ñ. (2009). Assessment of a computer-based treatment for older amblyopes: the glasgow pilot study. *EYE*, 23(1):124–131.
- [Cline et al., 1997] Cline, D., Hofstetter, H., and del Griffin, J. (1997). *Diccionario de la ciencia visual*. Butterworth-Heinemann, 4th edition.

- [Coon, 2005] Coon, D. (2005). *Fundamentos de Psicología*. International Thomson Editor, 10th edition.
- [Cooper et al., 1991] Cooper, J., Eskridge, J., Amos, J., and J.Barlett (1991). Stereopsis. *Clinical Procedures in Optometry*, pages 121–134.
- [Corliss and Bailey, 2002] Corliss, D. A. and Bailey, J. E. (2002). *The Psychophysical Measurement of Visual Function*. Butterworth-Heinemann, 2nd edition.
- [Corn and Koenig, 1996] Corn, A. L. and Koenig, A. J. (1996). *Foundations of low vision: clinical and functional perspectives*. American Foundation for the Blind.
- [Corporation, 1997] Corporation, S. (1997). Stereo-graphics developers’ handbook. <http://www.stereographics.com>.
- [Ehrenstein et al., 2005] Ehrenstein, W. H., Arnold-Schulz-Gahmen, B. E., and Jaschinski, W. (2005). Eye preference within the context of binocular functions. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 243(9):26–932.
- [Foster, 2010] Foster, G. (2010). Understanding and implementing scene graphs. <http://www.gamedev.net/reference/programming/features/scenegrph/>.
- [García, 2008] García, I. N. R. (2008). Sistema de visión estereoscópica basado en anaglifo para aplicaciones de realidad virtual. Master’s thesis, Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- [Handa et al., 2009] Handa, T., Ishikawa, H., Shimizu, K., Kawamura, R., Nakayama, H., and Sawada, K. (2009). A novel apparatus for testing binocular function using the cyberdome three-dimensional hemispherical visual display system. *EYE*, 23(11):2094–2098.
- [Harvey, 2009] Harvey, E. M. (2009). Development and treatment of astigmatism-related amblyopia. *Optometry and Vision Science*, 86(6):634–639.

- [Holmes and Clarke, 2006] Holmes, J. M. and Clarke, M. P. (2006). Amblyopia. Technical Report 367, Department of Ophthalmology, Mayo Clinic College of Medicine, Rochester, USA.
- [Howard and Rogers, 1995] Howard, I. P. and Rogers, B. J. (1995). *Binocular Vision and Stereopsis*. Oxford University Press (OUP)., 1st edition.
- [Jorke and Fritz, 2005] Jorke, H. and Fritz, M. (2005). Infitec - a new stereoscopic visualization tool by wavelenght multiplex imaging. Technical Report 89081, Infitec GmbH.
- [Koenig and Holbrook, 2000] Koenig, A. J. and Holbrook, M. C. (2000). *Instructional strategies for teaching*. Education.
- [Lipton, 1997] Lipton, L. (1997). Stereo-vision formats for video and computer graphics. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IV*, pages 239–244.
- [Martín et al., 2008] Martín, S., Suárez, J., Orea, R., Rubio, R., and Gallego, R. (2008). Glsv: Graphics library stereo vision for opengl. *Virtual Reality*, 13(1):51–57.
- [McAllister, 1993] McAllister, D. F., editor (1993). *Stereo computer graphics: and other true 3D technologies*. Princeton University Press, 1st edition.
- [Pambakian et al., 2004] Pambakian, A. L., Mannan, S. K., Hodgson, T. L., and Kennard, C. (2004). Saccadic visual search training: a treatment for patients with homonymous hemianopia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 75:1443–1448.
- [Peñalba, 2010] Peñalba, B. A. (2010). *Fiabilidad Intraexaminador y Concordancia de Pruebas Clínicas de Evaluación de la Visión Binocular*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- [Pfautz, 2002] Pfautz, J. D. (2002). Depth perception in computer graphics. *Ucam-cl-tr* 546.
- [Polat, 2009] Polat, U. (2009). Making perceptual learning practical to improve visual function. *Vision Research*, 49:2566–2573.

- [Qian and Sejnowski, 1988] Qian, N. and Sejnowski, T. J. (1988). Learning to solve random-dot stereograms of dense and transparent surfaces with recurrent backpropagation. In *Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School*, pages 435–443.
- [Román and López, 2009] Román, Y. C. and López, F. J. (2009). Informe final del proyecto herramientas de desarrollo para sistemas de realidad virtual. Technical report, Universidad de las Ciencias Informáticas.
- [Salgado, 2005] Salgado, C. (2005). Ambliopía y estrabismo. *Boletín de la Escuela de Medicina*, 30(2).
- [Salmon, 2010] Salmon, T. O. (2010). Vision science 3 - binocular vision module, lecture 13 stereopsis. [http://arapaho.nsuok.edu/~salmonto/vs3\\_materials/Lecture13.pdf](http://arapaho.nsuok.edu/~salmonto/vs3_materials/Lecture13.pdf).
- [Scheiman et al., 2005] Scheiman, M. M., Hertle, R. W., and et al. (2005). Randomized trial of treatment of amblyopia in children aged 7 to 17 years. *Archives of Ophthalmology*, 123(4):437–447.
- [Schwartz, 2004] Schwartz, S. H. (2004). *Visual Perception: A Clinical Orientation. Chapter 10 Depth Perception*. McGraw-Hill Companies.
- [Silverman, 1993] Silverman, R. J. (1993). The stereoscope and photographic depiction in the 19th century. In *Technology and Culture, Biomedical and Behavioral Technology*, volume 34, pages 729–756. The Johns Hopkins University Press on behalf of the Society for the History of Technology.
- [Site, 2010] Site, O. W. (2010). Transparency, translucency, and blending. <http://www.opengl.org/resources/faq/technical/transparency.htm>.
- [Southard, 1992] Southard, D. A. (1992). Transformations for stereoscopic visual simulation. *Computers and Graphics*, 16(4):401–410.
- [Sowizral, 2000] Sowizral, H. (2000). Scene graphs in the new millennium. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 20(1):56–57.

- [Stegmaier et al., 2002] Stegmaier, S., Rose, D., and Ertl, T. (2002). A case study on the applications of a generic library for low-cost polychromatic passive stereo. In *Proceedings of the conference on Visualization '02*, pages 557–560, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Valle-Inclán et al., 2008] Valle-Inclán, F., Blanco, M. J., Soto, D., and Leirós, L. (2008). A new method to assess eye dominance. *Psicológica*, 29:55–64.
- [Waddingham et al., 2006] Waddingham, E., Cobb, S. V., Eastgate, R. M., and Gregson, R. M. (2006). Virtual reality for interactive binocular treatment of amblyopia. 6th International Conference Disability, Virtual Reality and Associated Technologies.
- [Woolford, 2003] Woolford, D. (2003). Understanding and using scene graphs. In [http://www.itee.uq.edu.au/comp4201/scene\\_graphs\\_dsaw.pdf](http://www.itee.uq.edu.au/comp4201/scene_graphs_dsaw.pdf).
- [Yang et al., 2010] Yang, E., Blake, R., and McDonald, J. E. (2010). A new interocular suppression technique for measuring sensory eye dominance. *Investigations in Ophthalmology and Visual Sciences*, 51(1):588–593.
- [Zambrano, 2008] Zambrano, M. M. (2008). Interacción con objetos deformables. Maestra en ciencias en la especialidad de computación, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Departamento de Computación. México D.F.
- [Zelle and Figura, 2004] Zelle, J. M. and Figura, C. (2004). Simple, low-cost stereographics: Virtual reality for everyone. *ACM SIGCSE Bulletin archive*, 36(1):348–352.

## A. Glosario de términos

**agudeza visual:** capacidad para discriminar detalles finos de un objeto en el campo visual, es la inversa del ángulo desde el cual los objetos son contemplados.

**ambliopía:** (u ojo vago o perezoso) consiste en la reducción de la agudeza visual en uno o ambos ojos debido a experiencias visuales anormales en la primera parte de la infancia, dando lugar a cambios funcionales de los centros visuales del cerebro.

**amblyoscope:** aparato utilizado para evaluar o entrenar la visión binocular y estimular la visión en el ojo amblíope.

**biblioteca:** desde el punto de vista informático es una colección o conjunto de subprogramas usados para desarrollar un software.

**convergencia:** movimiento hacia dentro de los dos globos oculares para que sus ejes visuales se junten o converjan en el objeto que se mira.

**dominancia ocular:** se define generalmente como una preferencia monocular por el uso de uno de los ojos cuando la imagen no puede ser fusionada (por ejemplo durante una estimulación dicótica) o cuando se requiere visión monocular (ejemplo al apuntar con un rifle).

**estereopsis:** apreciación de la tridimensionalidad de los objetos.

**estimulación dicótica:** presentación simultánea de los estímulos (auditivos o visuales) subliminal y supraliminal por canales (auditivos o visuales) diferentes.

**frustum:** volumen formado por los seis planos que definen los límites de la cámara: cercano, lejano, izquierdo, derecho, arriba y abajo.

**funciones visuales:** capacidades del HVS de interpretar la información y el entorno, de los efectos de la luz visible que llega al ojo.

**grafo de escena:** estructura jerárquica donde se almacenan y organizan los objetos de la escena para el control de su información y determinación de la visibilidad, donde las hojas contienen los objetos dibujables de la escena.

**imagen fantasma:** se produce cuando el ojo izquierdo ve algo de la imagen derecha, y al revés. Este problema se debe a que los filtros no tienen un rendimiento ideal, y la manera de reducirlo es jugar un poco con el brillo y fundamentalmente con el contraste de las imágenes del par estereoscópico.

**motor gráfico:** (*graphic engine* en inglés) módulo gráfico independiente, lo bastante potente para poder tratar toda la información que hay en él, así como su visualización en tiempo real. Este concepto surge por la complejidad gráfica añadida a la hora de tratar con escenarios 3D.

**paralaje horizontal:** distancia horizontal entre las proyecciones del ojo izquierdo y derecho sobre la ventana de proyección.

**paralaje vertical:** distancia vertical entre las proyecciones del ojo izquierdo y derecho sobre la ventana de proyección.

**percepción visual:** capacidad de interpretar la información sensorial que llega al ojo para transformarla y producir experiencias de profundidad, tamaño, forma, orientación, color, etc.

**Realidad Virtual:** representación de escenas u objetos producidos por un sistema informático, dando la sensación de su existencia real.

**Sistema Visual Humano:** Agrupa todos los elementos necesarios para lograr el sentido de la vista.

**visión binocular:** posibilidad de percibir el mundo desde diferentes puntos de vista debido a que se tiene una separación de alrededor de seis centímetros entre los dos ojos, esta diferencia permite la percepción de profundidad, también se conoce como visión estereoscópica.

**visualización estereoscópica:** simulación de la visión estereoscópica por computadora.

## B. Acrónimos

**AV** agudeza visual

**API** Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, del inglés *Application Program Interface*)

**CAD** Diseño Asistido por Computadora (*CAD*, del inglés *Computer Aided Design*)

**CAVE** Cuevas de Realidad Virtual (*CAVE*, del inglés *Computer-Animated Virtual Environment*)

**GLSVe** *Graphics Library for Stereoscopic Vision engine*

**GLSV** *Graphics Library for Stereoscopic Vision*

**HDSVE** Herramientas de Desarrollo para Sistemas de Visión Estereoscópica

**HVS** Sistema Visual Humano (*HVS*, del inglés *Human Visual System*)

**HMD** Cascos de Realidad Virtual (*HMD*, del inglés *Head Mounted Display*)

**LCD** Lentes de Cristal Líquido (*LCD*, del inglés *Liquid Crystal Display*)

**PNG** *Portable Network Graphics*

**PC** *Personal Computer*

**SDL** *Simple Direct Media Library*

**RV** Realidad Virtual

**UCI** Universidad de las Ciencias Informáticas

**VE** visión estereoscópica

**XML** lenguaje de marcas extensible (*XML*, del inglés *eXtensible Markup Language*)

**3D** tres dimensiones