

IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS APLICADAS A LA REPRESENTACIÓN ARQUITECTÓNICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Tesis Doctoral de:
Pedro M. Cabezos Bernal

Director:
Juan José Cisneros Vivó

Noviembre 2014

A mis abuelos Pedro, Carmen, Isabel y Manuel

In memoriam

INDICE

AGRADECIMIENTOS	15
RESÚMENES	21
Resumen.....	23
Resum.....	25
Abstract.....	27
1. INTRODUCCIÓN	29
1.1. Motivación y justificación	31
1.2. Objetivos	37
1.3. Metodología	38
1.4. Contenidos	39
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	41
2.1. Primeras teorías acerca de la visión.....	43
2.1.1. Los griegos	43
2.1.2. La edad de oro del islam.....	47
2.2. El descubrimiento de la perspectiva	50
2.3. Visión binocular y Relieve	58
3. EL SISTEMA VISUAL	67
3.1. Fisiología del sistema visual	69
3.1.1. Estructura del ojo humano	70
3.1.2. Acomodación	72
3.1.3. Vergencia.....	73
3.1.4. El Horóptero.....	73
3.1.5. Áreas y espacios fusionales de Panum.....	76
3.1.6. La vía visual	77
4. LA PERCEPCIÓN DEL RELIEVE	83
4.1. Claves oculomotrices	85
4.1.1. Convergencia Ocular	85
4.1.2. Acomodación	85

4.2. Claves monoculares	86
4.2.1. Claves Pictóricas	86
4.2.2. Claves dinámicas	94
4.3. Claves binoculares	96
4.3.1. Disparidad retinal	96
5. LAS ILUSIONES ÓPTICAS.....	103
5.1. Ilusiones debidas a causas físicas.....	107
5.1.1. Causa física relacionada con fenómenos ópticos.....	107
5.1.2. Causa física relacionada con la codificación de las señales	110
5.2. Ilusiones debidas a causas cognitivas	117
5.2.1. Causa cognitiva derivada de la interpretación de las reglas perceptivas..	117
5.2.2. Causa cognitiva relacionada con conocimiento previo de los objetos	124
5.3. Ilusiones fuera de la clasificación de Gregory.....	131
6. LA ANAMORFOSIS. HISTORIA Y EVOLUCIÓN	133
6.1. La anamorfosis.....	137
6.2. La perspectiva sólida.....	138
6.3. Los tratados del Barroco y la pintura cuadraturista	141
6.4. Los panoramas del XIX	149
6.5. Las anamorfosis contemporáneas.....	150
6.6. Anamorfosis estereoscópica.....	156
7. LA ESTEREOSCOPIA	159
7.1. El estereoscopio reflector de Wheatstone	161
7.2. Condiciones de visionado. La ventana estereoscópica.....	162
7.3. El par estereoscópico	164
7.3.1. Los dibujos estereoscópicos	164
7.3.2. La invención de la fotografía y su aplicación a la estereoscopia	166
7.4. El estereoscopio de Brewster y Holmes. La popularización de la estereoscopia	168
7.5. Primeras consideraciones prácticas	175
7.5.1. El segundo artículo de Wheatstone.....	175
7.5.2. El libro de Sir David Brewster.....	179

7.5.3. El libro de Antoine Claudet.....	183
7.6. Publicaciones posteriores.....	193
7.7. El paralaje y sus tipos.....	197
8. EL CONFORT VISUAL.....	201
8.1. Principales causas de incomodidad y fatiga visual	203
8.1.1. Excesos de paralaje.....	203
8.1.2. El conflicto entre acomodación y vergencia	204
8.1.3. Los defectos accidentales de la toma	205
8.1.4. El efecto Keystone	205
8.1.5. Las interferencias o Ghosting.....	206
8.1.6. El parpadeo o Flickering	207
8.1.7. La rivalidad retiniana.....	207
8.1.8. Las discrepancias de profundidad de campo	208
8.1.9. Las incongruencias perceptivas. Violación de la ventana estéreo.....	208
8.2. La zona de confort visual.....	209
9. LA TOMA ESTEREOSCÓPICA	217
9.1. Las condiciones de visualización.....	219
9.1.1. La distancia de observación.....	220
9.1.2. La distancia interpupilar media.....	222
9.1.3. El ángulo de visión.....	223
9.1.4. La convergencia ocular	223
9.2. El planteamiento estereoscópico.....	224
9.3. El margen de profundidad confortable	225
9.4. Las condiciones de campo	227
9.1.5. El encuadre.....	227
9.1.6. La distancia Focal.....	227
9.1.7. La distancia de campo próxima y lejana	228
9.1.8. La separación entre cámaras o distancia base	228
9.1.9. Converger o no los ejes ópticos	231
9.5. Procesos de Postproducción digital.....	233
9.1.10. La translación del caso paralelo.....	233

9.1.11. El recorte final.....	233
9.6. La ficha de datos y cálculos.....	235
9.7. Ejemplo de aplicación.....	236
10. LAS DISTORSIONES VOLUMÉTRICAS.....	241
10.1. Las aberraciones ópticas.....	243
10.1.1. La distorsión radial.....	244
10.1.2. La distorsión tangencial.....	245
10.1.3. Las aberraciones cromáticas.....	245
10.2. Calibración de la cámara.....	246
10.2.1. La fotografía de referencia.....	246
10.2.2. El proceso de calibrado.....	248
10.3. La disposición deficiente del par.....	250
10.3.1. La escala inadecuada.....	250
10.3.2. La alteración del paralaje.....	253
10.4. Las desviaciones en la posición del observador.....	256
10.4.1. Posición adelantada o retrasada.....	256
10.4.2. Posición ladeada.....	257
10.4.3. Posición superior o inferior.....	258
10.4.4. Posiciones genéricas.....	260
11. LOS MEDIOS DE REPRODUCCIÓN Y VISIONADO ACTUALES.....	261
11.1. La visión libre.....	263
11.1.1. La visión libre paralela.....	264
11.1.2. La visión libre cruzada.....	265
11.2. Los estereoscopios modernos.....	267
11.3. Los anaglifos.....	269
11.4. Los sistemas de luz polarizada.....	272
11.5. Los sistemas activos.....	275
11.6. Los visores personales.....	276
11.7. La estereoscopia a través de Internet.....	279
11.8. Los sistemas autoestereoscópicos.....	280
12. LA EDICIÓN DE MATERIAL ESTEREOSCÓPICO.....	285

12.1. Los formatos soportados por los televisores y dispositivos 3D	287
12.1.1. Los formatos estáticos	287
12.1.2. Los formatos de video.....	291
12.2. Material para pantallas convencionales y el medio impreso	292
12.3. Edición y montaje de imágenes con StereoPhoto Maker.....	292
12.4. Edición y montaje de videos con StereoVideo Maker	295
12.5. La edición de videos estereoscópicos para YouTube	296
13. LA IMPRESIÓN DE LOS ANAGLIFOS	299
13.1. El problema de la concordancia del color	301
13.2. La optimización de los anaglifos para el medio impreso	304
14. LOS DIBUJOS ESTEREOSCÓPICOS	311
14.1. Los dibujos para el estereoscopio	313
14.2. Los dibujos estereoscópicos en la Geometría Descriptiva	318
14.2.1. Les Anaglyphes Géométriques de H. Vuibert.....	321
14.2.2. El álbum de anaglifos de Francisco Herrera Oria	328
14.2.3. Las láminas estereoscópicas de Gianni y Mario Gliozzi	333
14.2.4. Los anaglifos en negro de José Estevan Clavillar	336
14.2.5. Mathematische Raumbilder. La perfección alemana	340
14.2.6. Geometría Descriptiva y sus aplicaciones de Ángel Taibo	347
14.2.7. John T. Rule. La practicidad americana	353
14.2.8. Ernst Schörner, el continuador de la escuela alemana.....	356
14.2.9. Geometría Descriptiva con figuras estereoscópicas de Imre Pál.....	363
14.2.10. Las publicaciones de Helmut Mucke	368
14.2.11. Dibujo Técnico con Dibujos Anaglíficos de José Pérez Sáez	373
14.2.12. Las figuras estereoscópicas de Rudolf Schmidt	376
14.2.13. Otra forma de ver el Sistema Diédrico de Santiago Martín et al.	380
14.2.14. Resumen de datos obtenidos.....	384
15. LAS APLICACIONES CIENTÍFICAS DE LA ESTEREOSCOPIA.....	385
15.1. La experiencia astronómica de Piazzzi Smyth en Tenerife.....	387
15.2. Las fotografías astronómicas de Warren de la Rue	391
15.3. Adolphe Neyt y las estructuras laminares de Plateau	393



15.4. La estereoscopia y la fotogrametría.....	400
15.5. Santiago Ramón y Cajal.....	407
15.6. Demetrio Ribes y su cámara estereoscópica.....	415
16. LA FOTOGRAFÍA ESTEREOSCÓPICA DEL s. XIX EN VALENCIA	425
16.1. El contexto urbanístico	428
16.2. La industria fotográfica estereoscópica.....	434
16.3. Los editores Gaudin et frère	437
16.4. Los Editores Ferrier père et fils et Soulier.....	440
16.5. Ernest Lamy	443
16.6. Eugenio Jouliá y los Hermanos Fárvaro	445
16.7. Jean Andrieu	454
16.8. Jean Laurent	456
16.9. Frank M. Good	461
16.10. León et Lévy.....	462
16.11. José Esplugas Puig.....	467
16.12. Resumen de resultados.....	468
16.13. Selección de vistas recuperadas	468
17. LOS PANORAMAS ESFÉRICOS ESTEREOSCÓPICOS	495
17.1. Panoramas de toma única.....	497
17.1.1. Panoramas por recorte	497
17.1.2. Panoramas con objetivos gran angular	499
17.1.3. Panoramas con cámaras especiales.....	501
17.1.4. Panoramas catóptricos	505
17.2. Panoramas de varias tomas.....	506
17.2.1. Panografías	506
17.2.2. Panoramas mediante software de cosido o stitching.....	509
17.2.3. Requisitos y recomendaciones para la captura de las imágenes	512
17.3. El método de captura estereoscópico.....	514
17.4. Los problemas de visualización.....	520
17.5. Desarrollo de un visor específico.....	521
18. CONCLUSIONES Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	523

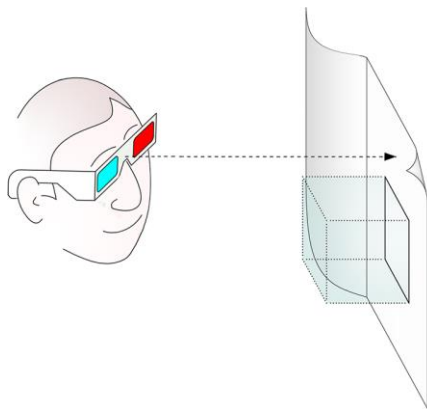
18.1. Conclusiones.....	525
18.2. Conclusions.....	527
18.3. Nuevas líneas de investigación	529
18.4. Ejemplos de aplicación.....	530
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	551


Dejen que su cerebro o sus ojos les engañen, abandónense a la reflexión, ya que tal como afirmaba Wheatstone, inventor del primer estereoscopio, ¿ no es contemplar pensar ?

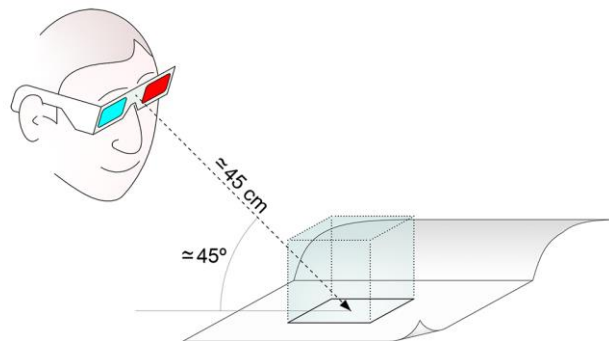
María Villamayor


Nota acerca de la visualización de los anaglifos:

En esta tesis se reproducen las imágenes estereoscópicas mediante el método de los anaglifos, por lo que para su visualización es necesario utilizar las gafas especiales con filtro de color rojo/cian que se incluyen con esta publicación. Las figuras estereoscópicas llevarán en el pie de figura el símbolo:  , cuando se trate de una anaglifo para visualizar frontalmente, mientras que se mostrará el símbolo:  , cuando se trate de un anaglifo anamórfico, que deberá contemplarse oblicuamente. Dependiendo del tipo, las imágenes deberán visualizarse según el esquema siguiente:



Anaglifo frontal, símbolo: 



Anaglifo Anamórfico símbolo: 

AGRADECIMIENTOS

Quisiera en primer lugar nombrar a aquellas personas que, además de contribuir a mi formación como Profesor y Arquitecto, han dejado una huella imborrable y me han aportado tanto conocimiento, empezando por mi querido profesor de Geometría Descriptiva D. Felipe Soler Sanz, quien me enseñó magistralmente los principios de la disciplina a la que me dedico, que, aunque ya jubilado, ha tenido una implicación muy activa en esta Tesis, dándome sabios consejos y prestándome alguno de sus valiosos libros para su estudio.

Uno de los pilares fundamentales ha sido mi director de Tesis, compañero de asignatura y gran amigo, Juan José Cisneros Vivó, que ha sido mi mentor desde que lo tuviera como profesor en los cursos de doctorado, en los que logró fascinarme con su enfoque tan innovador y su carisma como profesor. Juan es una persona de gran talento, sensibilidad y sentido crítico, de la que trato de aprender todos los días, por ello sus observaciones y consejos me han sido siempre de gran utilidad para mejorar esta Tesis.

A Pablo Navarro, Director del Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica, le debo muchas cosas, entre ellas su apoyo y disponibilidad para cualquier cosa que he necesitado, además de haberme prestado material fotográfico estereoscópico de su colección privada. A través de Pablo he contactado con otras personas que han resultado ser claves en el desarrollo de la Tesis, como el excelente historiador de la fotografía D. José Huguet al que estaré eternamente agradecido por poner a mi disposición su increíble archivo fotográfico, en el que he podido encontrar muchas de las joyas fotográficas que incluye esta Tesis, además de sus publicaciones, que han sido de gran ayuda para la documentación histórica. También por mediación de Pablo he podido conocer al diseñador Andreu Alfaro Hofmann, hijo de escultor Andreu Alfaro, al que doy las gracias por permitirme fotografiar las extraordinarias esculturas de su padre, que constituyen un tema inmejorable para la aplicación de las técnicas estereoscópicas desarrolladas en la Tesis.

Quiero dar mi agradecimiento al historiador malagueño Juan Antonio Fernández Rivero, por sus interesantes aportaciones bibliográficas y consejos surgidos de las conversaciones que hemos tenido y también por prestarme algunas de las fotografías de su imponente colección personal. Su excelente libro *Tres dimensiones en la historia de la fotografía. La imagen estereoscópica* (Fernández, 2004) es, sin duda, el manual más completo sobre la historia de la fotografía estereoscópica en España. Del mismo modo quiero dar la gracias a otros dos grandes historiadores de la fotografía estereoscópica en España; el arquitecto granadino Carlos Sánchez, comisario, junto a Javier Piñar, de la exposición, *Una imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*, por haberme prestado alguna de las imágenes de su colección y a Carlos Teixidor, del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), por su

ayuda para acceder al archivo Ruiz Vernacci y por sus sabios consejos y aportaciones bibliográficas.

Por haberme prestado fotografías de su colección privada, doy también las gracias a Francisco Javier Sánchez Portas, Director del Arxiu Històric de la Comunitat Valenciana, al coleccionista Juanjo Díaz Prósper, a Toni Blanc y a la empresa Heyphotos, por las fotografías estereoscópicas inéditas de Demetrio Ribes. A Danny Segers, director del Museo de la Historia de la Ciencia de la Universidad de Gante, por haberme proporcionado las fotografías estereoscópicas inéditas de A. Neyt. También al prestigioso arquitecto Oscar Tusquets y su colaboradora Pilar Pardal, por su interés y aportación de los dibujos y fotografías de la Sala Mae West.

Quiero agradecer a mis colegas italianos de la Universidad de Roma “La Sapienza”, profesores Francesco Paulo Fiore, Riccardo Migliari, Marco Fasolo, Graziano Valenti, Leonardo Baglioni, Jessica Romor y Marta Salvatore, por haber hecho que mi estancia de investigación en Roma fuera una de las mejores y más enriquecedoras experiencias profesionales de mi carrera.

Al programador Hector Castillo, por el desarrollo de la aplicación para la plataforma Android y al Profesor Graziano Mario Valenti, por su ayuda con la programación, todavía en desarrollo, del visor para los panoramas esféricos estereoscópicos.

Por facilitarme el acceso y permitirme el uso de trípode para realizar los panoramas esféricos de los principales monumentos de Roma, doy las gracias encarecidamente al Padre Trinitario Vicente Basterra, Rector de la Iglesia de San Carlo alle quattro fontane, al Padre Bonani, de la Iglesia de Sant'Ivo alla Sapienza, al Hermano Jesuita Marco Ciavarella, de la Iglesia de Sant'Ignazio, al Padre Libanori, Rector de la iglesia del Gesù, a José Antonio Bordallo, Director de la Real Academia de España en Roma, por su permiso para fotografiar el Tempietto de Bramante, a la Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici per il Comune di Roma, por el permiso para el Panteón y al Profesor de la Universidad de Trieste Alberto Sdegno por sus gestiones para el permiso en el Teatro Olímpico de Palladio en Vicenza.

Mi agradecimiento a los archivistas y bibliotecarios M^o José Rodríguez, del archivo fotográfico de la Diputación de Valencia, coautora del valiosísimo Directorio de Fotógrafos de España (1851-1936) (Rodríguez & Sanchis, 2013), por su excelente trato y consejos, igualmente a Rosa Olmedo, de la Fototeca de la Biblioteca Valenciana, y a Mariano Mínguez, bibliotecario en la Escuela de Bellas Artes de la UPV, por compartir su pasión y entusiasmo por la estereoscopia y por avisarme siempre que entra un nuevo libro que pueda tener interés para la Tesis. También a Vicente Estornell y M^a Teresa Sánchez, del servicio de préstamo interbibliotecario de la UPV, por su diligencia en los trámites con esos libros difíciles de conseguir.

Corresponder también a mis compañeros Julio Albert, responsable de asignatura y Secretario del Departamento, por su apoyo y diligencia con los trámites administrativos, junto con las Secretarías Nuria Portoles, Julia Gil y M^a José Aloy. También al operador José Manuel Ruiz, por haberme dejado su mejor escáner durante tanto tiempo y a mis compañeros, especialistas en el color, Ángela García, Juan Serra, Ana Torres y Nacho Cabodevilla, por someterse a mis test visuales y proporcionarme su valiosa opinión. A Hugo Barros, compañero en la campaña romana, por documentar con su cámara el proceso de captura de los panoramas y a Pablo Rodríguez y Teresa Gil por su asesoramiento en los procedimientos administrativos.

Quiero agradecer de todo corazón a Antonio y Paquita, mis padres, por toda su ayuda, generosidad, cariño y dedicación con la que han revisado los textos y por tantas otras aportaciones que sólo unos grandes padres pueden ofrecer.

Mención muy especial para Arantxa, mi excepcional mujer, por su amor y apoyo incondicional y por haber soportado con abnegación el desequilibrio en la balanza de las tareas familiares durante todos estos años en los que he desarrollado la Tesis y por su entereza para sobrellevarlo todo durante mi estancia de investigación en Roma, además de haberme sido de gran ayuda en la revisión de los textos.

Finalmente quiero dar un agradecimiento también muy especial a mis hijos Daniel y Ana que siempre han estado atentos y deseosos de ver las imágenes estereoscópicas que les mostraba y que tan bien se han portado cuando el papá tenía que concentrarse.

RESÚMENES

Resumen

El uso de los métodos estereoscópicos añade una nueva dimensión a las representaciones y amplía el conocimiento del objeto representado, a la vez que despierta el interés del espectador por aquello que visualiza. Sin embargo, las técnicas estereoscópicas, que tuvieron su origen hace casi dos siglos, son actualmente poco conocidas y apenas se utilizan en el campo científico y docente, pues parece como si sólo estuvieran en manos de los gurús de la industria cinematográfica y sus fundamentos hubieran caído en el olvido, precisamente en un momento en el que las nuevas tecnologías nos abren un mundo de posibilidades.

En esta Tesis se pretende aglutinar los aspectos históricos y técnicos de la estereoscopia en un documento único, que pueda servir de ayuda a todos aquellos que quieran incorporarla como una vía complementaria de expresión, tanto en el campo de la divulgación científica, como en el docente. Por este motivo no se aborda sólo una cuestión específica, sino que se pretende ofrecer una visión global del problema estereoscópico y resolver una serie de carencias particulares, detectadas con la práctica de la estereoscopia, realizando aportaciones propias tanto desde el punto de vista técnico, como del histórico.

Es importante contextualizar los contenidos, analizando los antecedentes y su historia, empezando por los protagonistas y las aportaciones más relevantes. Resulta igualmente necesario prestar especial atención a los aspectos psicofisiológicos de la visión, que resultan determinantes en el fenómeno de la percepción estereoscópica, teniendo en cuenta los estudios más relevantes en el campo del confort visual.

Todo ello permite identificar los parámetros clave de la percepción estereoscópica y los factores que pueden inducir distorsiones perceptivas; a partir de ellos se diseña una metodología de captura estereoscópica propia para establecer los parámetros óptimos, que garanticen una experiencia de visualización confortable y eviten las distorsiones perceptivas del modelo representado.

Se analizan también los medios de reproducción y visionado actuales, estudiando los formatos multimedia compatibles con los modernos televisores 3D y las plataformas de distribución de contenido estereoscópico a través de internet. A raíz de este análisis se aporta una metodología eficaz y práctica, basada en software libre, para elaborar y editar material estereoscópico propio, ya sean imágenes estáticas o vídeos.

Los panoramas esféricos se han convertido en un recurso muy apreciado en la representación arquitectónica y en las técnicas de realidad virtual, pero nunca antes se había planteado una versión estereoscópica de este tipo de imágenes panorámicas. Por ello, se ha diseñado un método de captura fotográfica que permite obtener

panoramas esféricos estereoscópicos y se han desarrollado los algoritmos necesarios para poder elaborar un visor específico con el que visualizarlos de manera efectiva.

Se ha realizado una profunda búsqueda bibliográfica y un análisis comparativo de las publicaciones estereoscópicas relacionadas con la expresión gráfica. También se han destacado varios de los escasos ejemplos de aplicación en el campo científico, sacando a la luz algunos casos inéditos.

Por último, se ha llevado a cabo un minucioso estudio documental, para tratar de censar y obtener las fotografías estereoscópicas de Valencia, publicadas por los editores comerciales del siglo XIX. Ello permitirá recuperar la memoria de diversos elementos arquitectónicos desaparecidos y conocer los aspectos urbanos de este periodo, en visión estereoscópica.

Resum

L'ús dels mètodes estereoscòpics afegia una nova dimensió a les representacions i amplia el coneixement de l'objecte representat, al mateix temps que desperta l'interès de l'espectador per allò que visualitza. No obstant això, les tècniques estereoscòpiques, que van tindre el seu origen fa quasi dos segles, són actualment poc conegudes i a penes s'utilitzen en el camp científic i docent, perquè pareix com si només estigueren en mans dels gurus de la indústria cinematogràfica i els seus fonaments hagueren caigut en l'oblit, precisament en un moment en què les noves tecnologies ens obrin un món de possibilitats.

En esta Tesi es pretén aglutinar els aspectes històrics i tècnics de l'estereoscòpia en un document únic, que puga servir d'ajuda a tots aquells que vullguen incorporar-la com una via complementària d'expressió, tant en el camp de la divulgació científica, com en el docent. Per aquest motiu no s'aborda només una qüestió específica, sinó que es pretén oferir una visió global del problema estereoscòpic i resoldre una sèrie de carències particulars, detectades amb la pràctica de l'estereoscòpia, realitzant aportacions pròpies tant des del punt de vista tècnic, com de l'històric.

És important contextualitzar els continguts, analitzant els antecedents i la seua història, començant pels protagonistes i les aportacions més rellevants. Resulta igualment necessari prestar especial atenció als aspectes psicofisiològics de la visió, que resulten determinants en el fenomen de la percepció estereoscòpica, tenint en compte els estudis més rellevants en el camp del confort visual.

Tot això permet identificar els paràmetres clau de la percepció estereoscòpica i els factors que poden induir distorsions perceptives; a partir d'ells es dissenya una metodologia de captura estereoscòpica pròpia per a establir els paràmetres òptims, que garantisquen una experiència de visualització confortable i eviten les distorsions perceptives del model representat.

S'analitzen també els mitjans de reproducció i visionat actuals, estudiant els formats multimèdia compatibles amb els moderns televisors 3D i les plataformes de distribució de contingut estereoscòpic a través d'internet. Arran d'esta anàlisi s'aporta una metodologia eficaç i pràctica, basada en programari lliure, per a elaborar i editar material estereoscòpic propi, ja siguin imatges estàtiques o vídeos.

Els panorames esfèrics s'han convertit en un recurs molt apreciat en la representació arquitectònica i en les tècniques de realitat virtual, però mai abans s'havia plantejat una versió estereoscòpica d'aquest tipus d'imatges panoràmiques. Per això, s'ha dissenyat un mètode de captura fotogràfica que permet obtindre panorames esfèrics estereoscòpics i s'han desenrotllat els algorismes necessaris per a poder elaborar un visor específic amb què visualitzar-los de manera efectiva.

S'ha realitzat una profunda busca bibliogràfica i una anàlisi comparativa de les publicacions estereoscòpiques relacionades amb l'expressió gràfica. També s'han destacat alguns dels escassos exemples d'aplicació en el camp científic, traient a la llum alguns casos inèdits.

Finalment, s'ha dut a terme un minuciós estudi documental, per a tractar de censar i obtenir les fotografies estereoscòpiques de València, publicades pels editors comercials del segle XIX. Això permetrà recuperar la memòria de diversos elements arquitectònics desapareguts i conèixer els aspectes urbans d'aquest període, en visió estereoscòpica.

Abstract

The use of stereoscopic methods brings about a new dimension to representations and improves the understanding of the represented object, thus increasing the viewer's interest in what he can see. However, stereoscopic techniques, which were first used almost two centuries ago, are still quite unknown and rarely used in scientific fields or in teaching. It seems as if stereoscopic techniques were only in the hands of the gurus of the cinema industry and if its foundations basics had been forgotten, just in a moment in history when new technologies are opening a whole new world of possibilities.

This thesis aims at putting together the historical and technical aspects of stereoscopy in a single document that could become a guide for those who want to incorporate stereoscopy as a complementary way of expression in any field of science or in teaching. For this reason, the focus of this study is not on one single specific matter, but on providing an overview of the stereoscopy problem and on sorting out some particular shortcomings that have been identified in the practice of stereoscopy, making new contributions from both a technical and a historical point of view.

It is important to contextualize contents, analyzing their background and history, starting with the main protagonists and their most relevant contributions. It is also necessary to pay special attention to the psychophysiological aspects of vision, which are determinant in the phenomenon of stereoscopic perception, always taking into consideration the most relevant studies in the field of visual comfort.

All this should make it possible to identify the key parameters in stereoscopic perception and the factors that may cause perceptual distortions. Bearing these in mind, a new methodology of stereoscopic capture has been designed to establish the optimal parameters, which should ensure a comfortable viewing experience without any perceptual distortions.

Current 3D displays and their supported media formats have also been analyzed. That is the case of modern 3D TVs and websites specialized on showing stereoscopic contents over the net. As a result, an effective and practical methodology, based on free software, has been provided. This should allow anyone to prepare and edit stereoscopic contents either in the form of images or videos.

Spherical panoramas have become highly appreciated in architectural representation and virtual reality techniques, but a stereoscopic version of this type of panoramic images had never been considered before. That's why, a method to capture stereoscopic spherical panoramas has been designed. The considerations to develop a specific viewer have also been highlighted.

A thorough bibliographic search has been carried out, as well as a comparative analysis of the publications with stereoscopic drawings related to graphical expression. Some examples of the few early applications of stereoscopy to science have also been highlighted, bringing to light some inedited cases.

Finally, some research has been done to get the stereoscopic photographs of the city of Valencia taken by some commercial publishers in the nineteenth century. These photographs will recover the memory of various lost architectural monuments, and the city urban features of this period will be shown in stereoscopic vision.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y justificación

Los libros son una fuente de conocimiento primordial, especialmente los buenos, que sacian nuestras ansias de saber al igual que el agua calma nuestra sed. A menudo salimos a la búsqueda de ese libro que resuelva nuestras incertidumbres sobre un tema concreto, mientras que, en ocasiones, vienen ellos a nuestro encuentro casi por casualidad, de manera fortuita.

Quizá sean estos libros que no te esperabas y que te han maravillado, enseñándote algo totalmente desconocido para ti, los que más recuerdas a lo largo de tu vida, pudiendo llegar a influir en tus decisiones e intereses posteriores.

Con esto me estoy refiriendo, especialmente, a un libro que cayó en mis manos, siendo un niño, cuando mi padre lo trajo a casa. Este libro no era otro que *“Geometría Descriptiva con Figuras Estereoscópicas”* de Rudolf Schmidt. (Schmidt, 1983)

Por aquel entonces, yo no sabía nada de Geometría pero me quedé fascinado de aquellas figuras geométricas que salían de aquel libro, como por arte de magia, gracias a aquellas gafas de colores. Pasaba las horas muertas contemplando e intentando coger con la mano aquellos dibujos tan extraños para mí, pero tan fascinantes a la vez.

Casualidad o no, lo cierto es que hoy soy profesor de Geometría Descriptiva y estoy dedicando mi tesis doctoral a esa “Magia” que me regaló mi padre al traer aquel maravilloso libro a casa.

Aquello que llamó tanto mi atención no era otra cosa que el efecto estereoscópico, o ilusión de relieve, que se produce al poner ante nuestra vista dos imágenes, ligeramente distintas, correspondientes a cada uno de los ojos, de forma que cada ojo ve aquella que le corresponde y no la otra. Estas imágenes pueden ser dibujos en perspectiva cónica o fotografías de la escena tridimensional, cuyo relieve se pretende evocar. Las imágenes han de ser realizadas convenientemente y constituyen lo que se conoce como par estereoscópico o estereograma. Existen diversos medios y técnicas para conseguir reproducir y visualizar correctamente estas imágenes para recrear, de este modo, el efecto estereoscópico en la mente del observador. Al conjunto de estas técnicas se les llama estereoscopia.

El uso de los métodos estereoscópicos añade una nueva dimensión a las representaciones y complementa el conocimiento del objeto representado, además de producir en el espectador una motivación adicional e interés por aquello que visualiza, hecho que resulta patente desde los inicios de la fotografía, cuando causaban furor aquellos estereoscopios de madera con los que visualizar colecciones de pares

estereoscópicos capaces de entretener y teletransportar al espectador a lugares fascinantes.

La estereoscopía se ha utilizado muy poco en el campo científico, aunque ha habido ilustres científicos y personajes del mundo del arte y la arquitectura que han sabido apreciar el potencial de las imágenes estereoscópicas. En el campo de la arquitectura tenemos un ejemplo muy cercano como es el del arquitecto valenciano Demetrio Ribes, muy aficionado a la fotografía que, con su cámara estereoscópica Verascope, realizó diversos pares estereoscópicos, de la arquitectura valenciana de principios del siglo XX, que han sido motivo de la exposición: *La mirada de l'arquitecte. Demetrio Ribes y la seua càmera estereoscòpica*, celebrada en 2007 en la Universidad de Valencia, de la que se ha realizado también una publicación (Ribes, 2007).



Fig. 1.1. Fotografía de Demetrio Ribes en el Palau de la Música Catalana. Aparece en la parte superior junto al arquitecto Francisco Mora y su esposa



Otro claro ejemplo es el del ilustre científico Santiago Ramón y Cajal, apasionado de la fotografía y gran conocedor de las técnicas estereoscópicas, publicó en 1918 *La microfotografía estereoscópica y biplanar del tejido nervioso* (Ramón y Cajal, 1918), esta obra contiene numerosos pares estereoscópicos del sistema neuronal que, con toda certeza, contribuyen a mejorar la comprensión de las formas representadas (Fig. 1.2).

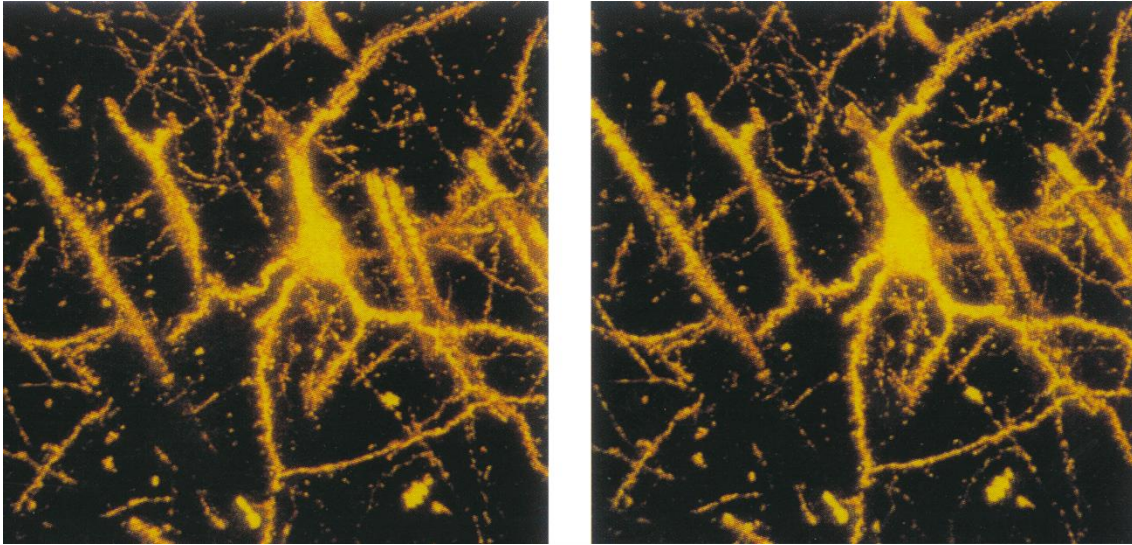


Fig. 1.2. Santiago Ramón y Cajal, 1918, Par estereoscópico de una célula cortical piramidal.

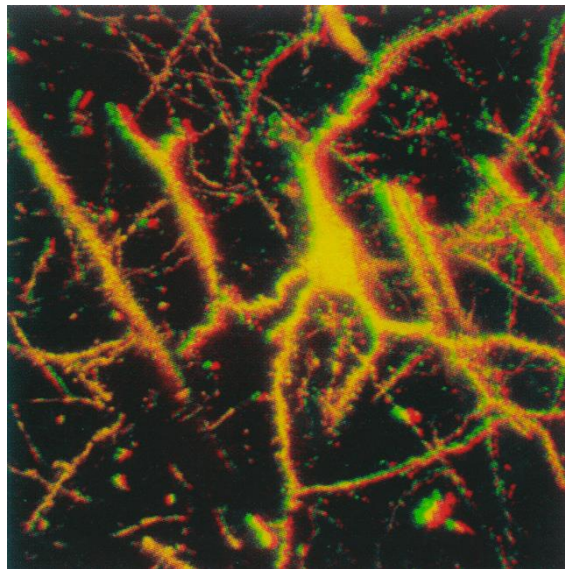


Fig. 1.3. Anaglifo realizado a partir del par estereoscópico anterior para visualizar el efecto estereoscópico, usando las gafas de filtro rojo-cyan. Pedro Cabezos



En el mundo del arte encontramos artistas como Marcel Duchamp, del que se conoce algún intento de dibujo estereoscópico como el *Anaglifo de chimenea* de 1968 (Fig. 1.4), que denota un interés por el tema, aunque no consigue evocar el efecto tridimensional.

Duchamp pidió a su amigo y colaborador, el excepcional fotógrafo Man Ray, que realizara fotografías estereoscópicas de alguna de sus obras que incluyó en su *Boîte in valise* de 1941 (Fig. 1.4).

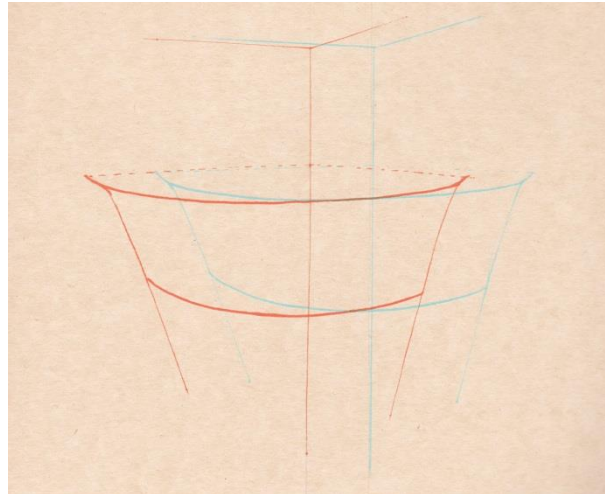


Fig. 1.4. Marcel Duchamp, *Anaglifo de chimenea*, 1968

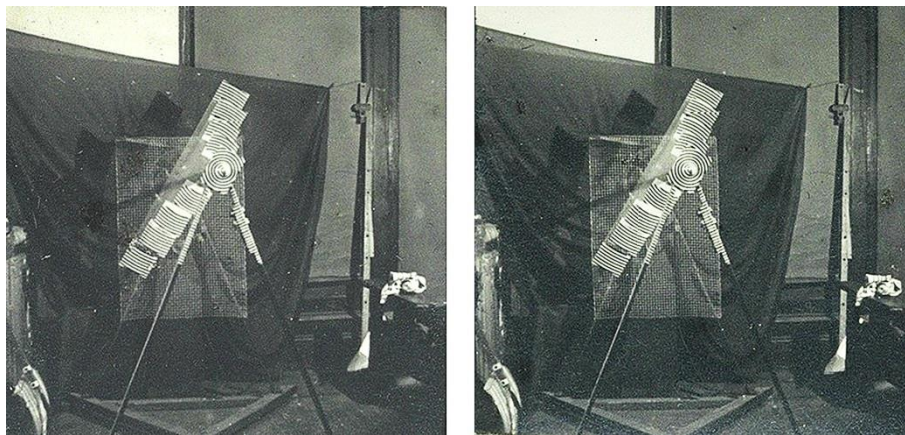


Fig. 1.5. Man Ray, 1920, *Rotary Glass Plates*, fotografía estereoscópica

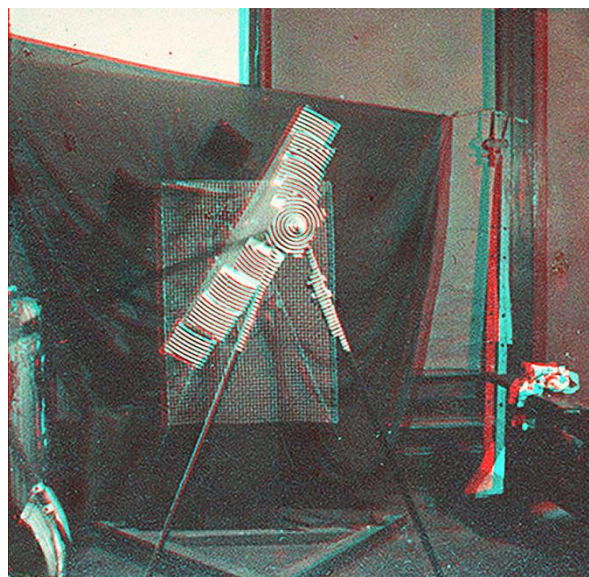


Fig. 1.6. Versión en anaglifo del par realizado por Man Ray. Pedro Cabezos



El genial pintor Salvador Dalí, sí que fue capaz de realizar verdaderas pinturas estereoscópicas. En su objeto-libro *Dix Recettes d'Inmortalité* de 1973, Dalí se refiere a la visión estereoscópica como la Santísima Trinidad, siendo el ojo derecho, el Padre, el izquierdo, el Hijo y el cerebro, el Espíritu Santo. De su talento surgen obras como las que se muestran a continuación, realizadas entre los años 1974 y 1978.



Fig. 1.7. Salvador Dalí, *Pie de Gala*, 1974, Museo de Figueras. Cuadro izquierdo y derecho



Fig. 1.8. Salvador Dalí, *Cristo de Gala*, 1978, Museo de Figueras. Cuadro izquierdo y derecho

También encontramos a pintores contemporáneos como el coruñés Víctor Lopez-Rua o como el artista digital californiano Theo Prins, que realizan pinturas estereoscópicas.

Actualmente vivimos un momento de apogeo de la estereoscopia, sobre todo, en el mundo del cine, hecho que se ha venido repitiendo, a lo largo de la historia, cuando se han producido avances en los medios de reproducción y visionado. Sin embargo, los

conocimientos de las técnicas que permiten desarrollar material estereoscópico, parecen pertenecer a esos artistas que logran la magia del cine y son prácticamente desconocidos en el ámbito docente e investigador donde, sin duda, tienen una gran aplicación.



Fig. 1.9. Versión en anaglifo de los cuadros de Salvador Dalí *Pie de Gala* (izda.) y *Cristo de Gala* (dcha.)
Pedro Cabezos



Deseo que el desarrollo de la tesis me permita desvelar los secretos de la estereoscopía y poder contagiar al lector mi interés por el tema, pero, por mucho que logre entender su funcionamiento, la estereoscopía siempre tendrá para mí algo de... “Magia”.

1.2. Objetivos

La estereoscopia parte de conceptos muy básicos que, a priori, parecen fáciles de controlar, pero cuando uno estudia detenidamente la cuestión, se da cuenta de que saber combinar bien los parámetros no es nada sencillo, si se quiere obtener un resultado excelente. El éxito de un buen estereograma depende de muchos factores, los fisiológicos que tienen que ver con las características físicas de nuestro sistema visual, los psicofisiológicos, relacionados con las teorías de la percepción, y, por supuesto, el control de los aspectos técnicos de los diversos métodos de reproducción y visionado.

Esta tesis me brinda la oportunidad de meterme de lleno en un tema que me ha apasionado desde niño para, en primer lugar, aclarar todas las dudas que siempre he tenido y poder realizar un trabajo de investigación coherente y profundo, que sintetice todo aquello que cualquiera necesitaría saber para realizar un buen material estereoscópico. En segundo lugar, mi gran reto es poder realizar alguna aportación personal y novedosa en el campo de la estereoscopia dando solución a algunos problemas, todavía por resolver como la optimización de los anaglifos para la impresión y una metodología que permita realizar panoramas estereoscópicos esféricos.

Después de haber leído mucho sobre el tema, me he dado cuenta de que gran parte de la información es superficial, dispersa y en muchos casos errónea. La mayoría de los libros se centran en ofrecer un resultado final y están orientados a un público amateur, por lo que no profundizan lo suficiente, mientras que otros se han quedado obsoletos con respecto a las nuevas tecnologías. Por tanto es necesario hacer una selección de material y sintetizar en un único volumen aquello que considero indispensable para adquirir un conocimiento global del tema.

Resulta de suma importancia el análisis de los últimos estudios en el campo del confort visual, pues a partir de ellos se pueden desarrollar nuevas metodologías de captura estereoscópica que produzcan resultados confortables para el espectador y no causen efectos de astenopia o fatiga visual.

Existen un par de Tesis doctorales en el área de la Expresión Gráfica relacionadas con la estereoscopia, la primera se titula *Aportación metodológica generalizada para la construcción de Anaglifos*, del ingeniero industrial Alberto Fernández Sora, leída en Tarrasa en 1988 (Fernández, 1988) y la segunda lleva el nombre de *Aplicación de la estereoscopia en la representación gráfica*, del licenciado en Bellas Artes Alfredo Aguilar Gutiérrez, leída en Sevilla en 1993 (Aguilar, 1993). Ambas tesis han quedado desfasadas en el tiempo, ya que no han podido reflejar la revolución tecnológica que

se ha producido en los últimos años, si bien, contienen información bibliográfica y técnica interesante.

Esta tesis pretende recopilar los últimos avances en los métodos de reproducción y visualización estereoscópica, aportando nuevas técnicas, herramientas y metodologías destinadas al campo de la representación arquitectónica, que son extrapolables a otros campos del conocimiento, con el fin de ayudar a los docentes e investigadores a desarrollar material estereoscópico en el ámbito académico y científico.

1.3. Metodología

La estereoscopía consiste en engañar, lo mejor posible, a nuestro sistema visual para evocar en nuestra mente algo que no existe. Es la evolución del arte del trampantojo, o *“trompe l'oeil”*, como lo llaman los franceses, algo que hubiera hecho las delicias de los pintores quadraturistas del barroco italiano.

Para producir este engaño es imprescindible conocer el funcionamiento de la visión humana tanto desde el punto de vista fisiológico (óptica fisiológica), tanto como el punto de vista psicológico (teorías de la percepción).

Gran parte del trabajo de esta tesis doctoral consiste en realizar una buena búsqueda, selección de información y síntesis de los conceptos fundamentales que intervienen en la visión estereoscópica, así como contextualizar los contenidos, investigando los antecedentes históricos que han llevado al descubrimiento de las técnicas estereoscópicas.

A diferencia de las tesis precedentes, ésta propone una metodología basada en la experimentación, dónde se ponen en práctica los métodos que se desprenden de los conocimientos ya establecidos. Es el análisis de los resultados de esta experimentación la que retroalimenta todo el proceso, de modo que, en algunos casos, los resultados no son los que cabría esperar y ello te conduce a replantearte la validez de lo ensayado. En ocasiones la experimentación te lleva hacia cuestiones, sin respuesta, que te hacen reflexionar sobre el problema para intentar hallar una solución.

Por ello, la selección de los contenidos y las aportaciones propias se han realizado en base a las necesidades requeridas por la experiencia, para ofrecer una visión crítica y personal de los temas, cuya validez se verá reflejada en los resultados finales.

Si bien, la mayoría de la información obtenida para el desarrollo de la tesis, se ha obtenido principalmente de fuentes literarias impresas y electrónicas. Cabe destacar que, los métodos empleados por los autores, no siempre se describen explícitamente, sino que éstos se hallan ocultos en los propios dibujos estereoscópicos. Es el minucioso análisis geométrico de los dibujos, lo que posibilita acceder al secreto que

esconden. Ello me ha permitido realizar un análisis comparativo y cronológico de los libros con dibujos estereoscópicos, relacionados con la representación gráfica, del que se extraen valiosas conclusiones.

1.4. Contenidos

A grandes rasgos la tesis se compone de los siguientes bloques temáticos:

- Antecedentes Históricos
- Fisiología y Psicología de la visión
- Técnicas para la obtención del par estereoscópico
- Estudio de los métodos de reproducción y visionado
- Análisis comparativo de las publicaciones estereoscópicas
- La fotografía estereoscópica de Valencia durante el s.XIX
- Panoramas esféricos estereoscópicos
- Conclusiones y ejemplos de aplicación

Considero que el bloque de Antecedentes históricos es fundamental para contextualizar los contenidos y para sacar a la luz las ideas primigenias que condujeron hacia el descubrimiento de la estereoscopia y conocer a sus protagonistas.

El bloque de fisiología y psicología de la visión resulta ineludible para tener una idea clara del funcionamiento del sistema visual y de las leyes de la percepción, que establecen, por decirlo de una manera sencilla, las reglas del juego, si bien, el campo de la percepción es complejo, tiene muchas teorías y todavía queda mucho por descubrir.

Una vez conocidas las reglas que establece nuestra visión, podemos acometer la creación del par estereoscópico. En este bloque se estudiarán los métodos gráficos y fotográficos que permiten la obtención del par, así como los parámetros que permiten controlar el espacio estereoscópico recreado.

El siguiente bloque ofrecerá una descripción de los medios de reproducción y visionado, analizando sus características y limitaciones. Se aportará importante información técnica acerca de los nuevos estándares de imagen y video estereoscópico para su uso en Internet y en dispositivos 3D de última generación.

Me ha parecido pertinente hacer una revisión y estudio comparativo de las escasas publicaciones de mi rama profesional, relacionadas con la estereoscopia, que incluye,

como no, aquel maravilloso libro de Rudolf Schmidt que fue mi primer contacto con este tema.

Se ha llevado a cabo un minucioso estudio documental, para tratar de censar y obtener las fotografías estereoscópicas de Valencia, publicadas por los editores comerciales del siglo XIX. Ello permitirá recuperar la memoria de diversos elementos arquitectónicos desaparecidos y conocer los aspectos urbanos de este periodo, en visión estereoscópica.

El bloque de panoramas esféricos estereoscópicos es una de las aportaciones personales más importantes de la tesis, puesto que se expone un método de captura fotográfica y las consideraciones necesarias para desarrollar un software específico de visualización que permita obtener una experiencia inmersiva e interactiva de un escenario real, que puede ser visualizado estereoscópicamente en cualquier dirección. Para ello he tenido la gran suerte de poder acceder, durante mi estancia de investigación en la Universidad de Roma “La Sapienza”, a los principales monumentos históricos y obtener el permiso pertinente para realizar las capturas fotográficas.

Finalmente se ofrecen las conclusiones, a modo de resumen general y se muestran algunos ejemplos de aplicación en el campo de la representación gráfica arquitectónica. Para ilustrar las metodologías desarrolladas se han realizado modelos tridimensionales de soluciones arquitectónicas con un gran interés geométrico, como algunas obras de estereotomía de la piedra y también se aportan imágenes estereoscópicas realizadas a partir de fotografías reales de las esculturas del gran artista valenciano Andreu Alfaro.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El hallazgo de la estereoscopia es relativamente reciente, 1838, año en el que el científico e inventor escocés Sir Charles Wheatstone (1802-1875) publicó su artículo: *Contributions to the Physiology of Vision. Part the first. On Some Remarkable and Hiterto Unobserved, phenomena of binocular visión* (Wheatstone, 1838) convirtiéndose en el primero en expresar, de forma clara, las bases de la estereoscopia e inventar el estereoscopio, aparato para recrear el efecto estereoscópico. Sin embargo, no cabe duda que este descubrimiento fue realizado, en parte, gracias a los hallazgos de multitud de científicos, precedentes a Wheatstone, que con sus aportaciones contribuyeron al conocimiento de la visión binocular.

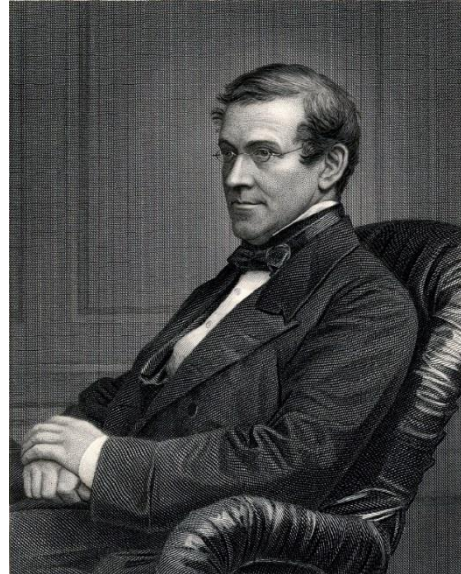


Fig. 2.1. Sir Charles Wheatstone (1802-1875)

2.1. Primeras teorías acerca de la visión

Según Duke y Elder (1961) existen indicios de que los babilonios y los egipcios practicaron la oftalmología en el tercer y segundo milenio antes de Cristo, aunque no existe constancia de hasta dónde pudieron llegar sus conocimientos. Fueron aparentemente los científicos y filósofos griegos quienes primero estudiaron la naturaleza de la visión.

2.1.1. Los griegos

Empédocles (s.V a.C), sugirió la llamada teoría de la emanación o extromisión, en la que se entiende el ojo como un emisor de un haz cónico de rayos corpusculares con vértice en la pupila, gracias a los cuales se pueden percibir los objetos que alcanzan estos rayos, de igual modo que nuestras manos sienten los objetos que tocan.

Otros filósofos griegos como el filósofo pitagórico Alcmeón (s.V a.C), Platón (ca. 427-347 a.C), Euclídes (ca. 325-265 a.C.), Hiparco (ca. 160-125 a.C) y Ptolomeo (ca. 100-170 d.C),



Fig. 2.2. Empédocles (s.V a.C)

fueron seguidores de la teoría de la extromisión (Howard, 1995).

La idea de que el ojo actuara como un emisor de luz, fue alentada, en parte, por fenómenos como los fosfenos o flashes que se sienten al presionar el ojo en la oscuridad. También, en un primer momento, se llegó a creer que el reflejo producido en la córnea era la propia imagen percibida por el ojo. Los seguidores de la escuela atomista, fundada por Leucipo (ca. 430 a.C) y su pupilo Demócrito (ca. 460 a.C), rechazaron la teoría de la extromisión, proponiendo una nueva teoría, llamada de la intromisión, donde son los objetos los que emiten, de manera continua, una imagen de sí mismos, llamada *eidola* o *simulacrum*, que viaja en línea recta hacia el ojo a través de lo que llamaron medio traslúcido intermedio, es decir, el aire. La formación de estas imágenes es descrita, a veces, como una constitución de átomos, corpúsculos o sustancia efímera que desprenden los objetos a modo de piel.

Aristóteles (384-322 a.C), discrepó con ambas teorías. Con respecto a la teoría de la extromisión declaró que si de los ojos emanara luz, podríamos ver en la oscuridad, mientras que en sus obras *De ánima* y *De Sensu*, rechazó la idea de sustancias emitidas por el objeto y planteó que las imágenes se transmiten por perturbaciones en el aire, que llamó medio diáfano y no, medio traslúcido intermedio. Aristóteles no mencionó nunca los rayos de luz, pero pensaba en una propagación rectilínea, al darse cuenta de que se percibe una imagen doble, cuando las imágenes, transmitidas por el medio diáfano, no caen en el lugar apropiado en los dos ojos; cosa que pudo comprobar presionando lateralmente con el dedo uno de los ojos, mientras contemplaba un objeto, convirtiéndose en una de las primeras referencias acerca de la disparidad binocular (Beare, 1906).

El discípulo de Aristóteles Teofrasto (ca. 370-286 a.C) desarrolló los conocimientos de su maestro en su obra *De sensibus*, gracias a la cual, hoy se conocen las primeras teorías griegas acerca de la visión.

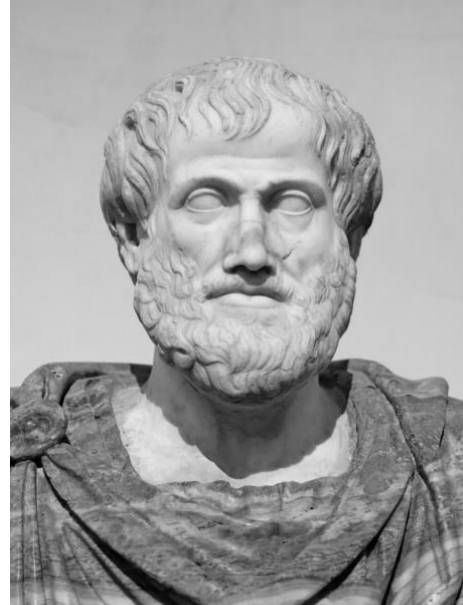


Fig. 2.3. Aristóteles (384-322 a.C)



Fig. 2.4. Teofrasto (ca. 370-286 a.C)

Sin duda las teorías más importantes del periodo Griego, pertenecen al matemático y geómetra Euclides (ca. 325 - ca. 265 a.C.), quien en su tratado: *Óptica*, sentó las bases de la óptica geométrica.

Euclides es partidario de la teoría de la extromisión y considera que, del centro del ojo, emana un haz de rayos cónico. Los objetos que permanecen dentro de este cono se perciben con un tamaño aparente dependiente del ángulo subtendido. Los postulados son desarrollados con un enorme rigor geométrico y sistemático, resultando su razonamiento válido, a pesar del error cometido al considerar los rayos salientes del ojo.

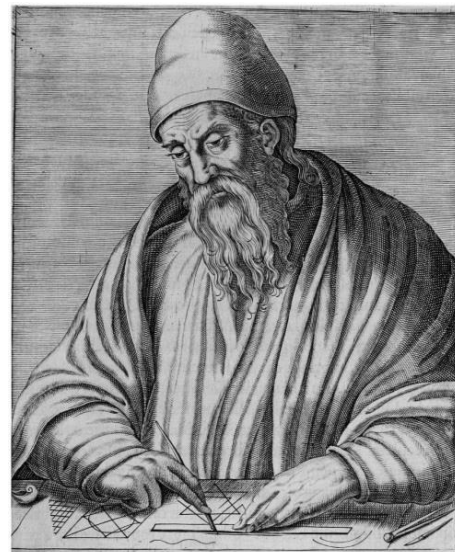


Fig. 2.5. Euclides (ca. 325 - ca. 265 a.C.)

Euclides establece una relación entre la geometría y las sensaciones percibidas, mientras que hoy relacionamos la imagen retiniana que forma los rayos (óptica fisiológica), con la percepción que causa esta imagen según el contexto (funciones psicofísicas).

Euclides teoriza acerca de la visión binocular en sus teoremas 25, 26 y 27 (Burton, 1945:362-363). En el teorema 25 (Fig. 1.6, izda.) expone que cuando una esfera es vista con los dos ojos, si el diámetro de la esfera GB es igual a la distancia entre los ojos ED , se verá el hemisferio completo de la esfera.

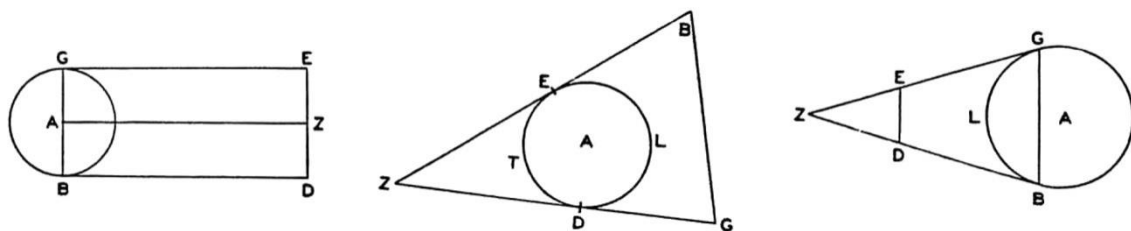


Fig. 1.6. Esquemas gráficos para los teoremas 25,26 y 27 de Euclides

El teorema 26 (Fig. 1.6, centro) explica que si el diámetro de la esfera es menor que la distancia entre los ojos BG , la parte vista de la esfera, será mayor que el hemisferio, siendo esta superficie vista mayor que la que se contempla con un solo ojo, situación que expone en el teorema 24.

En el teorema 27 (Fig. 1.6, derecha) analiza la situación en que el diámetro de la esfera es mayor que la separación entre los ojos. En este caso, la zona vista de la esfera es menor que el hemisferio.

Euclides constata en estos teoremas que la visión de cada ojo es diferente y que se perciben más cosas con dos ojos que con uno, pero no relaciona, en ningún momento, esta circunstancia con la percepción del relieve

Después de Euclides se produce un vacío de 450 años, en el que no se tiene constancia de ningún avance importante, hasta que aparece la figura de Claudio Tolomeo (ca. 100-175 d.C), matemático, geógrafo, astrólogo y astrónomo que vivió en Alejandría durante el mandato del emperador Adriano y posteriormente de Marco

Aurelio que, a pesar de haber perdido su apogeo, seguía siendo todavía un gran centro cultural, cuando aún conservaba su mítica biblioteca, parcialmente destruida cuando la ciudad fue sitiada por Cesar, durante el reinado de Cleopatra, aunque perduró hasta el año 361 d.C. cuando fue destruida por la muchedumbre, después de que el emperador Teodosio ordenara destruir los templos paganos.

Tolomeo es más conocido por sus tratados en campos como las matemáticas, la geografía y la astronomía, pero también escribió un tratado compuesto de cinco libros llamado *Óptica*, que no tuvo mucha influencia hasta que fue traducido al árabe, probablemente en el siglo noveno, influyendo a posteriores científicos árabes como Alhazén.

Tolomeo, sigue la teoría de la extromisión y trata el tema de la visión binocular en partes de su libro segundo y tercero, con aportaciones acerca de la convergencia ocular, la disparidad y la fusión de las imágenes, llegando a afirmar, erróneamente, que el lugar geométrico en el que se fusionan las imágenes es el plano frontal que contiene al punto de fijación, es decir, donde convergen los ojos, pero nunca relacionándolo con la percepción de la profundidad.

Galeno (120-200 d.C.), seguidor de las teorías de Euclides, propone que del ojo sale el *espíritu visual* o *pneuma*, proveniente del cerebro, a través del nervio visual, que interactúa con el aire circundante formando un *medio sensitivo* que se extiende hasta los objetos distantes. El cristalino es considerado como el principal órgano de la visión que transmite las sensaciones visuales a los ventrículos del cerebro donde se mezclan



Fig. 2.8. Claudio Tolomeo (ca.100-175)



Fig. 2.7. Claudio Galeno (120-200)

con el *espíritu animal*, generado en la base del cerebro por el *espíritu vital*, proveniente del corazón. Describe la función del quiasma óptico o punto donde se cruzan los nervios ópticos, a modo de bypass, por el que fluye el espíritu visual, en caso de que uno de los ojos se cierre, y concluye, tras la observación de lesiones cerebrales, que el cerebro es el órgano dónde radica la razón y no, un órgano para enfriar la sangre, como propusiera Aristóteles.

Galeno vuelve a constatar el hecho de la visión binocular en su tratado de anatomía: *Del uso de las partes*, donde expresa:

“Una persona frente a una columna que la contempla primero con el ojo izquierdo y luego con el ojo derecho, percibirá diferentes partes del fondo detrás de la columna. Pero hay algunas zonas vistas por el ojo derecho y otras vistas por el izquierdo y por lo tanto la posición de las zonas vistas parece ser una propiedad dependiente de cada ojo... Lo que ningún ojo ve es completamente invisible a los dos ojos mirando conjuntamente y por esta razón el objeto visto por ambos ojos ocultará menos que si se observa con un solo ojo, independientemente del que sea” (Tallmadge, 1968).

2.1.2. La edad de oro del islam

Tras la destrucción de Alejandría en el 369, la actividad académica continuó en Bizancio y Grecia hasta que el emperador Justiniano desmanteló en 529 la escuela neo platónica y los estudiosos buscaron asilo en Persia y Siria, dónde se funda la biblioteca de Bagdad, bajo el califato abasí de Harun Al-Rasid (766-809) y su hijo Al Mamun (786-833), en el que transcurre la edad de oro del islam. Allí se tradujeron numerosos manuscritos del griego al árabe entre los siglos VIII y X. Con la expansión del imperio musulmán, Alaquén II (915-976) estableció centros culturales en Córdoba y Sicilia, lo que favoreció que libros griegos, traducidos por los árabes, fueran traducidos al latín, por Constantino el africano (1020-1087), en Salerno, y por Gerardo de Cremona (1114-1187). Este hecho produjo un redescubrimiento del aprendizaje en Europa que sembró el germen del Renacimiento y el crecimiento de la Ciencia moderna (Sharif, 1966).

La etapa de esplendor del mundo árabe proporcionó grandes científicos como Abu Yusuf Ya'qub ibn Isahq al-Kindi, conocido como Al Kindi (801-873), quien estableció la propagación rectilínea de la luz gracias a sus experimentos con sombras, pero, a pesar de sus descubrimientos acerca de la luz, se aferró a la teoría de la emanación y argumentó erróneamente que sólo esta teoría era capaz de explicar los efectos de la perspectiva, a los que no daba respuesta la *eidola* 3d de los atomistas, como en los supuestos dónde se consideraba que un cuerpo circular se apreciara elíptico al ser

visto desde un cierto ángulo. Al Kindi no se dio cuenta de que su teoría acerca de los rayos de luz hubiera dado respuesta al problema de la perspectiva (Lindberg, 1978).

Otros eruditos árabes como Al Razi (865-925), Al Farabi (872-950) y Avicena (980-1037) rechazaron la teoría de la extromisión, siendo este último el autor del tratado médico denominado *Canon*, más claro y sistemático que los textos de Galeno, de quien recoge sus ideas acerca de la anatomía visual, aunque se muestra partidario de la teoría visual de Aristóteles (Lindberg, 1976).



Fig. 2.9. Alhazén (965-1040)

Sin duda, el máximo exponente de los eruditos árabes en el tema de la visión fue el matemático, físico y astrónomo persa Abu Alí al-Ḥaṣan ibn al-Ḥaṣan ibn al-Haytam, más conocido en occidente como Alhazén (965-1040), en su obra: *Kitab al-Manazir (Libro de Óptica)* propone un avanzado modelo de visión binocular (Sabra, 1980). Alhazén rechazó tajantemente la teoría de la extromisión y describió cómo los rayos de luz entran en el ojo, provenientes de distintas fuentes de luz como el sol y los objetos que reflejan y refractan los rayos solares.

En la teoría griega de la intromisión, los objetos emitían copias de sí mismos, surgiendo el problema de cómo estas copias pueden ser enviadas a multitud de espectadores durante un periodo prolongado y cómo pueden entrar las copias de objetos grandes a través de la pupila. Para resolver todas estas cuestiones, Alhazén adopta la idea de Al Kindi de que la luz reflejada por un objeto se irradia en todas direcciones y estos rayos entran en el ojo produciendo la imagen.

Alhazén realizó experimentos con una cámara oscura, sin lente, sólo con un pequeño orificio o estenopo por el que entraba la luz, que creaba una imagen invertida. Al Kindi ya había trabajado con este instrumento, que había sido ya descrito en el *Mo Ching*, libro chino del siglo IV a.C. que recopila los escritos de los filósofos Moistas.

Alhazén se dio cuenta de que la pupila es demasiado grande para funcionar como un estenopo que produjera una imagen nítida y desconocía la función de lente que realiza el cristalino, por lo que consideró la córnea y la parte anterior del cristalino como dos superficies concéntricas, que sólo dejaban pasar al interior del ojo los rayos que incidían ortogonalmente en ellas, por lo que no se refractaban, mientras que el resto de los rayos quedaban excluidos al ser refractados, explicando así la formación de una imagen nítida sobre el fondo del cristalino, que suponía conectado al nervio óptico tal como había descrito Galeno. Esta imagen era transmitida después por el nervio óptico

hasta el quiasma, dónde se fusionaban las imágenes de los dos ojos para ser llevadas al cerebro.

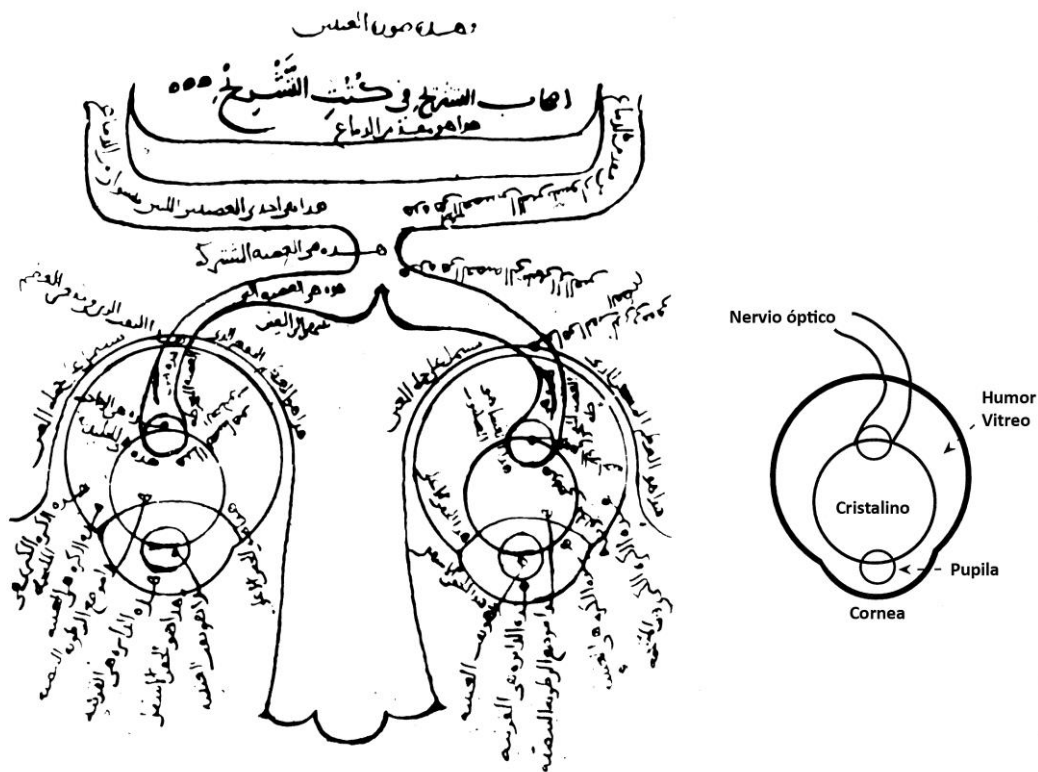


Fig. 2.10. Esquema del sistema visual descrito por Alhazén en su libro de óptica. El esquema de la derecha sirve para clarificar las partes del ojo

Lo que condujo a Alhazén a realizar esta hipótesis errónea de la formación de la imagen en el fondo del cristalino fue, en parte, el hecho de evitar la inversión de la imagen en el ojo y suponer que la imagen debía formarse en algún lugar por delante del punto donde convergen los rayos, es decir, del centro de curvatura de la córnea y el cristalino. Por otro lado, como la religión musulmana prohibía las disecciones, Alhazén adoptó el modelo anatómico de Galeno, por lo que sus hipótesis resultan de una lógica aplastante, dados los precedentes. No sería hasta el siglo XVII cuando Kepler diera con la solución de la formación de la imagen en la retina.

Al igual que Tolomeo, Alhazén estudió la convergencia ocular y el efecto de diplopía o visión doble que se produce, en determinadas circunstancias. Para analizar la geometría de la visión binocular, Alhazén diseñó un tablero con el que contemplar puntos situados a determinadas distancias, mientras se converge la mirada en un punto fijo (Fig. 0.11). Alhazén dispuso horizontalmente este tablero ante los ojos, situados en A y B mientras se hacía converger la mirada en el punto K, y describió las siguientes impresiones:

geometría a la visión, si bien, más tarde Durero, ampliaría el significado del término por el de “mirar a través”.

Los primeros intentos por representar nuestra realidad sobre un plano se remontan a la prehistoria, con pinturas rupestres datadas de hace 40.000 años, siguiendo con las pinturas del antiguo Egipto, Babilonia y Asiria, donde la profundidad se obtiene a base de superponer figuras que se muestran generalmente de frente, de perfil o en una combinación de ambas, pero sin la existencia de ningún tipo de regla acerca de la perspectiva.

Las representaciones griegas comienzan a realizarse de igual forma, pero a partir del 500 a.C. aparecen ejemplos donde las figuras humanas, carros y escudos empiezan a dibujarse en escorzo, representándose con forma elíptica las figuras circulares que no se ven de frente. (Fig. 2.12)



Fig. 2.12. Vaso decorado con la imagen de Artemisa, 450–425 a.C. Museo del Louvre

Vitrubio, cerca del 25 a.C, describe en su tratado *De Architectura*, cómo Agatarco de Samos (525-456 a.C) había inventado un método para crear escenarios que simulaban profundidad en el teatro de Dionisio en Atenas, lo que se conoció como escenografía, que fue aplicada también a la decoración de las villas más ostentosas. Esta tradición fue seguida por los romanos con la realización de frescos representando arquitecturas ficticias vistas de manera frontal, mostrando algunas de ellas relaciones correctas en los acortamientos producidos por el efecto de la perspectiva; como en el caso de uno de los frescos de la casa de Augusto estudiado por el profesor Migliari (2005) (Fig. 2.13).



Fig. 2.13. Estudio de la razón doble en las pinturas de la Casa de Augusto (Migliari, 2005)

Aunque en estas pinturas se aprecian distintos puntos de fuga, cuando teóricamente debiera de haber uno solo, coincidente con el punto principal, sí que se denota un cierto conocimiento técnico, a la hora de realizar la perspectiva, como también ocurre en algunos ejemplos encontrados en Pompeya del 79 a.C. (Little, 1971) (Scolari, 2005).

En el medievo, los artistas se alejan de los avances conseguidos en las etapas anteriores y se opta por realizar perspectivas dónde las líneas en profundidad, lejos de converger a un punto, se mantienen paralelas, como si de una proyección cilíndrica se tratase, llegando en algunos casos a divergir hacia un punto de fuga anterior.

No fue hasta el siglo XIV cuando emerge de nuevo la perspectiva convergente (Bunim, 1940) de la mano de Duccio, Giotto y sus discípulos los hermanos Lorenzetti que siguieron ciertas reglas vagas como las descritas por Cenino Cennini, quien aconseja que, a la hora de dibujar edificios, las molduras de la parte alta de la fachada que se ve en profundidad, deben inclinarse hacia abajo, las que se encuentran a media altura, deben permanecer horizontales, mientras que las de la base del edificio, deben inclinarse hacia arriba, en la dirección opuesta a las superiores. Sin embargo, algunos artistas toscanos llegaron a emplear los puntos de distancia o puntos donde fugan las líneas a 45° , al representar baldosas, en solados, o despieces de techos, si bien, los puntos de fuga seguían siendo erráticos.

Es ya en el renacimiento cuando se cree que Filippo Brunelleschi (1377-1446), logró realizar dibujos en perspectiva legítima, como el del Baptisterio de Florencia y el Palazzo della Signoria.

Existen varias teorías acerca de cómo Brunelleschi logró dibujar sus perspectivas, hay quien opina que se sirvió de instrumentos como relojes de sol pulidos para calcar el reflejo de los edificios (Lynes, 1980) o simplemente espejos (Krautheimer, 1982). Mientras que Vasari en *Le Vite de' più eccellenti architetti, pittori et scultori italiani* de 1550, expone que se sirvió de las vistas del edificio para realizar el trazado (Hyman, 1974), incluso hay quienes dan su propuesta acerca del método gráfico empleado por Brunelleschi (Fig. 2.15).



Fig. 2.14. Filippo Brunelleschi (1377-1446)

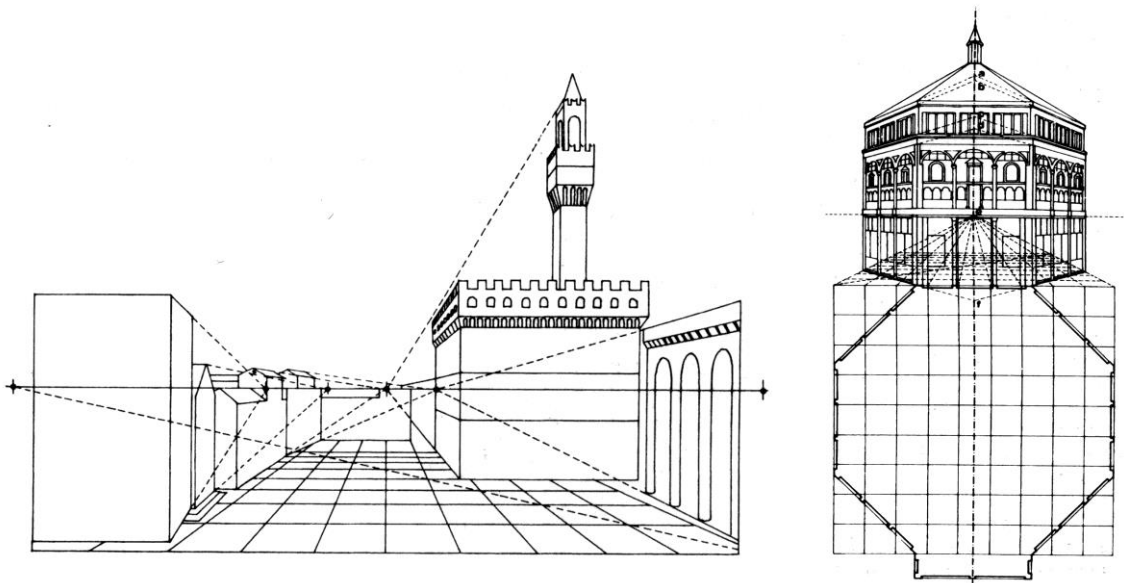


Fig. 2.15. Hipótesis de las perspectivas realizadas por Brunelleschi y su método de construcción
Dibujo de Parronchi (dcha.) y de Battisti (izda.). (Sainz 2005)

Brunelleschi fue un precursor de la realidad virtual, diseñó un artilugio para visualizar sus dibujos en perspectiva, compuesto de un espejo enfrentado al propio dibujo, al que se le había practicado un pequeño orificio en el punto principal, para poder mirar a través de él, pero desde el lado contrario, de manera que el espectador contemplaba el diseño, reflejado en el espejo, y el entorno circundante real.

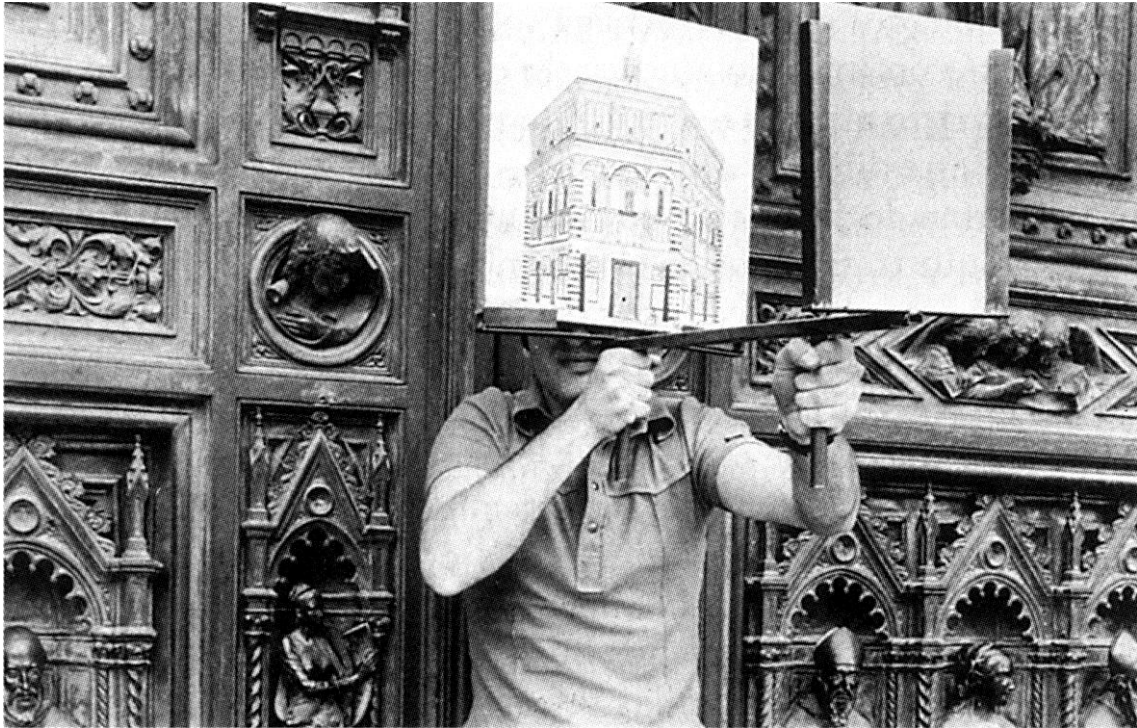


Fig. 2.16. Reconstrucción del artificio de Brunelleschi (Battisti,1976)

Según Manetti,(1482-1489), biógrafo de Brunelleschi, éste logró asombrar a sus contemporáneos al visualizar, con el aparato, el dibujo del Baptisterio de Florencia, desde la puerta de la catedral. El espectador debía tener la sensación de que el dibujo suplantaba el edificio original (Fig. 2.16).

Para lograr una mayor integración, Brunelleschi pintó de color plateado el cielo circundante en el diseño en perspectiva para intentar reflejar las nubes. Lamentablemente las perspectivas de Brunelleschi no han llegado a nuestros días y a pesar de las diferentes teorías acerca de su realización, lo cierto es que, pocos años después de que Brunelleschi dibujara el Baptisterio, algunos pintores Florentinos empezaron a utilizar un único punto de fuga, como en el caso de Massacio, amigo de Brunelleschi, que pintó el fresco de la Trinidad en la Iglesia de Santa Maria Novella en 1425, considerado la primera obra que se conserva con un punto de fuga único (Fig. 0.17).

La primera obra que expone un método para



Fig. 2.17. La trinidad de Massaccio. Estudio del punto de fuga

dibujar en perspectiva es *De Pictura*, escrito en 1435 por Leon Battista Alberti (1404-1472), disponible sólo en forma de manuscrito hasta que fue publicado en 1540.

Alberti, conocedor de las obras clásicas de Euclides, Galeno, Tolomeo y Vitruvio, así como de las aportaciones de Alhazén descritas por Roger Bacon, John Peckham y Witello, adoptó de galeno el concepto de pirámide visual y basándose en los teoremas de Euclides, concretamente en el 21, estableció que el tamaño de una imagen sobre el plano del cuadro, es inversamente proporcional a la distancia del objeto. No obstante el método descrito por Alberti todavía está poco desarrollado y se centra fundamentalmente en la definición de un espacio con forma de paralelepípedo, visto de manera frontal.

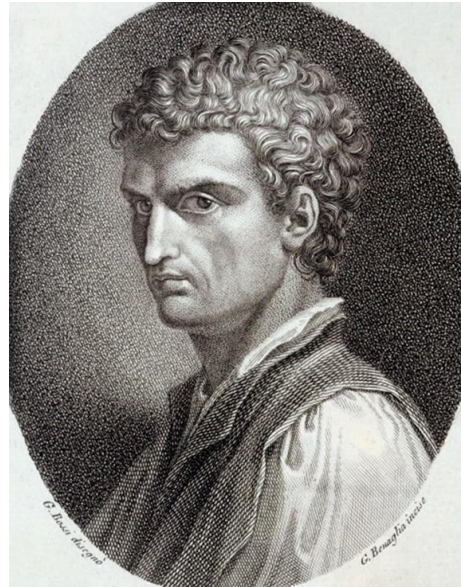


Fig. 2.18. Leon Battista Alberti (1404-1472)

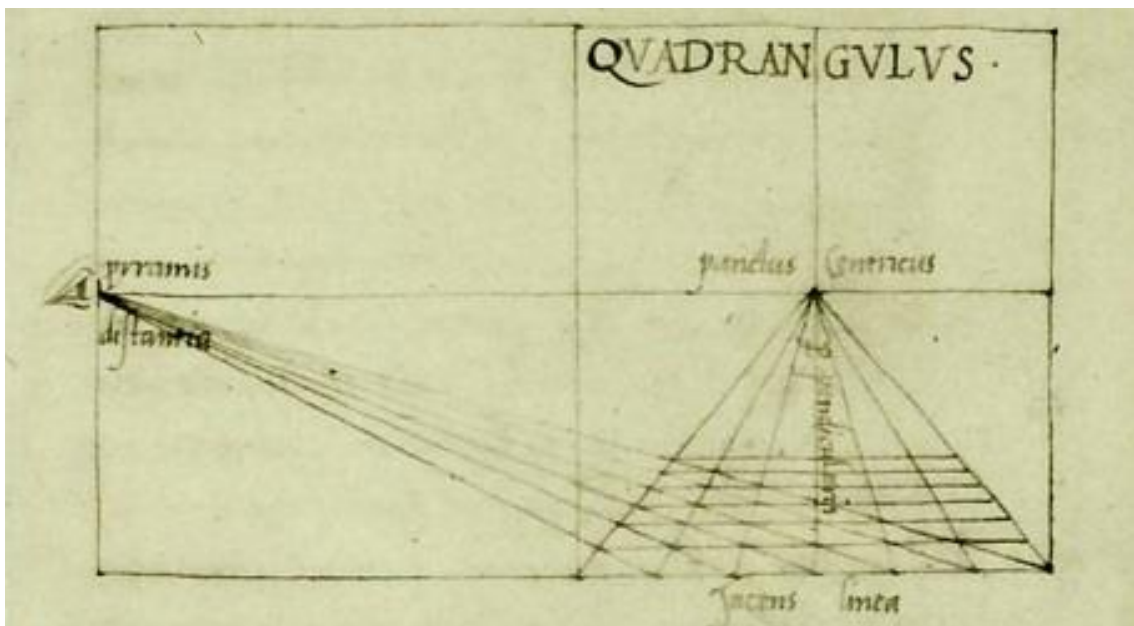


Fig. 2.19. Esquema perteneciente a *De Pictura* de Alberti, 1435

Uno de los artistas más dedicados a descifrar y practicar este emergente lenguaje de la perspectiva fue, sin duda, Paolo Ucello (1397-1475), quien realizó, de manera rigurosa y minuciosa, diversos dibujos de formas geométricas, dando lugar a la famosa anécdota, reportada por Vasari, quien narra que cuando su esposa le recriminaba por quedarse trabajando hasta altas horas de la noche y le pedía que se acostase, él le decía: *Oh, che dolce cosa è questa prospettiva!*

Piero della Francesca (1416-1492) escribe el primer tratado monográfico sobre perspectiva: *Prospettiva Pingendi* en 1475, que recopila los conocimientos teóricos adquiridos durante este periodo.

El primer libro impreso sobre perspectiva es *De Artificiali Perspectiva*, escrito en 1505 por el canónico Francés Jean Pèlerin le Viator (1435-1524), donde se describen explícitamente los puntos de distancia.

En Alemania, Alberto Durero (1471-1528) publica en 1525 su *Underweysung der Messung mit dem Zyrkel und Richtscheyt*, Manual de las medidas con regla y compás, con interesantes dibujos acerca de las máquinas de perspectiva (Fig. 2.22).

En el Tratado de Arquitectura de Sebastiano Serlio (1475-1554), publicado entre 1537 y 1575, se exponen, en el libro segundo, de forma más clara, las ideas descritas anteriormente por Piero y añade bellísimas perspectivas escenográficas.

A mitad del siglo XVI aparecen bastantes más publicaciones sobre la perspectiva, en Italia cabe destacar *La prattica della prospettiva*, de Daniel Barbaro (1513-1570), publicada en 1568, o *Le due regole della prospettiva prattica*, de Jacopo Barozzi il Vignola (1507-1573), de 1582, que introduce de manera explícita el método de los puntos de distancia en el entorno Italiano. Finalmente merece señalar *La pratica di prospettiva*, publicada en 1596 por Lorenzo Sirigatti.

En Francia aparece el *Livre de perspective* en 1560, de Jean Cousin (1490-1560) y *Leçons de perspective positive* en 1576, de Jacques Androuet Ducerceau, ambos libros con un carácter muy práctico (Prólogo de Gentil Baldrich en Soler, 1996).

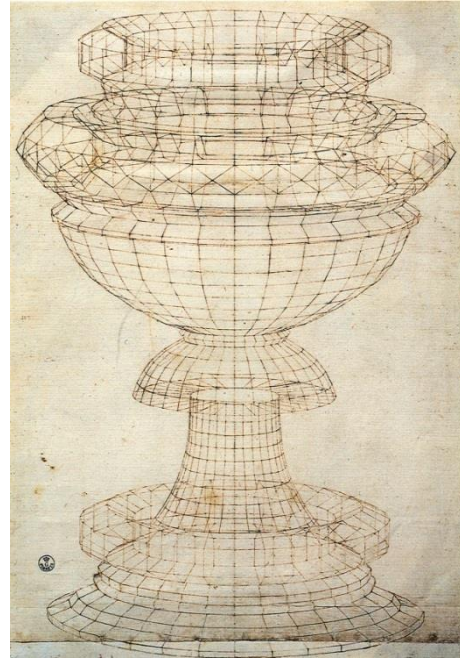


Fig. 2.20. Perspectiva de un cáliz de Paulo Ucello (1397-1475)

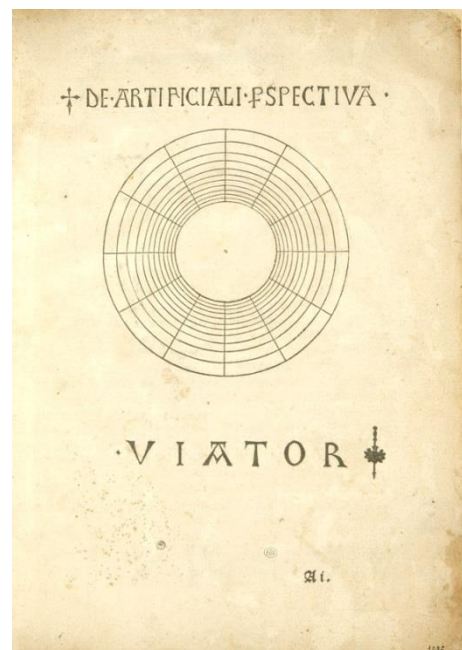


Fig. 2.21. De Artificiali Perspectiva de Jean Pèlerin le Viator, 1505

Gracias a estos tratados, se establecen por fin las reglas del dibujo de la perspectiva legítima. Con ello la pintura se eleva al estatus de ciencia, por lo científico del procedimiento, que se irá puliendo y perfeccionando posteriormente hasta llegar a una completa concretización matemática, gracias a la geometría proyectiva desarrollada por los matemáticos franceses Girard Desargues (1593-1662), Blaise Pascal (1623-1662) y Poncelet (1788-1867).

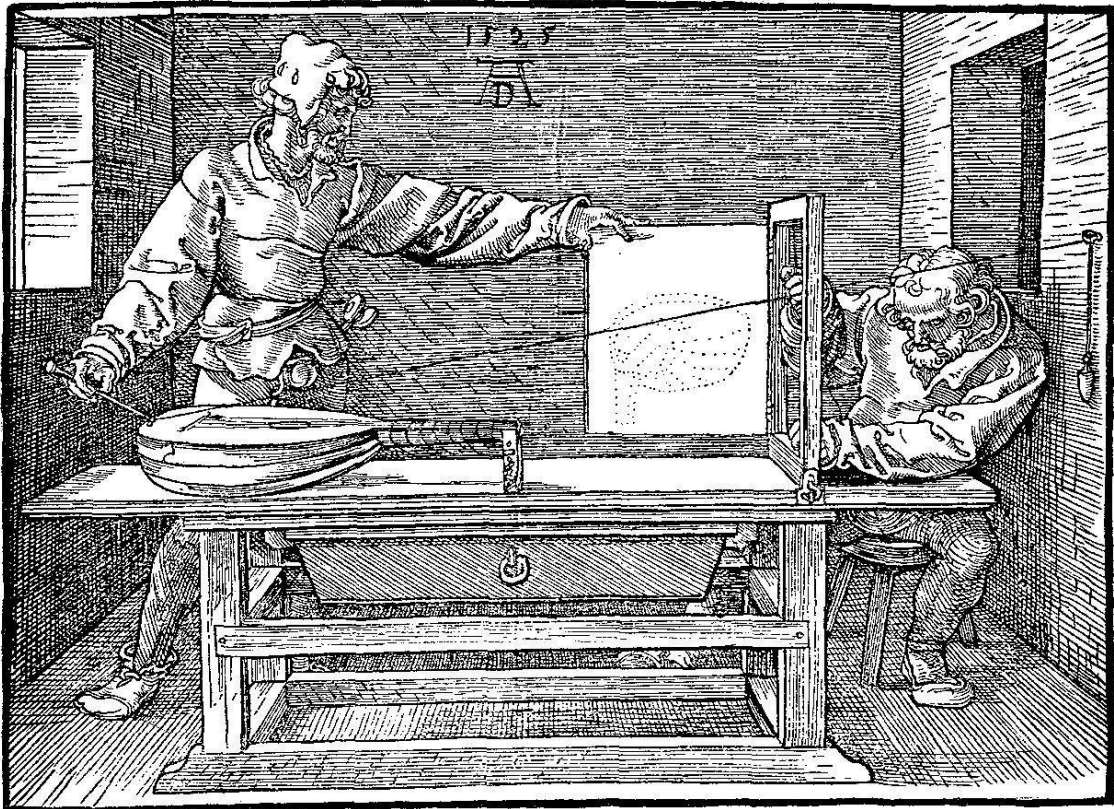


Fig. 2.22. Máquina de perspectiva del tratado de Durero de 1525

El hecho fundamental del hallazgo de la perspectiva es que, siguiendo un procedimiento científico, se pueda emular la imagen percibida por nuestro sistema visual, aunque todavía de modo parcial, dado el carácter monocular de la perspectiva cónica, pero se está ya a un solo paso del descubrimiento de la estereoscopia, si bien, ésta tardaría algo más en llegar.

2.3. Visión binocular y Relieve

Leonardo da Vinci (1452-1519) fue el primero en relacionar la visión binocular con la percepción de la profundidad en su *Tratatto della Pittura*, publicado finalmente 132 años después de su muerte, en donde expresa:

“Vistos de cerca, los cuerpos en relieve se asemejan a una perfecta pintura. Si miras con tus dos ojos, a y b, el punto c, este punto te parecerá estar en d, f; pero si lo miras con un solo ojo, g, h te parecerá estar en m. La pintura jamás contendrá en sí misma estos dos aspectos” (González, 1986:102) (Fig. 2.24 izquierda).

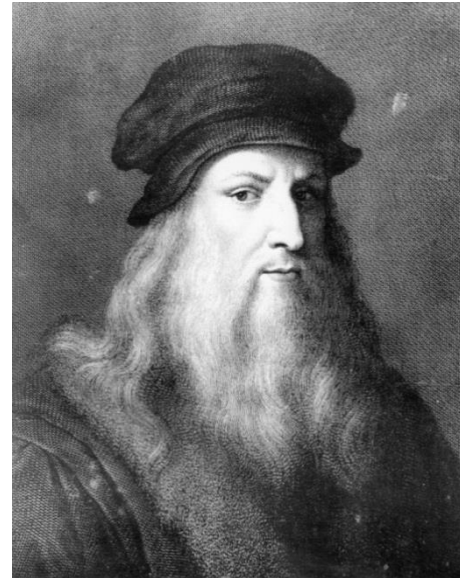


Fig. 2.23. Leonardo da Vinci (1452-1519)

“Sea t el cuerpo en relieve visto por tus dos ojos. Si miras ese cuerpo con el ojo derecho, m, manteniendo cerrado el izquierdo, n, tal cuerpo parecerá ocupar el espacio a; pero si cierras el ojo derecho y abres el izquierdo, el cuerpo ocupará el espacio b ;y si ambos ojos abres, ese cuerpo no ocupará ya a b, sino el espacio e r f ¿Por qué entonces si la pintura vemos con ambos ojos no nos produce un efecto de relieve, cual el objeto real visto por los dos ojos, y por qué, sin embargo, si la pintura vemos con un sólo ojo nos produce el mismo efecto de relieve que el relieve real, y participa de sus mismas condiciones de luz y de sombra?” (González, 1986:102) (Fig. 2.24 centro).

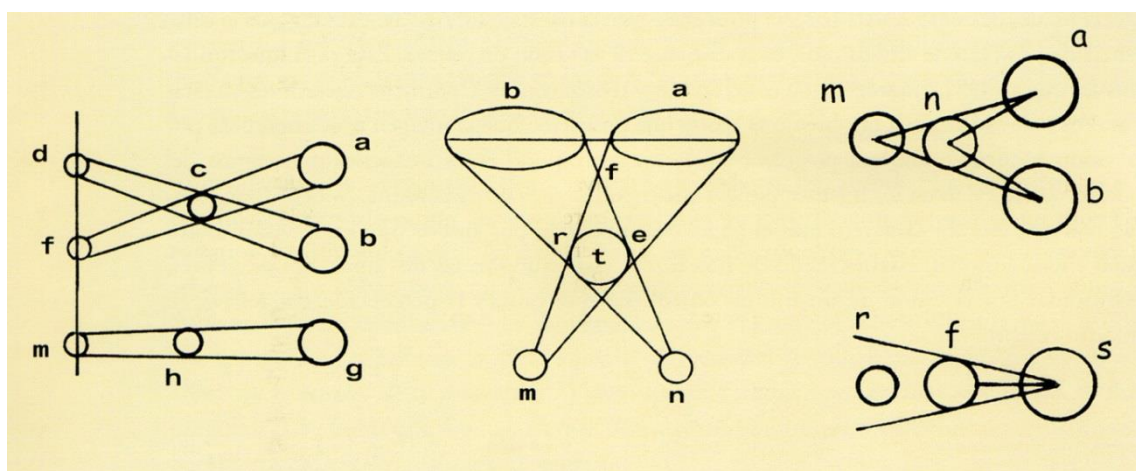


Fig. 2.24. Esquemas para ilustrar las consideraciones de Leonardo acerca de la visión Binocular. (Fernández, 2004)

La siguiente cita parece responder a la pregunta planteada en la anterior, y sitúa a Leonardo como el primero en describir que la doble perspectiva, proporcionada por la visión binocular, es la responsable de la visión tridimensional. (Fernández, 2004)

“En numerosas ocasiones, los pintores se desesperan imitando del natural, por ver que sus pinturas no tienen aquel relieve y aquella vivacidad que tienen las cosas vistas en el espejo, y alegan no disponer de colores que en luminosidad u oscuridad aventajen a la naturaleza a las luces y las sombras de la cosa reflejada en el espejo. En tal caso, acusan su ignorancia y no razón, que la desconocen. Es imposible que el objeto pintado parezca de tal relieve que se asemeje a los objetos del espejo, aun siendo una y otro superficies planas, salvo que con un solo ojo sean vistas. La razón es que dos ojos ven una cosa detrás de otra, así a y b, que ven n y m; m no puede, ocupar n por completo, porque la base de las líneas visuales es tan ancha que ve el segundo cuerpo más allá del primero. Pero si cierras un ojo, como en s, el cuerpo f ocupará r, porque la línea visual nace de un solo punto y constituye su base en el cuerpo primero. En consecuencia, el segundo, de tamaño semejante, nunca será visto” (Gonzalez, 1986:377) (Fig. 2.24 dcha.).

A Leonardo siguieron Giovanni Battista della Porta (1535-1615), con su tratado *De refractione optices parte*, publicado en 1593 y el Jesuita François d’Aguillon (1567-1617) quien publicó *Opticorum libri sex* en 1613. En el segundo libro expone sus ideas acerca de la visión binocular y manifiesta también que la visión binocular mejora la percepción del relieve, siendo el primero en utilizar el término “estereoscópico” (Leggat, 1995).



Fig. 2.25. Ilustraciones de Rubens para el libro de Aguillon, donde representa la dificultad de un hombre, privado de la visión de un ojo, para percibir las distancias (izda.) y la representación del horóptero (dcha.)

Aguillon también introdujo el término Horóptero, del griego *horos* (contorno) y *opter* (espectador), referido al lugar geométrico dónde parecen recaer tanto las imágenes fusionadas como las diplópicas; algo así como una especie del plano del cuadro, que el creyó estar constituido por un plano frontal que contiene al punto de fijación, al igual

que Tolomeo. Según Aguillón, sólo los objetos situados sobre el horóptero son apreciados a su distancia correcta. Rubens creó magníficas ilustraciones para el libro de Aguillón que explican, de manera muy clarificadora, los conceptos expresados por éste (Fig. 2.25).

Sin embargo, la acepción actual de horóptero difiere a la de Aguillón y se define como el lugar geométrico donde se consigue una visión fusionada, al converger la mirada sobre un punto del espacio o, dicho de otro modo, se trata del espacio geométrico cuyos puntos se proyectan sobre puntos correspondientes de las retinas. Esta acepción descarta la idea de Aguillón de que las imágenes diplópicas residan también sobre este espacio que, además, no es plano, cosa que ya había comprobado Alhazén en sus investigaciones.

El astrónomo y matemático Johannes Kepler (1571-1630), establece los principios de la formación de la imagen en la retina, estableciendo que la imagen producida en la retina es invertida por el cristalino, que hace de lente, y el hecho de que no percibamos esta inversión se debe a un proceso realizado por el cerebro. Kepler describe en su obra *Dioptrice* de 1611 cómo la sensación de relieve se percibe por efecto de la convergencia ocular, teoría que también adopta René Descartes (1596-1650) en su obra *La Dioptrique* de 1637 y más tarde George Berkeley (1685-1753) en su *Essay towards a new theory of vision* de 1709 quien desarrollará esta misma idea con el nombre de la teoría motora de la percepción del relieve.

Actualmente sabemos que los estímulos recibidos en la mitad temporal de la retina son procesados ipsilateralmente, es decir, por la parte del cerebro del mismo lado que la retina, mientras que los estímulos producidos en la mitad nasal son procesados en la parte contralateral del cerebro. Isaac Newton (1642-1727) fue el primero en proponer esta segregación o hemidecusación de los estímulos, aunque cometió un error al



Fig. 2.26. Johannes Kepler (1571-1630)

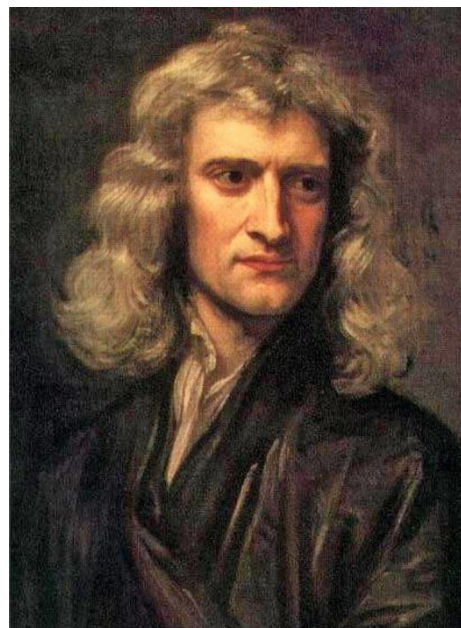


Fig. 2.27. Isaac Newton (1642-1727)

considerar que las fibras de los nervios ópticos, correspondientes a las mitades nasales de las retinas, se fusionaban en el quiasma óptico, cosa que corregiría más tarde el oftalmólogo John Taylor (1703-1772).

Sébastien Le Clerc (1637-1714), gran conocedor de la perspectiva, describió claramente las diferencias en las imágenes que produce un objeto al proyectarse sobre las retinas, pero no llegó a relacionar estas diferencias con la percepción del relieve.

Otro precursor destacable fue el astrónomo y matemático inglés Robert Smith (1689-1768) con su *Compleat System of Opticks* (Smith, 1738), en el que se cita a Leonardo y se describen algunos experimentos acerca de la visión, citados más tarde por Wheatstone, quien lo considera uno de los autores más interesantes e inspiradores.

Herbert Mayo, profesor de anatomía del King's College de Londres, anunció en su tercera edición de *Outlines of Human Physiology* de 1833, que Mr Wheatstone estaba a punto de publicar un artículo dónde se producían extraordinarias ilusiones al alterar por medios artificiales las relaciones entre convergencia ocular y el ángulo subtendido por un objeto en la retina (Mayo, 1833).

Finalmente el científico, miembro de la Royal Society londinense y profesor de filosofía experimental del King's College, Sir Charles Wheatstone (1802-1875), publicó en 1838 su artículo: *Contributions to the Physiology of Vision. Part the first. On Some Remarkable and Hiterto Unobserved, phenomena of binocular visión* (Wheatstone, 1838), donde expresa claramente que la disparidad en las imágenes, vistas por los ojos, son las causantes de la percepción del relieve. Posteriormente Wheatstone publica en 1852 la segunda parte del artículo (Wheatstone, 1852).

Lo más sorprendente del descubrimiento de Wheatstone es que parte de una idea, aparentemente bastante evidente y sencilla, la de reproducir ante los ojos del

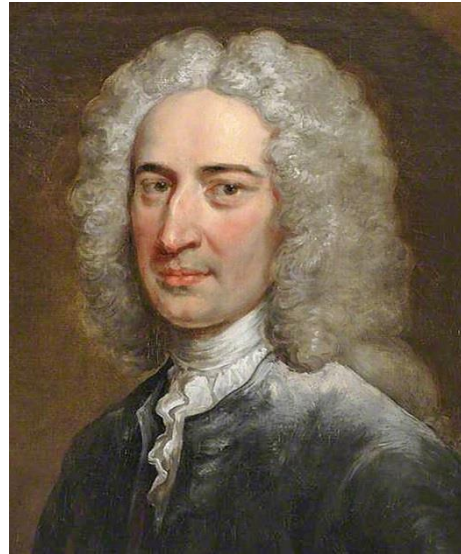


Fig. 2.29. Robert Smith (1689-1768)



Fig. 2.28. Sir Charles Wheatstone (1802-1875)

espectador la imagen que cada ojo contemplaría por separado. Para ello inventa el estereoscopio, aparato que permite observar pares de imágenes, cuyo nombre viene del griego *stereo* (sólido) y de *scop* (ver), indicando la capacidad del aparato para observar figuras sólidas.

Wheatstone muestra cómo dos proyecciones cónicas, de un mismo objeto tridimensional, presentadas convenientemente ante los ojos, pueden evocar, en la mente del espectador, la imagen tridimensional de la figura a la que corresponden

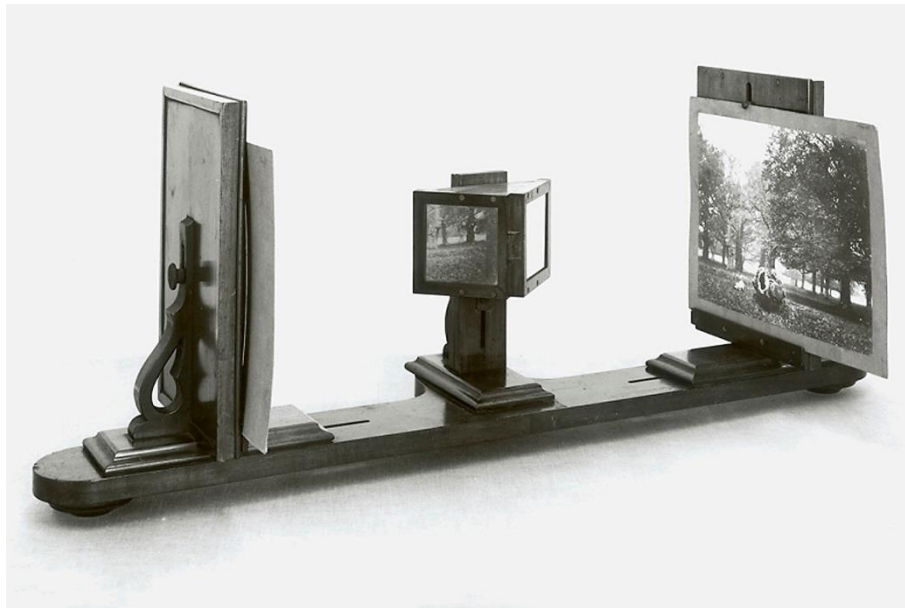


Fig. 2.30. Estereoscopio diseñado por Charles Wheatstone

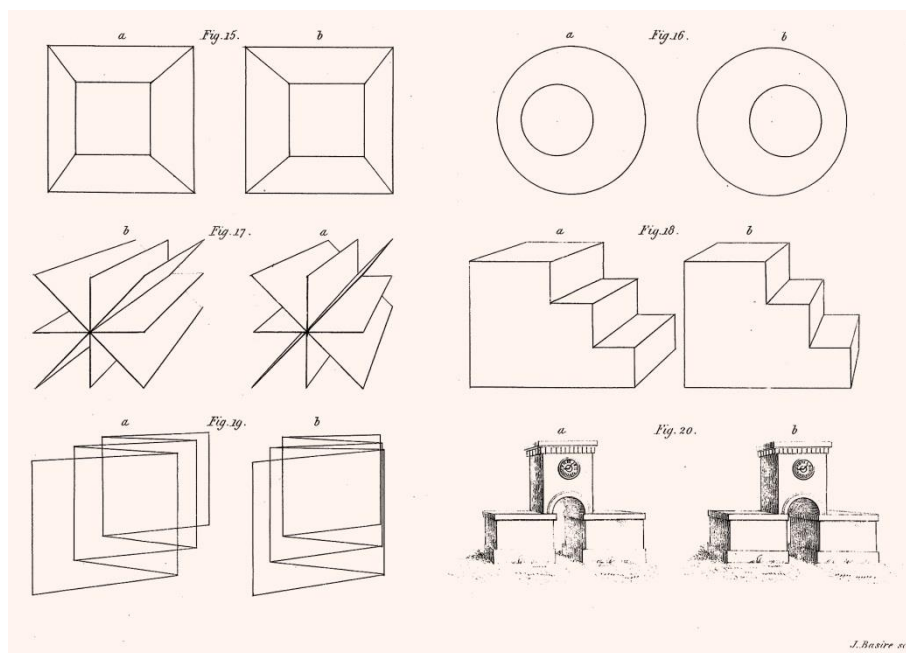


Fig. 2.31. Algunos de los pares estereoscópicos que Wheatstone incluye en su artículo.

Wheatstone fue capaz de utilizar el estereoscopio para contradecir teorías comúnmente aceptadas por la comunidad científica acerca de la visión, apuntando hacia nuevas teorías que todavía estaban por llegar.

La presentación del artículo realizada por Wheatstone ante la Royal Society londinense causó el asombro de la mayoría de sus miembros, sobre todo de Sir David Brewster (1781-1868), eminente científico escocés inventor del caleidoscopio, a quien sin duda fascinó el tema, en el que enseguida comenzó a trabajar, obteniendo un modelo de estereoscopio con lentes más ligero y versátil. Brewster escribió varios artículos y publicó, en 1856, *The Stereoscope its history, theory, and construction* (Brewster, 1856).

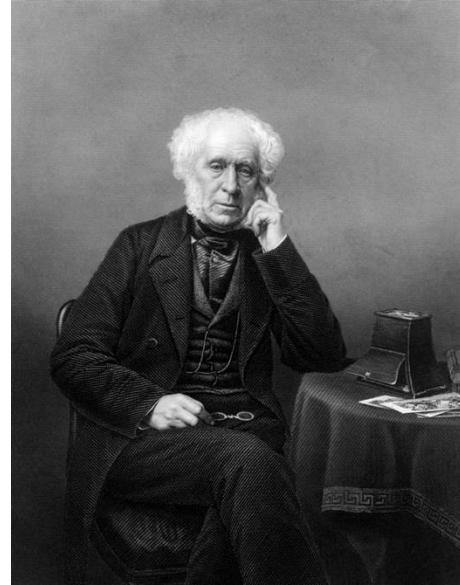


Fig. 2.32. Sir David Brewster (1781-1868)

Tal como recoge Fernández (2004), Wheatstone y Brewster mantuvieron una polémica relación; según parece, Brewster debió sentirse ofendido por una puntualización que le hace Wheatstone en su artículo acerca de la apreciación del relieve percibido al observar un camafeo, dependiendo de las condiciones de iluminación, aunque también le dedica frases de elogio posteriormente, sin embargo, esto pudo ser el germen que levantara el recelo de Brewster, que posteriormente inició una campaña de desprestigio fallida intentando restar mérito al descubrimiento.

Wheatstone había iniciado ya sus estudios en 1832, año en el que construye tanto el estereoscopio reflector como el refractor (Wade, 1983) (Wade y Ono, 2012). Además, los descubrimientos de Wheatstone habían sido anunciados ya en 1833, en *Herbert Mayo's Outlines of Human Physiology* (Mayo, 1833:288). Sin embargo, Brewster omite en su libro los estudios de Wheatstone, previos a la presentación del artículo, y hace referencia a los estudios del profesor de la Universidad de Edimburgo James Elliot, quien, en 1834, había ideado un rudimentario estereoscopio sin lentes ni espejos, para facilitar la visión directa del par estereoscópico, que no llegó a construirse hasta 1839.

Según Wade (2012), el profesor Elliot, alentado por Brewster, publicó en 1952 una breve nota en el *London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* para declarar que él había construido también un estereoscopio hacía más de 13 años, pero que no quería restar mérito alguno a los descubrimientos de Wheatstone, puesto que él no lo había dado a conocer (Elliot, 1952:397). No obstante, ni Elliot ni Brewster parecen tener en cuenta que Wheatstone había presentado su estereoscopio en 1838, un año antes de que Elliot construyera el suyo.

Brewster también alega pruebas erróneas de la existencia de dibujos estereoscópicos, previos al descubrimiento de Wheatstone, como los dibujos atribuidos al pintor florentino Jacopo Chimenti (1551-1640) (Fig. 2.34), que resultaron ser dos versiones del mismo dibujo con ligeras diferencias que no constituyen un par estereoscópico (Helmholtz, 1866), (Wade y Ono, 1985), (Wade, 2002).

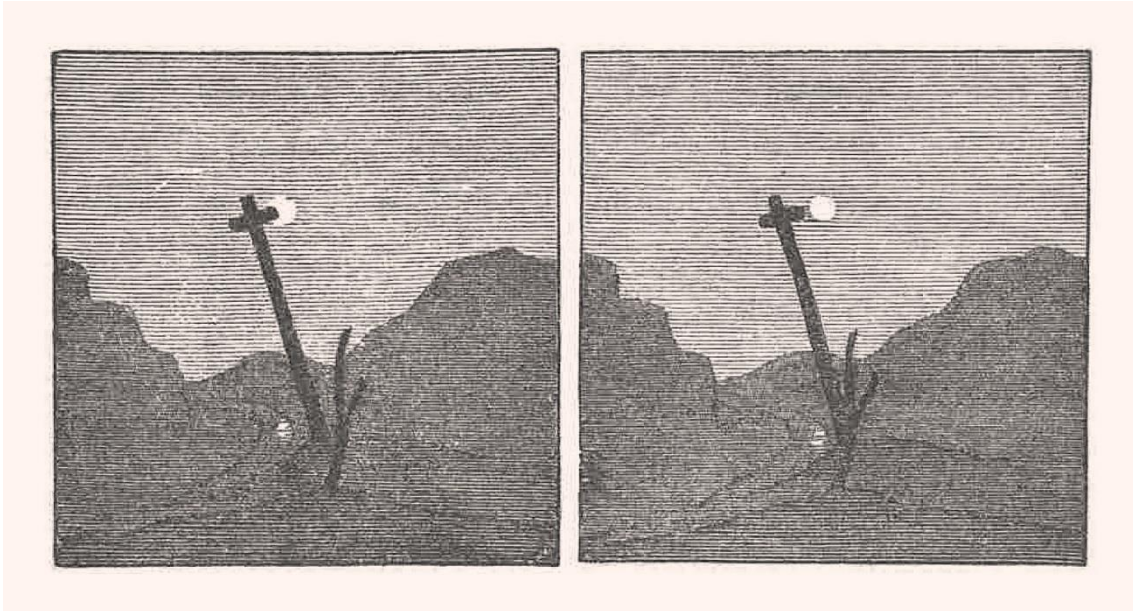


Fig. 2.33. Par estereoscópico empleado por el profesor Elliot en sus estudios. (Brewster, 1856)

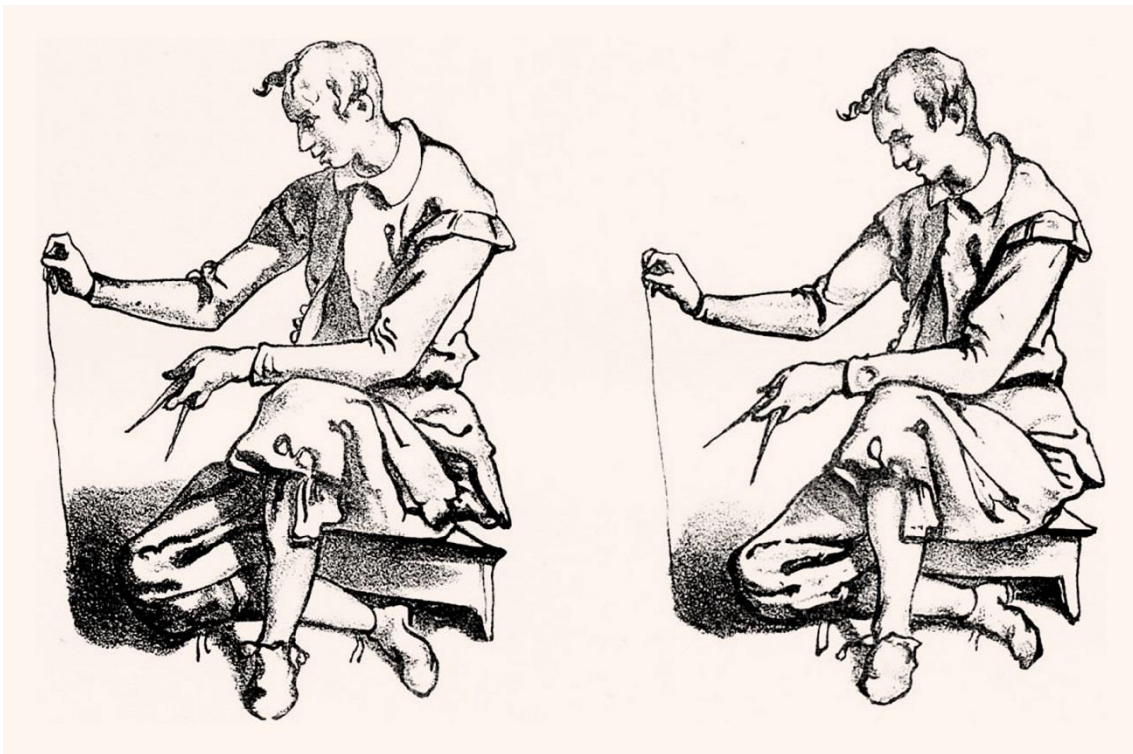


Fig. 2.34. Dibujos atribuidos a Jacopo Chimenti, erróneamente considerados como un par estereoscópico



Fig. 2.35. Antoine Claudet, ca. 1850, *Familia Wheatstone*, Daguerrotipo estereoscópico

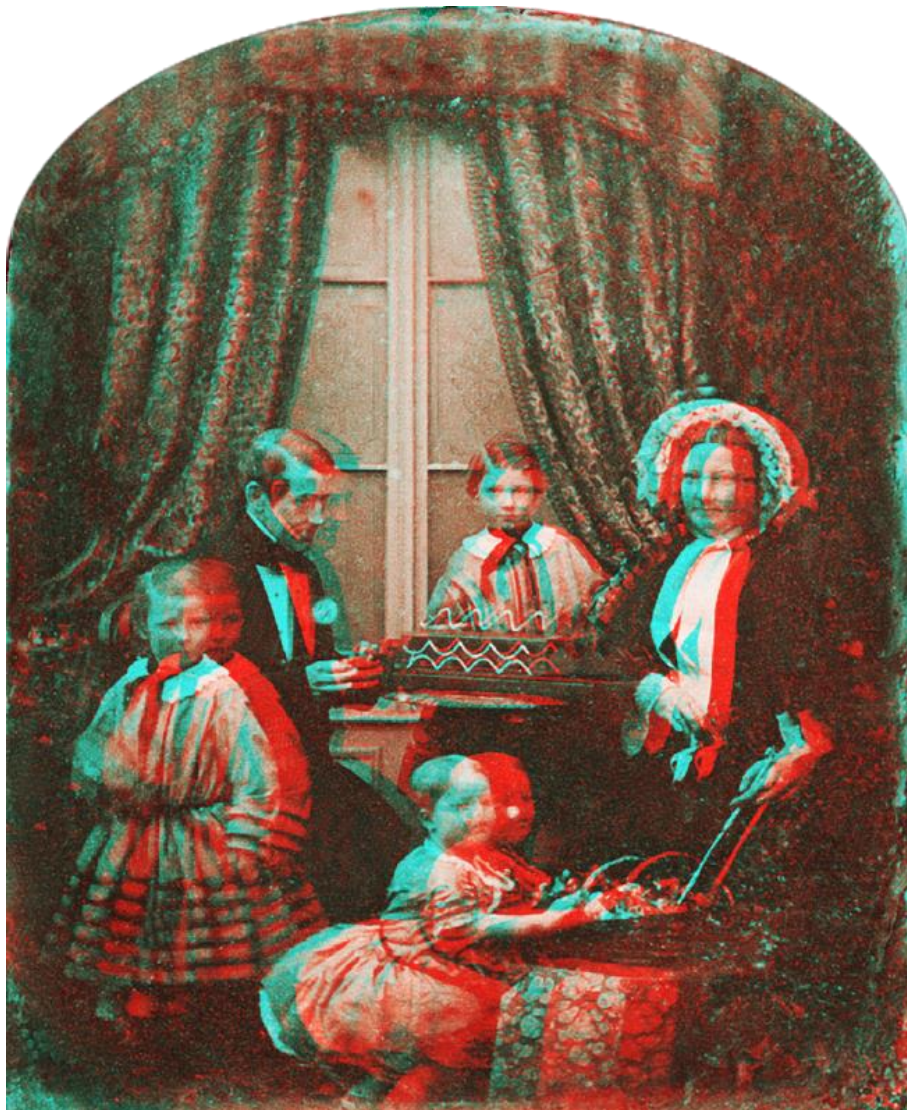


Fig. 2.36. Anaglifo realizado, a partir del par estereoscópico anterior. Pedro Cabezos



El nacimiento de la estereoscopia es prácticamente coetáneo al de la fotografía, Wheatstone se puso en contacto, tanto con inventores como con fotógrafos, para que le proporcionaran pares estereoscópicos, muestra de ello es el retrato de familia estereoscópico, realizado por Antoine Claudet a la familia Wheatstone en torno a 1850 (Fig. 2.35).

El artículo de Wheatstone sienta las bases de la estereoscopia y constituye el punto de partida hacia el fervor por lo estereoscópico. En capítulos posteriores tendremos la ocasión de adentrarnos en el contenido del artículo y de exponer los principios de la estereoscopia.

3. EL SISTEMA VISUAL

En todo proceso perceptivo existe un órgano sensorial capaz de captar los estímulos externos y codificarlos en impulsos eléctricos, que son transportados mediante el sistema nervioso periférico hasta el sistema nervioso central, dónde son interpretados por el cerebro para crear las sensaciones que percibimos.

En este capítulo nos ocuparemos de la fisiología del sistema visual, para conocer sus partes y funcionamiento desde la captación, codificación y transmisión de los estímulos visuales hacia las zonas de procesamiento, donde se produce una compleja labor organizativa de la información y se descifran sus características.

3.1. Fisiología del sistema visual

En la visión humana, los ojos son los órganos sensoriales donde se registran y codifican los estímulos luminosos que son transmitidos, a través de las vías ópticas, hacia las zonas del cerebro que procesa los estímulos.

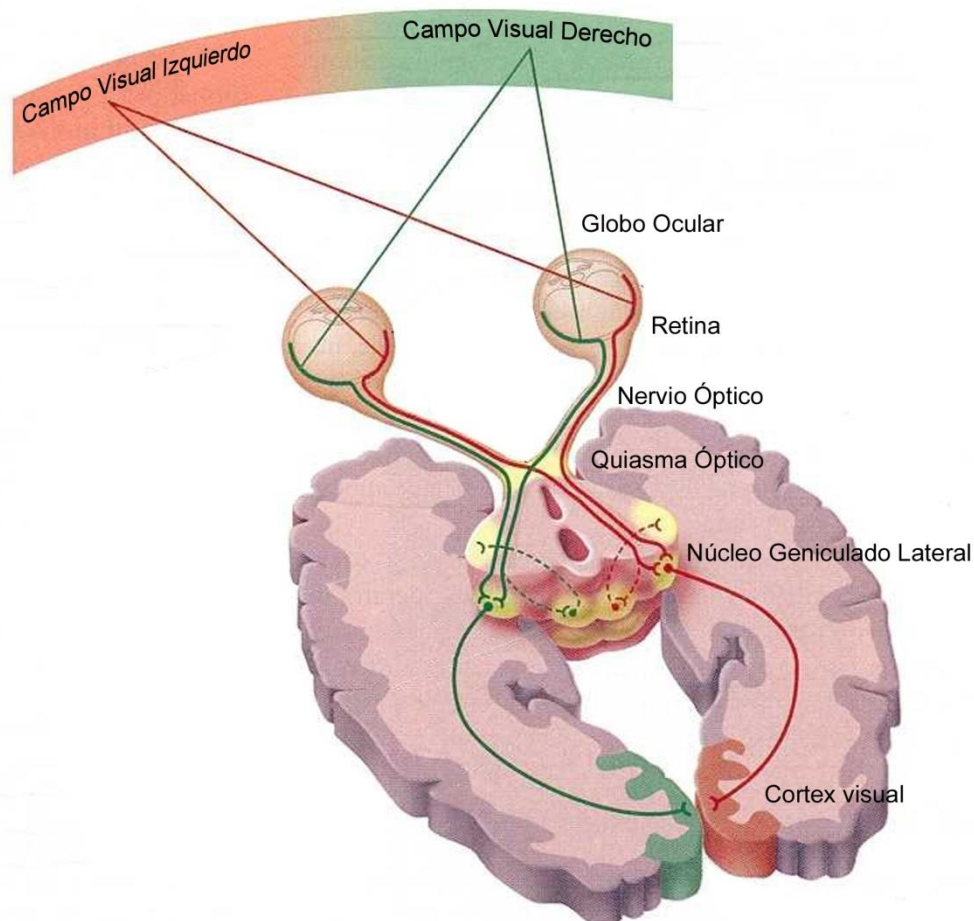


Fig. 3.1. Esquema del Sistema Visual Humano

3.1.1. Estructura del ojo humano

La estructura y funcionamiento del ojo es, en cierta manera, muy similar al de una cámara fotográfica; consta de lentes, una apertura por donde entra la luz y un sensor que codifica las señales luminosas.

El globo ocular es prácticamente esférico con un diámetro medio de entre 24 y 26 milímetros; está rodeado externamente por una capa opaca, blanca y fibrosa, llamada esclera o esclerótica, que configura la cámara oscura, al igual que lo hace el cuerpo de una cámara fotográfica.

El conjunto de lentes del ojo lo constituyen la córnea y el cristalino, entre los que se interpone el iris, que posee una apertura de diámetro variable, la pupila, por donde entra la luz en el ojo. Este conjunto es perfectamente asimilable a un objetivo fotográfico que tiene lentes y una apertura por donde entra la luz en el cuerpo de la cámara.

A diferencia de una cámara, el espacio interior del ojo está relleno de un fluido transparente gelatinoso denominado humor vítreo. La capa interna del ojo es la retina, cuya parte posterior posee los fotorreceptores sobre los que se proyecta la imagen, doblemente invertida, formada por los rayos luminosos que atraviesan la pupila, habiendo sido refractados por la córnea y después por el cristalino.

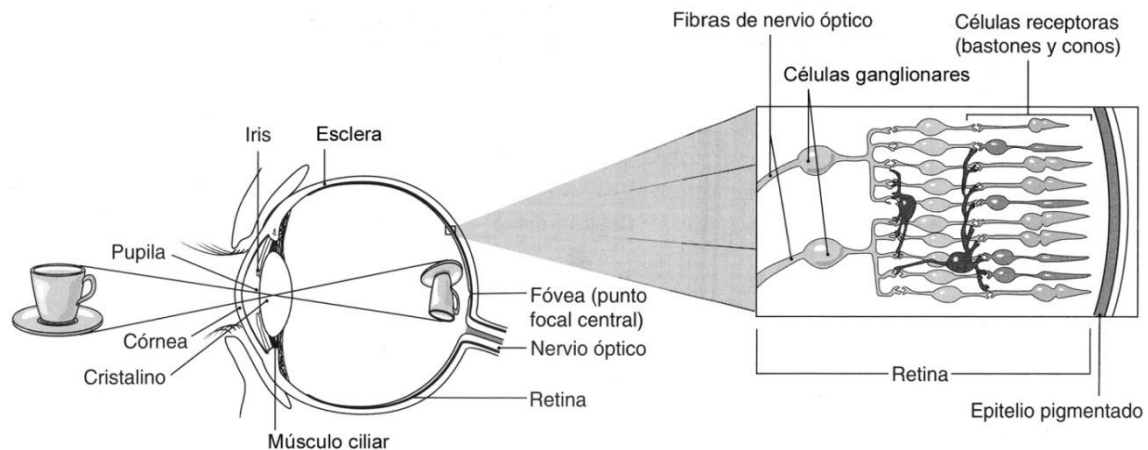


Fig. 3.2. Partes del ojo y detalle de las células fotorreceptoras de la retina. (Adaptado de Goldstein (2009))

Los fotorreceptores del ojo son de dos tipos: conos y bastones. Los conos están adaptados a la visión diurna y se distinguen tres tipos, cada uno especializado en captar una longitud de onda concreta (roja, verde y azul), dependiendo del contenido de unas sustancias o pigmentos visuales llamadas opsinas.

Los bastones están dedicados a la visión nocturna y no aportan información acerca del color, tienen una gran sensibilidad a la luz y por eso se saturan en condiciones de luz

elevada. Los conos y bastones convierten el estímulo luminoso en impulso nervioso y sus terminaciones están conectadas al nervio óptico, que parte de un punto en la retina llamado disco óptico o papila óptica, que carece de fotorreceptores por lo que supone un punto ciego en el campo visual. Esta carencia pasa prácticamente desapercibida gracias al trabajo de nuestro cerebro, que utiliza la información de las zonas adyacentes al punto ciego para suplantar la información que se pierde. No obstante podemos detectar la presencia del punto ciego realizando el siguiente experimento; cerremos el ojo izquierdo y fijemos la mirada sobre el círculo de la figura Fig. 3.3, a una distancia de unos 40 cm, si nos vamos acercando progresivamente, sin dejar de mirar fijamente el círculo, llegará un momento en el que la cruz que aparece en la figura entra en la zona ciega y la perderemos de vista, al ser suplantada por la información adyacente que, en este caso, es el papel blanco.



Fig. 3.3. Patrón para detectar la presencia del punto ciego

La función de la retina es análoga al del sensor de la cámara, contiene foto receptores dedicados al rojo, verde y azul, que codifican la señal lumínica, pero, mientras que la retina sigue la curvatura del globo ocular, el sensor de una cámara es plano.

Se estima que el ojo humano contiene alrededor de 6.4 millones de conos y entre 110 y 125 millones de bastones (Osterberg, 1935), repartidos por la retina de manera no uniforme, al contrario de lo que ocurre en el sensor de una cámara digital que sigue un patrón uniforme.

La zona central de la retina denominada mácula, de unos 5 mm de diámetro, es la que tiene una mayor densidad de conos y prácticamente carece de bastones. En su centro se encuentra una depresión de apenas 1.5 mm de diámetro llamada fóvea, que contiene unos 200.000 conos (Polyak, 1941). La fóvea es la responsable de la visión central o foveal gracias a la que percibimos la máxima nitidez de nuestro campo visual.

Aunque el campo visual monocular puede abarcar un ángulo de unos 150° en horizontal y 130° en vertical, la zona más nítida de nuestro campo visual es bastante exigua, unos 2°. Cuando leemos un libro, únicamente alcanzamos a ver con todo detalle la palabra sobre la que fijamos nuestra vista, por ello, nuestra mirada recorre palabra por palabra y realiza un barrido constante que aporta la información necesaria.

Es la superposición de toda esta información, procesada por nuestra mente, lo que produce la percepción.

El ojo rara vez permanece inmóvil, salvo que lo hagamos deliberadamente, ya que cuando contemplamos una escena se realizan una serie de movimientos, conocidos como movimientos sacádicos, que actúan a modo de barrido, gracias a lo que se obtiene una visión de conjunto de aquello que observamos. También se producen una serie de micromovimientos vibratorios reflejos denominados microsacadas, extremadamente rápidos con frecuencias de entre 30 y 70 hertzios, que sirven para refrescar la información de los fotorreceptores.

El resto de la retina, prácticamente el 95% de ella, se denomina retina periférica y tiene tanto conos como bastones. Esta zona es la responsable de la visión periférica, que nos permite detectar los movimientos y percibir bultos.

3.1.2. Acomodación

La acomodación es el acto de enfocar en nuestro sistema visual. En una cámara fotográfica existe un grupo de lentes que se desplazan hacia adelante o hacia atrás para conseguir el enfoque. Sin embargo en el ojo esto se consigue mediante la deformación del cristalino, que sufre un abombamiento o cambio de curvatura, producido por un músculo adherido a su perímetro denominado músculo ciliar. Cuando el músculo ciliar está en reposo, el cristalino posee una curvatura tal que permite un enfoque a infinito, mientras que cuando éste se contrae, comprime el cristalino y le produce una mayor curvatura, aumentando así su potencia refractiva, con lo que se consigue enfocar los objetos más cercanos. El límite próximo de enfoque varía con la edad, puesto que al disminuir la capacidad de contraerse del músculo ciliar, se produce la llamada vista cansada. Así como un niño podría llegar a enfocar un objeto situado a 5 cm de su ojo, una persona adulta con vista normal puede acomodar su visión, sin dificultad, hasta unos 25 cm.

El acto de acomodar permite que se proyecte una imagen nítida sobre la retina, pero esta imagen sufre una doble inversión. La curvatura de la retina produce que la imagen retiniana se asemeje a una perspectiva curvilínea y así es recogida y codificada por los fotorreceptores de la retina, sin embargo, esto no hace que percibamos una imagen invertida, ni que apreciemos curvada la realidad, como en una perspectiva curvilínea, sino que el procesamiento que nuestro cerebro realiza de los estímulos es capaz de corregir tanto la inversión, como las deformaciones de la imagen retiniana.

3.1.3. Vergencia

La vergencia o convergencia ocular es el movimiento simultáneo de los ojos para que ambos ejes oculares se dirijan hacia el objeto que se está mirando. Ello permite que el cerebro sea capaz de fusionar correctamente ambas imágenes gracias a un proceso mental llamado estereopsis. Cualquier disfunción en los mecanismos de vergencia, ocasiona visión doble o diplopia, como en el caso de las personas que sufren estrabismo.

Siendo muy estrictos y simplistas, podríamos decir que nuestro cerebro logra una visión fusionada de aquellos puntos del espacio cuya proyección cae sobre puntos homólogos o correspondientes de las retinas, entendiendo como tales aquellos que coinciden en posición en ambas retinas (Fig. 3.4).

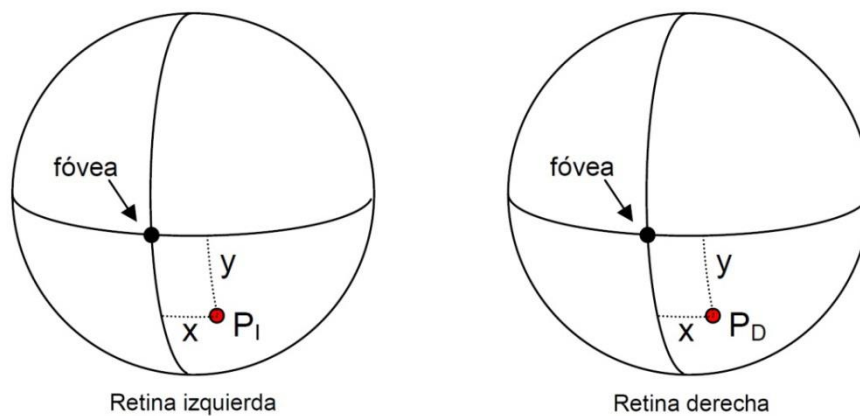


Fig. 3.4. Los puntos homólogos de las retinas tienen la misma posición con respecto a la fovea

3.1.4. El Horóptero

El hecho de que los ejes visuales converjan en un punto permite que las proyecciones de éste caigan sobre el centro de ambas retinas, que son puntos homólogos, y se obtenga una visión fusionada del punto de convergencia, pero puede haber otros puntos dentro del campo visual, distintos al punto de convergencia, cuya proyección caiga sobre otros puntos homólogos de las retinas y por tanto se obtenga de ellos una visión fusionada.

Esta idea origina el concepto del horóptero, referido al lugar geométrico que comprende los puntos del espacio de los que se obtiene una visión fusionada, al fijar la vista sobre un punto determinado. Ya vimos en la introducción histórica la idea de horóptero descrita por Aguillón, pero este concepto evoluciona y se llega a la definición del horóptero longitudinal, cuyo espacio geométrico queda definido por el círculo de Vieth-Müller (Fig. 3.5), formulado a principios del siglo XIX, basándose en un principio geométrico, ya utilizado por Aguillón, que corresponde a la proposición 21 del libro III

de Euclides: “En una circunferencia, una cuerda subtiende ángulos iguales cuando los vértices están en cualquier punto de uno de los dos arcos que determina la cuerda”. Esta construcción, actualmente llamada “arco capaz”, nos permite representar los puntos que subtienden un mismo ángulo con respecto a los ojos, dado un punto de convergencia ocular.

Este principio geométrico ocasiona que las direcciones visuales de los puntos, pertenecientes al contorno del círculo, caigan necesariamente sobre puntos homólogos de las retinas. El círculo queda definido por tres puntos: el punto de fijación, donde convergen los ejes visuales, y por los puntos nodales o centros ópticos de cada ojo; su contorno describe los puntos del espacio que se apreciarán fusionados al fijar la vista sobre un punto del círculo.

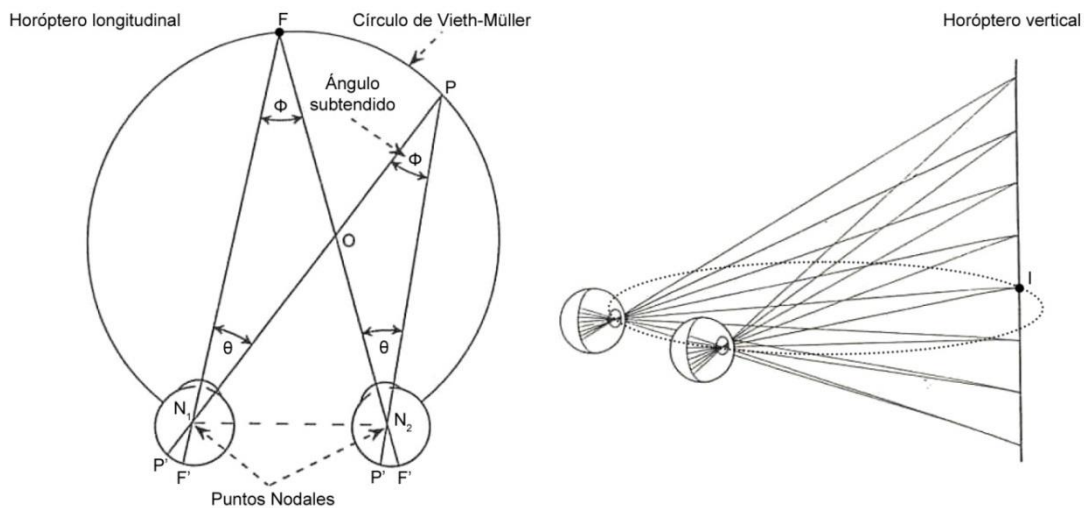


Fig. 3.5. Círculo de Vieth-Müller que determina el horóptero teórico longitudinal (izda.) y representación de la línea que constituye el horóptero vertical (dcha.)

En realidad el círculo de Vieth-Müller representa únicamente el Horóptero longitudinal, es decir, los puntos del espacio que están sobre el plano horizontal que contiene a los puntos nodales de los ojos y el punto de fijación, pero existen más puntos del campo de visión que cumplen esta condición; ellos constituyen el horóptero vertical, que está constituido por una línea vertical, contenida en el plano de simetría de la cara, donde este corta al círculo de Vieth-Müller. Los puntos de esta recta vertical caerían sobre puntos homólogos de la retinas pertenecientes a un meridiano retiniano (Fig. 3.5).

En las consideraciones previas, se adopta un punto de fijación perteneciente al plano horizontal que contiene a los puntos nodales de los ojos, ya sea con una convergencia ocular simétrica o con una asimétrica, lo que no afectaría a la configuración geométrica del horóptero (Fig. 3.6 a y b). Sin embargo, si se considera una posición asimétrica, fuera del plano horizontal de la mirada, se debe contemplar el efecto de la ciclo rotación de los ojos, es decir, su rotación alrededor del eje óptico, con lo que el lugar geométrico que comprende el horóptero se complica considerablemente y

obedece a una curva helicoidal, intersección de un cilindro y un paraboloides hiperbólico equilátero como propone Helmholtz (1902) (Fig. 3.6 c)

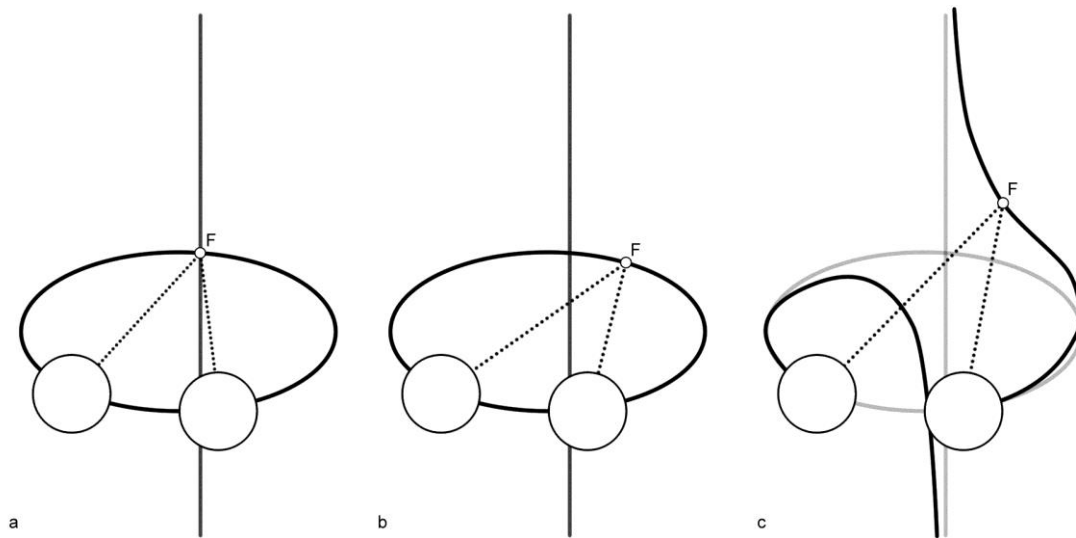


Fig. 3.6. El horóptero teórico según la situación del punto de fijación.

Tal como se ha podido ver, el horóptero es un espacio muy acotado, que ni siquiera comprende una superficie, salvo que se considere un punto de fijación en el infinito, en cuyo caso el horóptero sería un plano vertical, frontal al espectador. Ante esta consideración uno podría preguntarse si realmente es tan limitada nuestra visión binocular, que dado un punto de fijación, sólo se pueden fusionar los puntos que estarían sobre el horóptero. Esta misma pregunta se hizo Wheatstone, que como buen científico, no tomaba ninguna consideración previa como cierta, salvo que él mismo la hubiera corroborado. Wheatstone se cuestionó la rigidez del horóptero, ofreciendo razones bastante claras de por qué este espacio geométrico no debía ser tan estricto:

“Las mismas razones, basadas en los experimentos de esta memoria, que refutan la teoría de Aguillón, me llevan a rechazar que la ley de puntos correspondientes de las retinas sea una explicación exacta del fenómeno de la fusión de la visión. De acuerdo con el primero, los objetos se fusionan cuando se encuentran sobre el plano del horóptero, mientras que, posteriormente, se ha dicho que sólo cuando están sobre el círculo de visión única, pero ambas consideraciones resultan incongruentes con la visión binocular de objetos tridimensionales, cuyos puntos se perciben fusionados, a pesar de que se encuentran a distintas distancias de los ojos. He probado ya que la suposición, realizada por los defensores de la teoría de los puntos correspondientes, de que las imágenes proyectadas por un objeto en las retinas son iguales, es contraria a la realidad, salvo en el caso en el que los ejes ópticos sean paralelos”. (Wheatstone, 1838)

En efecto, gracias a los experimentos realizados con el estereoscopio, Wheatstone descubrió que había un cierto margen para la fusión, es decir, que los puntos no correspondientes, dentro de unos límites de disparidad retinal, también llegan a fusionarse. Sin embargo, esta no fue la conclusión más relevante, sino que uno de los descubrimientos más importantes de Wheatstone fue señalar que la disparidad retinal era la causante de la sensación de relieve.

Las conclusiones de Wheatstone inspiraron a otros científicos como el danés, Peter Ludvig Panum quien estudio en profundidad los límites de disparidad retinal dentro de los que se producía la fusión (Panum, 1858), dando lugar a lo que hoy se conoce como áreas fusionales de Panum, concepto que, como ya vimos en la introducción histórica, ya había intuido Alhazén.

3.1.5. Áreas y espacios fusionales de Panum

Se define el área de Panum como la zona de la retina de un ojo, cuyos puntos, al ser estimulados conjuntamente con un punto fijo del otro ojo, dan lugar a una percepción fusionada. Por tanto, cada punto de la retina de un ojo tiene su área de Panum correspondiente en la retina del otro ojo. Esta flexibilidad es lo que permite fusionar los objetos, más allá del horóptero teórico.

Las áreas de Panum son la proyección retiniana de un conjunto de puntos en el espacio que se fusionan al fijar la mirada en un punto. Estos puntos constituyen el denominado espacio de Panum, cuya definición puede parecer muy similar a la del horóptero, sin embargo, al considerarse las disparidades retinianas dentro de las que se logra la fusión, los límites de los espacios de Panum constituyen una superficie y no una línea como ocurre con el horóptero.

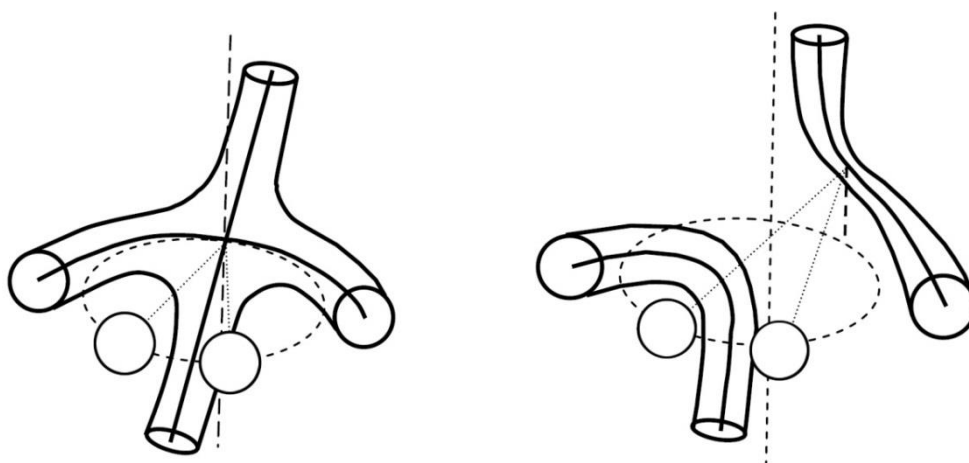


Fig. 3.7. Espacios de Panum para fijación sobre un punto en el plano horizontal de la mirada (izda.) y para otro punto fuera del plano horizontal con convergencia ocular asimétrica (dcha.)

La determinación de los espacios y las áreas de Panum se realiza de modo empírico utilizando un test visual, en el que el sujeto fija su mirada en un punto y una varilla móvil recorre su campo visual para que indique los límites en dónde la varilla se percibe fusionada. La Fig. 3.7 muestra, de forma simplificada, los límites de los espacios de Panum para una convergencia simétrica y plano de mirada horizontal (izda.) y para un caso de convergencia asimétrica y plano de mirada no horizontal (dcha.)

La medición empírica de los espacios de Panum permite a su vez estimar el horóptero empírico, que en esta representación aparece como los ejes de estas superficies tubulares, lo que no es estrictamente cierto, pero cabe destacar que se produce una desviación entre el horóptero teórico, representado con línea discontinua y el horóptero empírico, que ha sido atribuida a los desajustes naturales de los ejes visuales y a la forma de la retina, que no es perfectamente esférica.

A pesar de los numerosos estudios realizados hasta la fecha, existe una disparidad de resultados en la estimación del tamaño de las áreas de Panum sobre la retina, debido a que su determinación viene condicionada por diversos factores como el tiempo de observación del estímulo, la subjetividad del sujeto que realiza el test, la excentricidad de la zona en la retina o la presencia de otros estímulos perimetales, haciendo que resulte un proceso bastante complejo.

El tamaño de las áreas de Panum se amplía a medida que aumenta el tiempo de observación y su tamaño no es constante en todas las zonas de la retina, sino que se amplía en las zonas perimetales y decrece en la zona foveal. Además se ha podido constatar que las áreas de Panum tienen forma elíptica (Panum, 1858; Ogel y Prangen 1953), con su eje mayor situado en el plano horizontal de la mirada, lo que refleja una mayor habilidad de nuestro cerebro para detectar disparidades en el sentido horizontal que en el vertical.

La capacidad de fusionar los puntos que caen sobre las zonas emparejadas de las retinas, depende en gran medida de cómo los estímulos que se recogen en los fotorreceptores pertenecientes a áreas de Panum correspondientes, acaban siendo procesados en una zona concreta del cerebro, gracias a las interconexiones neuronales que allí las conducen por medio del nervio óptico. Por tanto, resulta interesante estudiar los caminos neuronales hacia el cerebro y las zonas de procesamiento.

3.1.6. La vía visual

Hemos visto como las terminaciones nerviosas de la retina se concentran en un punto para formar el nervio óptico. Parecería lógico pensar que existe una conexión o fibra nerviosa en el nervio óptico por cada fotorreceptor de la retina, pero en realidad hay

muchos menos. Se estima que en cada retina hay unos 126 millones de receptores, mientras que el nervio óptico sólo tiene alrededor de 1 millón de fibras. Esto se debe a que la información de los fotorreceptores es codificada por otras células, llamadas ganglionares, que abarcan la información de un determinado campo receptivo constituido por un promedio de 126 fotorreceptores (Fig. 3.1).

La codificación del campo receptivo de una célula ganglionar en impulsos eléctricos fue estudiada por primera vez por Hartline y Graham (1932), quienes utilizaron una especie de artrópodo llamado *Limulus*. Posteriormente Hartline repetiría el experimento con una rana, mientras que Kuffler (1953) y Hubel y Wiesel (1961), lo harían con un gato. Estos pioneros sentaron las bases de la codificación de los impulsos visuales, estableciendo que el campo perceptivo de una célula ganglionar se correspondía con una zona aproximadamente circular de fotorreceptores de la retina que producen dos tipos de impulsos: excitatorios o de encendido e inhibitorios o de apagado.

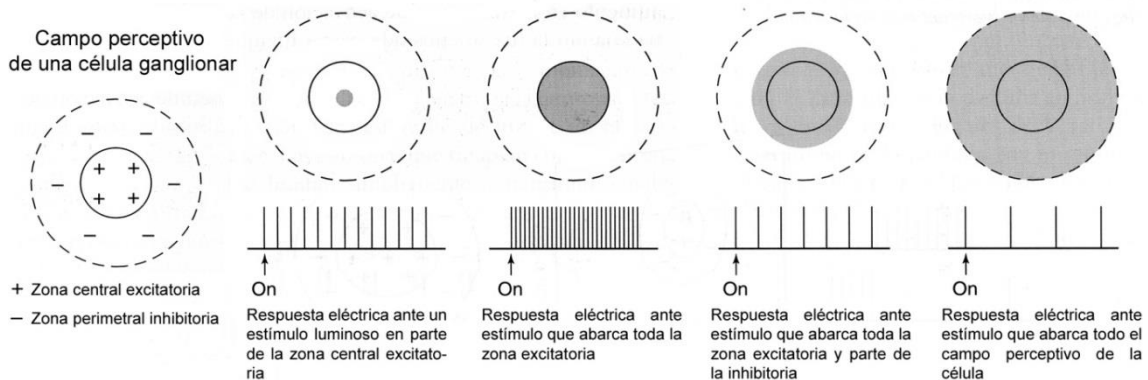


Fig. 3.8. Campo receptivo de una célula ganglionar y codificación eléctrica ante diferentes estímulos luminosos que cubren una determinada zona del campo perceptivo (zona sombreada)

Los fotorreceptores que producen impulsos excitatorios están situados en el centro del campo perceptivo, mientras que los inhibitorios se sitúan en la periferia del campo. Ello origina que, ante un estímulo lumínico del campo, los fotorreceptores produzcan una combinación de impulsos sobre la célula ganglionar que los traducirá en un determinado pulso eléctrico, que es transmitido a través de una fibra del nervio óptico hacia las zonas de procesamiento visual del cerebro. Cabe destacar que la magnitud de los impulsos eléctricos es constante y que la codificación se basa en la frecuencia con que éstos son emitidos. Se ha de notar que la frecuencia de los impulsos no siempre es proporcional a la magnitud del estímulo, debido al carácter inhibitorio de la zona periférica.

Los nervios ópticos se cruzan en el quiasma óptico, donde las fibras provenientes del lado derecho de las retinas, son dirigidas hacia el lado derecho del cerebro, mientras

que las del lado izquierdo, se conducen hacia la parte izquierda, lo que se conoce como hemidecusación de los nervios ópticos.

Tras la separación de las fibras, cada parte es conducida al núcleo geniculado lateral (NGL), del lado del cerebro que le corresponde. Los núcleos geniculados laterales pertenecen al tálamo del cerebro y se piensa que desempeñan una labor organizativa de la información. Se encargan de reconducir los estímulos a la zona de procesamiento que le corresponde y de responder a su vez a los requerimientos que provienen de ellas en un proceso de retroalimentación (Casagrande y Norton, 1991; Humphrey y Saul, 1994).

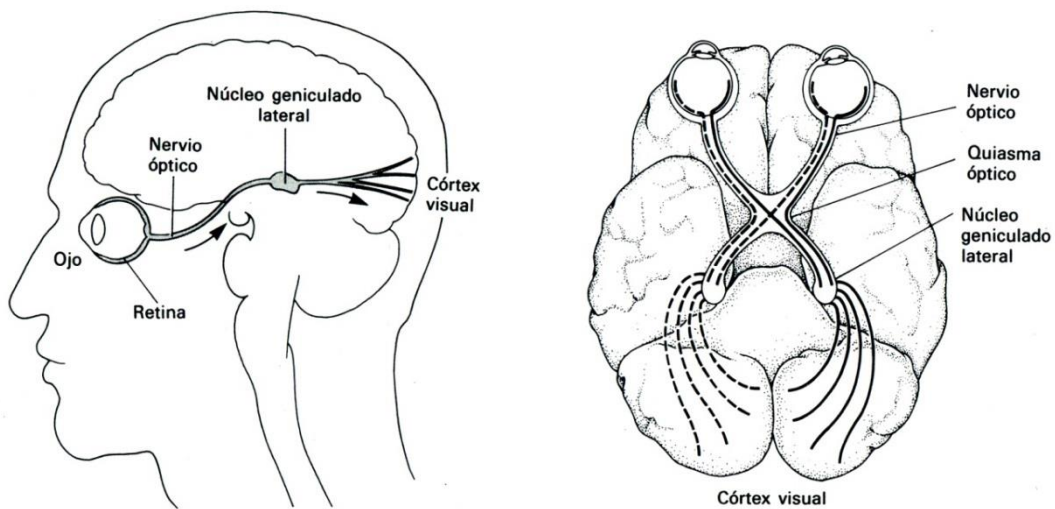


Fig. 3.9. Secciones vertical y horizontal del sistema visual humano

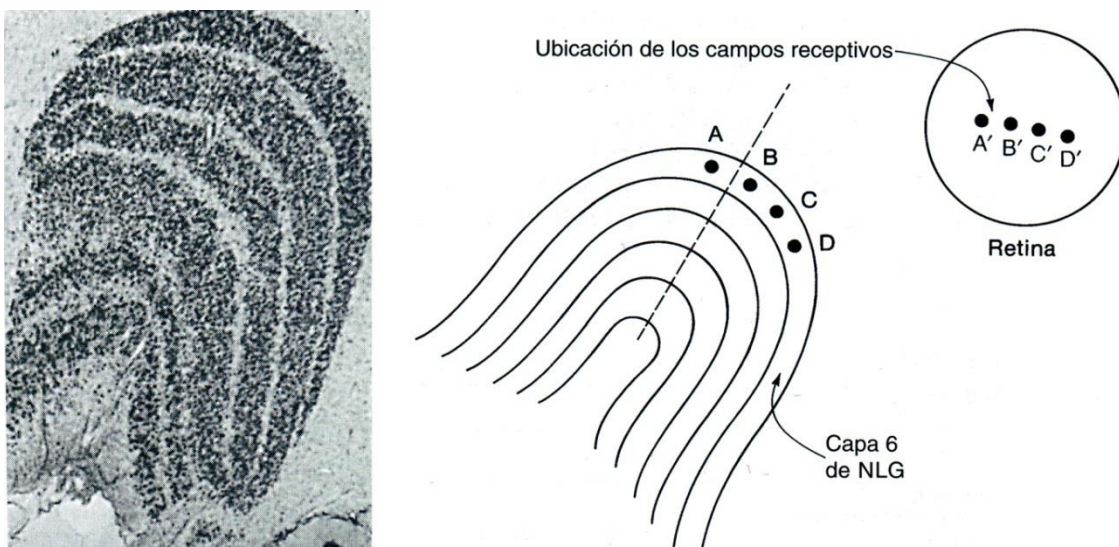


Fig. 3.10. Corte del NGL con evidencia de sus 6 capas que aparecen como franjas más oscuras (izda.) Esquema de correspondencia entre puntos del mapa retinotópico del NGL con la retina (dcha.)

Cada NGL recibe la información de ambas retinas que se organiza en una serie de capas que conforman un mapa retinotópico, donde cada capa recibe información de

un sólo ojo y se alternan en una estructura que Walls (1953) comparó con un Sandwich Club, puesto que, si un palillo atraviesa las distintas capas, se encuentra con información perteneciente al mismo lugar de las retinas (Fig. 3.10).

De cada NGL parten 1,5 millones de fibras nerviosas hacia el córtex visual, situado en el lóbulo occipital, donde continúa la compleja labor de procesamiento de los estímulos que dan lugar a las percepciones visuales.

El córtex visual también se organiza por capas, pero su estructura es mucho más compleja, 250 millones de neuronas frente a 1 millón del NGL. Los estudios desarrollados por Hubel y Wiesel, a partir de 1959, acerca de la organización y la respuesta de las neuronas del NGL y el córtex visual, les hizo merecedores del Premio Nobel de medicina en 1981. En ellos descubren que el córtex visual posee neuronas especializadas en responder ante aspectos concretos de los estímulos, como el tamaño, la orientación y el movimiento. Se distinguieron tres tipos de neuronas en función del estímulo al que respondían mejor (Hubel, 1982).

Llamaron células corticales simples a aquellas neuronas que respondían ante una franja luminosa estática con una orientación determinada, mientras que denominamos células corticales complejas, a aquellas que respondían a franjas luminosas con una determinada orientación, pero sólo cuando ésta se desplazaban por el campo visual con una dirección y sentido concretos. Por último, llamaron células hipercomplejas a aquellas que respondían únicamente ante estímulos tipo franja o esquina, de un tamaño concreto, cuando se desplazaban con una dirección y sentido determinados. Estos tres tipos de neuronas han recibido el calificativo de detectores de características.

Otro hallazgo importante en la investigación de Hubel y Wiesel fue determinar que las neuronas que responden ante una orientación determinada del estímulo, en una zona determinada de la retina, se disponen a lo largo de una línea o columna, ortogonal a la superficie del córtex visual, que denominaron columnas de orientación (Fig. 3.12).

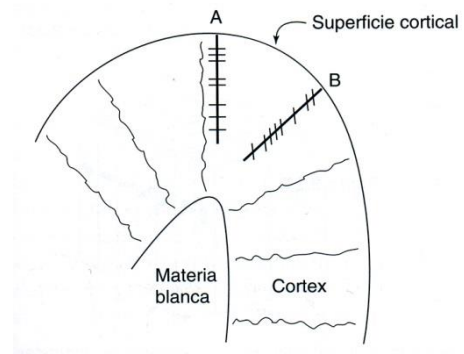


Fig. 3.12. Los microelectrodos insertados en A y B, son perpendiculares a la superficie del córtex visual y en su recorrido atraviesan neuronas simples, complejas e hipercomplejas que son sensibles a una misma orientación del estímulo; horizontal en el caso de A y vertical en el caso de B

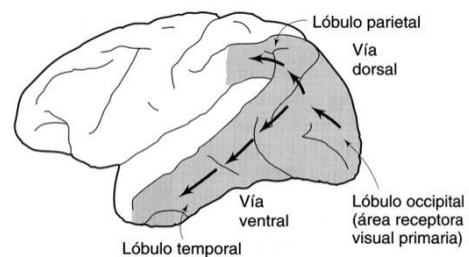


Fig. 3.11. Corrientes visuales desde el córtex visual hacia el lóbulo temporal (vía ventral) y hacia el lóbulo parietal (vía dorsal)

También se llegó a la conclusión de que parte de estas columnas respondían mejor a los estímulos provenientes de un solo ojo y se les denominó columnas de dominancia ocular. Éstas se alternan de forma ordenada en función de su dominancia con una secuencia izquierda – derecha – izquierda - derecha. Hubel y Wiesel suponen que todas estas columnas se constituyen formando hipercolumnas que forman un bloque de información de los estímulos recogidos en una zona determinada de las retinas.

Con respecto a la evaluación de la disparidad retiniana o binocular, se ha descubierto la existencia, en el córtex visual, de neuronas especializadas en detectar los puntos de las imágenes que se corresponden y su grado de disparidad, denominadas células de profundidad binocular o detectores de disparidad (Berlow, Blakemore y Pettitgrew, 1967; Hubel y Wiesel, 1970). La respuesta de estas células ante la disparidad de las imágenes retinianas podría ser la causa de la percepción del relieve.

Los estudios de Hubel y Wiesel, suponen un gran avance en el conocimiento de la visión, sin embargo, se trata sólo de un primer paso hacia los mecanismos de la percepción visual. A medida que avanzan los estudios y las técnicas de análisis de los impulsos nerviosos, han ido apareciendo más zonas del cerebro relacionadas con la visión. Según Ungerleider y Mishkin (1982) la mitad del córtex cerebral puede activarse mediante estímulos visuales, produciéndose una corriente de información que parte del córtex visual hacia el lóbulo temporal (vía ventral), relacionada con el reconocimiento de objetos y otra corriente hacia el lóbulo parietal (vía dorsal), relacionada con el posicionamiento espacial de objetos. Cuanto más se conoce acerca de los mecanismos de la percepción visual, más complejo parece su funcionamiento; investigadores como Rolls y Tovee (1995) han detectado zonas en el córtex del lóbulo parietal, sensibles a estímulos tan específicos como la imagen de una cara. Ello planteó el debate entre si esta especialización de las neuronas ante formas concretas obedece a un rasgo evolutivo o es fruto de la experiencia.

Los experimentos realizadas por Gauthier y sus colaboradores (1999), dejan claro que, si bien, la evolución es la que rige mayoritariamente el comportamiento del sistema visual, la experiencia también puede modular el comportamiento neuronal. Todas estas investigaciones realizadas desde el punto de vista fisiológico nos ayudan a entender el funcionamiento de la visión, pero distan mucho de ofrecer una visión completa del fenómeno, puesto que todavía queda mucho por descubrir de este proceso tan complejo. Otros muchos investigadores han optado por realizar un enfoque psicológico del fenómeno, prescindiendo de complejas mediciones con electrodos y escáneres cerebrales, optando por un enfoque psicológico para obtener conclusiones acerca de las impresiones perceptivas ante un estímulo concreto. Desde este punto de vista y conociendo ya los aspectos fisiológicos de la visión, veremos, en el próximo capítulo, los aspectos que determinan la percepción del relieve.

4. LA PERCEPCIÓN DEL RELIEVE

La percepción tridimensional del mundo que nos rodea es posible gracias al análisis e interpretación que realiza nuestra mente de las imágenes retinianas bidimensionales captadas por nuestros ojos. Este análisis se realiza en base a una serie de indicios o claves acerca de la profundidad de la escena, que suelen ser de distinta índole; es lo que se ha denominado el enfoque de las claves.

Según la teoría de las claves, aprendemos la conexión entre ellas y la profundidad gracias a la experiencia anterior con el entorno, de manera que, cuando hemos establecido las conexiones entre claves y profundidad, experimentamos el mundo en tres dimensiones (Goldstein, 2006). Esto explica cómo los recién nacidos y las personas invidentes de nacimiento, que han recuperado la visión, necesiten un periodo de tiempo para aprender a ver.

Se han identificado diversas claves de profundidad que se dividen en tres grupos: las claves oculomotrices, las monoculares y las binoculares, tal como propuso J. Gibson (1950). Las sucesivas publicaciones sobre percepción que han abordado este tema como Rock (1984), Goldstein (1988), Howard (1995), incluso en sus últimas reediciones, proponen la misma clasificación, pero difieren ligeramente en el número de claves y su denominación.

En los últimos años se han estudiado nuevas claves que influyen en la percepción del relieve por lo que se efectuará una clasificación actualizada y coherente con los principios proyectivos que rigen la visión humana.

4.1. Claves oculomotrices

Las claves oculomotrices son las únicas que no son extraídas de la imagen retiniana, sino que se desprenden de la tensión de los músculos que regulan el funcionamiento de los ojos, concretamente los movimientos de convergencia ocular, por un lado, y la acomodación, por otro.

4.1.1. Convergencia Ocular

El acto de convergencia ocular, tal como vimos en el capítulo anterior, lleva implícito una tensión en los músculos oculomotores, proporcional al ángulo de convergencia, de manera que, cuando se converge a un punto lejano o infinito, los músculos se relajan y cuando miramos un punto cercano, la tensión aumenta.

4.1.2. Acomodación

En la acomodación ya vimos cómo el musculo ciliar actúa sobre el cristalino para aumentar o disminuir su potencia refractiva y lograr el enfoque. De forma análoga a la convergencia, éste músculo se relaja al enfocar al infinito y se tensa al enfocar puntos cercanos.

Tanto en la convergencia, como en la acomodación, la tensión muscular son las claves que ayudan a evaluar la proximidad o lejanía del objeto hacia el que se está mirando, sobre todo en las distancias cortas, donde la convergencia suele ser la clave más eficaz de las dos (Cutting y Vishton, 1995; Mon-Williams y Tresilian, 1999).

4.2. Claves monoculares

Las claves monoculares son aquellas que nos proporcionan información acerca de la profundidad aunque sólo utilicemos un ojo. La acomodación podría clasificarse también dentro de este grupo, junto con las claves pictóricas, que se pueden extraer del análisis de la imagen retiniana bidimensional, y las claves dinámicas, que se basan en el movimiento. Este tipo de claves nos ofrecen una información muy importante acerca de la profundidad; gracias a ellas, las personas que carecen de visión en un ojo, también pueden percibir la tridimensionalidad de su entorno.

4.2.1. Claves Pictóricas

Las claves pictóricas reciben su nombre por estar relacionadas íntimamente con los recursos pictóricos empleados por los artistas para evocar en el espectador la sensación de profundidad. A continuación, introduciremos cada una de estas claves y veremos su funcionamiento.

4.2.1.1. Oclusión

Cuando un objeto oculta parte de otro, origina la interpretación de que éste objeto queda por delante del que se ve parcialmente. Esta oclusión no ayuda a estimar de forma precisa la relación de distancias entre ambos pero sí que es señal inequívoca de quien se encuentra en primer término.



Fig. 4.1 Ejemplos con oclusiones alternas

4.2.1.2. Altura relativa

El sistema perceptivo estima la distancia de los objetos en relación con su posición con respecto a la línea del horizonte, tal como ya había propuesto Alhazén en el siglo XI, de modo que los objetos cuya base se aproxima a la línea del horizonte, tienden a interpretarse más lejanos. En la Fig. 4.2, las copas y nubes más próximas a la línea del horizonte se perciben más lejanas, a pesar de que su tamaño no varía.



Fig. 4.2 Alturas relativas distintas, producen percepciones distintas de la distancia

4.2.1.3. Efectos de iluminación

Los efectos de iluminación nos proporcionan una información adicional muy valiosa. La distinción entre zonas iluminadas, en penumbra y en sombra propia, nos ayuda a percibir mejor el volumen de los objetos.

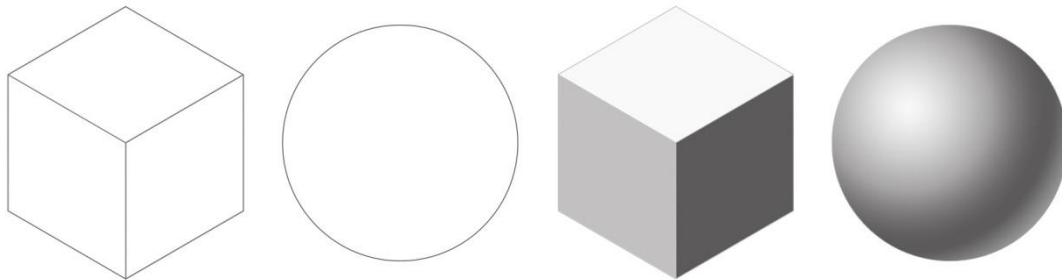


Fig. 4.3. Los efectos de iluminación proporcionan corporeidad a los objetos

Por otro lado, las sombras arrojadas revelan la posición de los objetos con respecto a su entorno. La Fig. 4.4 demuestra que la información que éstas proporcionan resulta muy valiosa para determinar la altura y posición de los objetos en relación al tablero.

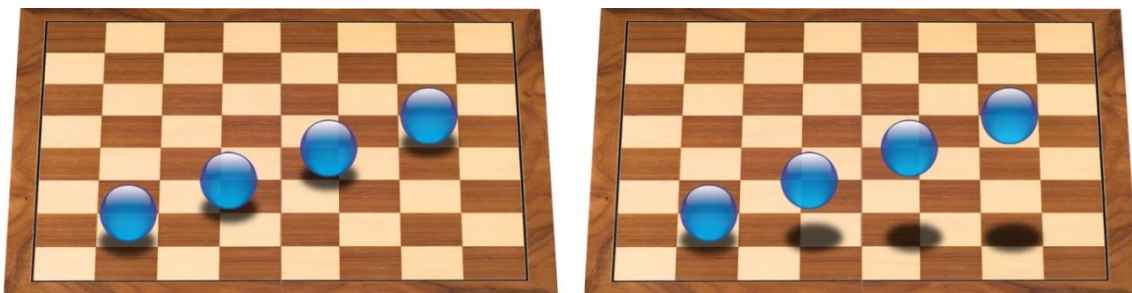


Fig. 4.4. Las sombras arrojadas ayudan a establecer la posición de las esferas con respecto al tablero

En relación con otros aspectos físicos de la iluminación, como la atenuación de la intensidad luminosa con el cuadrado de la distancia, nuestro intelecto parece ser consciente de ello en base a la experiencia, por este motivo, la gradación lumínica nos conduce a evaluar las distancias según la posición de la fuente luminosa con respecto al observador.

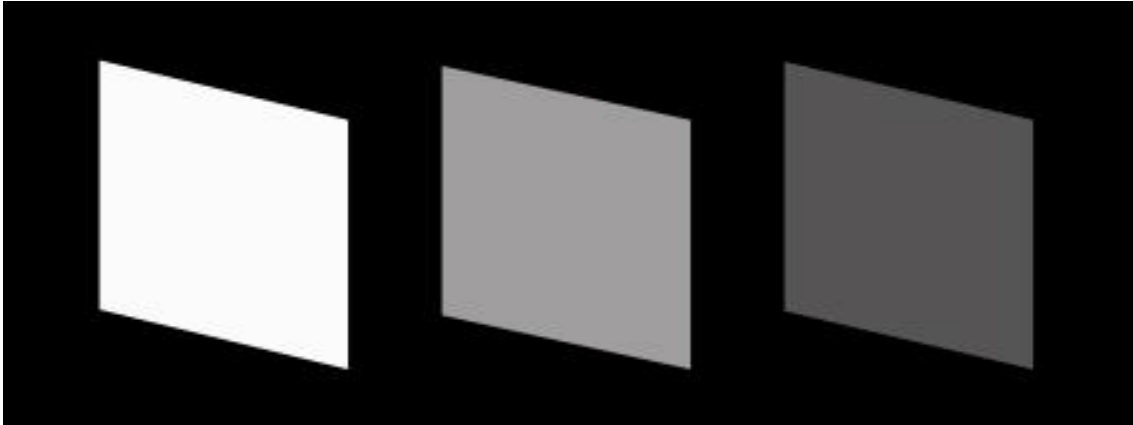


Fig. 4.5 Sensación de lejanía de las formas más oscuras en relación a la gradación de la intensidad luminosa

4.2.1.4. Tamaño relativo

Si los objetos que observamos tienen un tamaño similar, aquellos más lejanos ocuparán proporcionalmente menor campo visual que los que están más próximos, por lo que un observador percibirá más cercanos aquellos que ocupen mayor tamaño en su campo visual y viceversa.



Fig. 4.6 Los diferentes tamaños relativos entre estas pelotas de tenis nos ayudan a percibir su distancia

El conocimiento de los tamaños reales de los objetos, gracias a nuestra experiencia, es lo que nos ayuda a relacionar su distancia según el tamaño aparente dentro del campo visual. Puede darse el caso en el que se presenten, dentro del campo visual, objetos diferentes con tamaños relativos similares; en este caso podría juzgarse la

distancia estimando que aquellos cuyo tamaño real es menor deberían estar más cerca y viceversa.

La figura siguiente muestra cómo la moneda de un céntimo parecerá estar más próxima que la de dos euros, siempre y cuando el espectador esté familiarizado con sus tamaños reales.



Fig. 4.7 El estar familiarizados con el tamaño real de las cosas ayuda a juzgar las distancias

4.2.1.5. Perspectiva aérea

La atmósfera lleva en suspensión partículas de polvo, agua y contaminación que producen una neblina o bruma en el ambiente; esto hace que se pierda cierto grado de detalle en los objetos lejanos, así como que adquieran un tono blanquecino que se intensifica con la distancia. Pintores como Leonardo Da Vinci o William Turner han sabido utilizar con maestría este recurso, si bien, esta técnica ya había sido empleada en algunos murales de Pompeya datados del 30 a.C.

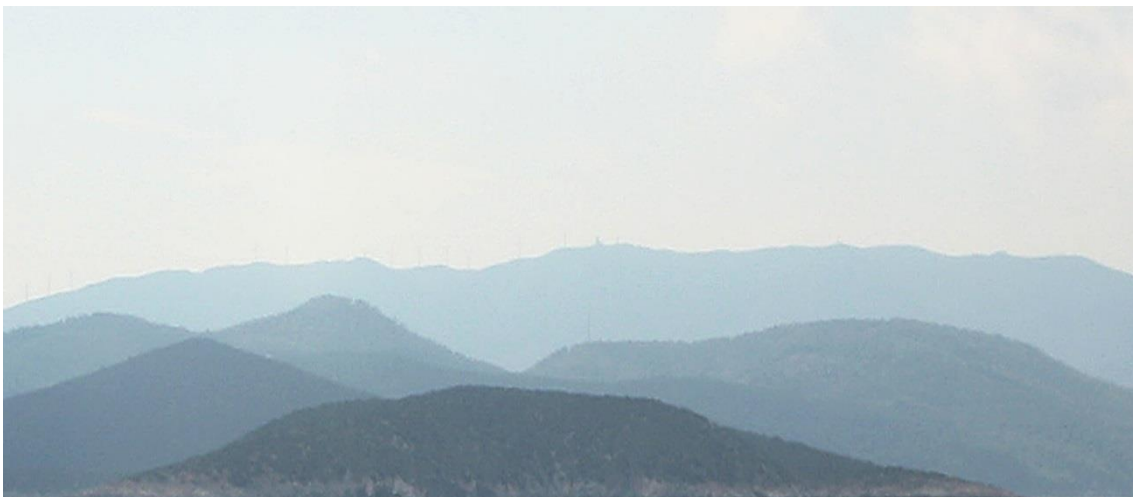


Fig. 4.8 Efecto de la perspectiva aérea. Las montañas lejanas adquieren un tono blanquecino y pierden detalle. Fotografía de Juan Cisneros

4.2.1.6. Perspectiva Lineal

Los dibujos realizados en perspectiva, las fotografías y la propia imagen retiniana, obedecen a un mismo principio; la proyección cónica de una serie de puntos en el espacio, sobre un plano, denominado plano del cuadro.

En el caso de un dibujo o pintura, el plano del cuadro es el papel o lienzo sobre el que se dibuja; en el caso de una fotografía, éste lo constituye el sensor de la cámara, mientras que en la visión humana, este papel lo desempeña la retina que, si bien, no es plana, ya comentamos que el procesamiento mental de la imagen retiniana corrige tanto la inversión, como las distorsiones debidas a su curvatura, por lo que, a los efectos prácticos, todos estos procesos pueden considerarse análogos.

Las leyes de la perspectiva producen la convergencia de las líneas que son paralelas en el espacio hacia un punto de fuga que puede ser propio, cuando las rectas no son paralelas al plano del cuadro, o impropio, cuando las rectas son paralelas al plano del cuadro, en cuyo caso se mantiene el paralelismo en la proyección. Sólo los planos del espacio frontales al espectador, es decir, paralelos al plano del cuadro, mantienen su verdadera proporción (Fig. 4.9).

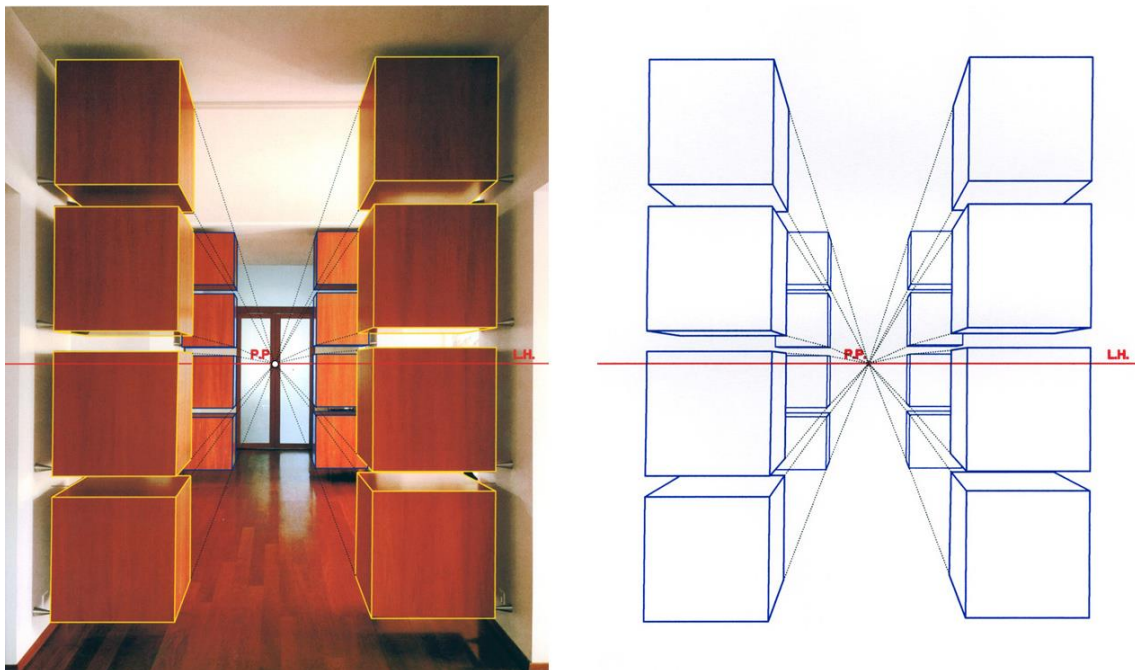


Fig. 4.9. Sólo los planos frontales al espectador conservan su verdadera proporción, mientras que las líneas paralelas, que son oblicuas al espectador, convergen en su punto de fuga.

Esta convergencia actúa como señal de profundidad y ayuda a diferenciar los planos oblicuos, con respecto al observador, de los frontales. Además, las leyes de la perspectiva llevan implícitas otras claves pictóricas, ya mencionadas, como la oclusión, la altura relativa y el tamaño relativo, por lo que, en realidad, la perspectiva

ofrece una combinación de ellas, lo que la convierte en una clave con mucho peso en el proceso perceptivo.

4.2.1.7. Gradiente de textura

El gradiente de textura es otro de los aspectos inherentes a la perspectiva cónica, cuando en la imagen aparecen las texturas de las superficies y no sólo sus contornos. Ello origina que los planos frontales con respecto al espectador mantengan una textura en verdadera proporción y de tamaño homogéneo, mientras que en los planos oblicuos se produzca una gradación del tamaño de la textura en relación a la distancia con respecto al observador.



Fig. 4.10. Gradiente de textura en la superficie del suelo que favorece la sensación de profundidad. El tamaño constante de la textura en el toro hace que se perciba en un plano frontal con respecto al observador

El primero en introducir este concepto fue el psicólogo J. Gibson (1950), quien proporcionó una compleja explicación teórica del fenómeno cuando, en realidad, parece lógico pensar que los mismos mecanismos que interpretan las claves proporcionadas por la perspectiva, deberían actuar para descifrar el gradiente de textura.

Resulta evidente que una imagen en perspectiva, cuyas superficies estén cubiertas por una textura, verá reforzada su profundidad con respecto a una perspectiva sólo de contornos, puesto que la información que de ella se obtiene es mayor.

4.2.1.8. Profundidad de campo

Ya vimos como el funcionamiento del ojo humano, a todos los efectos prácticos, es análogo al de una cámara fotográfica, donde la pupila hace la función de diafragma, la córnea y el cristalino son las lentes que configuran un sistema óptico equiparable a un objetivo, mientras la función de enfoque es realizada por el cristalino al producirse la acomodación. Por este motivo, todo lo que se describe a continuación acerca de la

profundidad de campo, utilizando términos fotográficos, es análogo a la formación de la imagen dentro del ojo y tendrá su repercusión en la percepción.

En fotografía, se llama profundidad de campo al espacio que se percibe con nitidez, tanto por delante como por detrás del punto de enfoque. Fuera de los límites de nitidez aceptable, se produce un desenfoque gradual, que facilita la percepción de la profundidad, a la vez que constituye un recurso para captar la atención del espectador sobre las zonas enfocadas.



Fig. 4.11. El efecto de desenfoque en las zonas lejanas al punto de enfoque ayuda a evaluar la profundidad

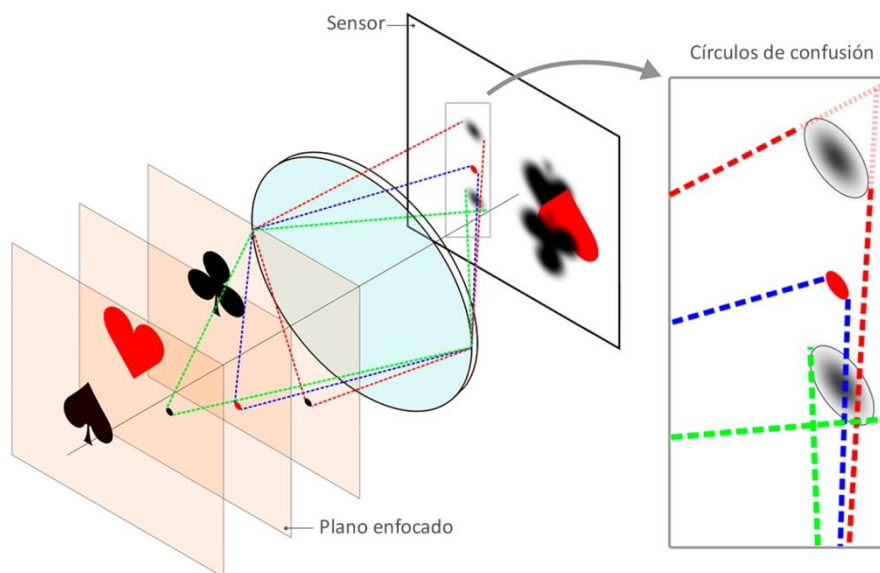


Fig. 4.12. Los círculos de confusión se producen cuando el haz de rayos, provenientes de un punto, no se focaliza sobre el sensor sino en un punto que puede estar por delante o por detrás de éste

El efecto de desenfoque se debe a que las lentes del objetivo solamente focalizan sobre un punto del sensor, el haz de rayos luminosos reflejados por un punto situado a la distancia de enfoque, mientras que el haz luminoso proveniente de aquellos puntos situados por delante o por detrás del punto de enfoque, no serán focalizados sobre el

sensor, sino que lo harán por delante o por detrás de éste, de modo que su proyección obedecerá al corte de un haz de rayos cónico por el plano definido por el sensor, que produce un círculo al que se denomina círculo de confusión (Fig. 4.12). La superposición de círculos de confusión produce las zonas desenfocadas de la imagen.

El tamaño de los círculos de confusión, es decir, el grado de desenfoco de la imagen, depende de tres factores: el diafragma, la distancia focal de la lente y la distancia de enfoque.

La apertura del diafragma limita el haz de rayos que entran en la cámara, reflejados de un punto exterior, luego, a menor apertura de diafragma, menor será el tamaño del círculo de confusión, de modo que el grado de desenfoco disminuirá.

En el ojo, el tamaño de la pupila varía según las condiciones lumínicas y también es un factor que depende de la edad. Se estima que, en una persona de mediana edad, el diámetro de la pupila varía entre 4 mm, en condiciones de luz, y 6 mm, en oscuridad total, lo que no supone un incremento tan relevante como para alterar notablemente la profundidad de campo.

Resultará interesante, para poder simular con exactitud la profundidad de campo producida por el ojo, encontrar la equivalencia entre el tamaño de la pupila y el valor de apertura del diafragma de una cámara fotográfica, valor que viene definido por el número f que se obtiene de la relación:

$$N = \frac{f}{D}$$

Siendo:

N , el número f que define la apertura del diafragma

f , la distancia focal de la lente

D , diámetro del diafragma

La distancia focal es la distancia entre el centro óptico de la lente y el sensor, cuando se enfoca al infinito. En el caso del ojo, se estima que la distancia focal entre su centro óptico y la retina, al acomodar a infinito, es de unos 22 mm. Utilizando este valor y dividiendo por los tamaños de la pupila obtenemos que, para condiciones de luz, el diámetro de la pupila se corresponde, con bastante precisión, con un número f de 5.6, mientras que, para oscuridad total, equivale aproximadamente a un número f de 3.5.

Las lentes de distancia focal corta tienen mayor potencia refractiva, lo que ocasiona que el haz reflejado por puntos, alejados de la zona de enfoque, se focalice en un entorno más próximo al sensor, en comparación con una lente de mayor distancia

focal, lo que reducirá el tamaño de los círculos de confusión, produciendo una mayor profundidad de campo.

Este es un efecto que podemos observar en las fotografías tomadas con las cámaras que incorporan los teléfonos móviles, que tienen una distancia focal muy corta, puesto que la óptica y el sensor están embebidos en un espacio menor de un centímetro. Por esta razón con ellas se obtienen fotografías con mucha profundidad de campo y resulta prácticamente imposible lo contrario.

En el ojo, el tamaño de la pupila y la distancia focal sufren poca variación, por lo que la variable que más condiciona la profundidad de campo es la distancia a la que enfocamos, por tanto, ante una imagen con poca profundidad de campo, se tiende a situar el objeto enfocado en un entorno muy próximo, mientras que en el caso de imágenes con mucha profundidad de campo éste se percibe en un entorno más lejano.



Fig. 4.13. Las imágenes con poca profundidad campo sugieren que el objeto enfocado está muy próximo al sujeto (izda.). Imágenes con mucha profundidad de campo indican un punto de enfoque mucho más retirado (dcha.)

4.2.2. Claves dinámicas

Son aquellas que se deducen cuando el observador se encuentra en movimiento con respecto a la escena.

4.2.2.1. Paralaje de movimiento

Cuando el observador avanza por el espacio en una dirección, los objetos próximos a él pasan más rápido por su campo visual que aquellos más distantes, lo que proporciona un indicio de profundidad (Helmholtz, 1866).

Un claro ejemplo de este efecto lo habremos experimentado, con toda seguridad, cuando viajamos, en coche o tren y miramos por la ventana; los objetos próximos a la carretera parecen pasar a toda velocidad, mientras que los distantes tardan mucho más tiempo en quedar atrás.

Los puntos lejanos avanzan menos en la retina que los puntos próximos, porque el ángulo que forman las visuales correspondientes es menor (Fig. 4.14).

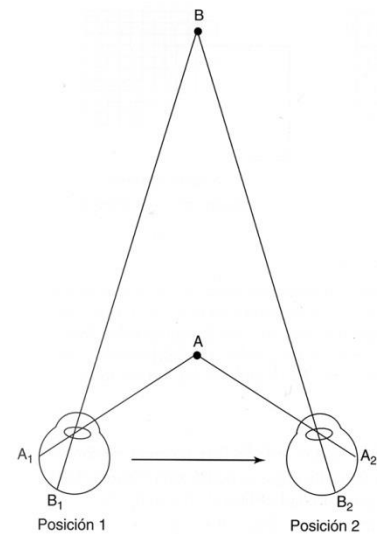


Fig. 4.14. Paralaje de movimiento. Los objetos próximos se desplazan en la retina con mayor velocidad que los lejanos porque el ángulo que forman con la retina entre la posición 1 y la 2 es mayor.

4.2.2.2. Eliminación y acrecentamiento

Cuando dos objetos se superponen en nuestro campo visual y el observador se desplaza lateralmente con respecto a ellos, se produce la situación de eliminación cuando el más cercano oculta, en mayor grado, el objeto que tiene tras de sí. En caso contrario se produce la situación de acrecentamiento (Fig. 4.15).

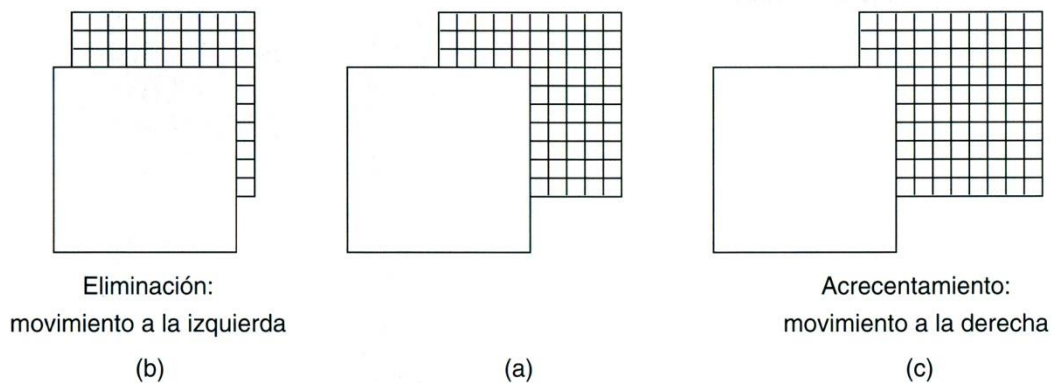


Fig. 4.15. Relación inicial entre los objetos (a), el movimiento del espectador hacia la izquierda provoca la situación de eliminación (b), mientras que un movimiento a la derecha ocasiona el acrecentamiento (c)

Esta clave ayuda a evaluar mejor las distancias entre el objeto anterior y el posterior, así como a detectar mejor los bordes de los objetos (Kaplan, 1969). De hecho, en muchas ocasiones, realizamos un movimiento intuitivo de la cabeza, a modo de balanceo lateral, para evaluar mejor los contornos.

4.3. Claves binoculares

Las claves binoculares son aquellas que se obtienen por la acción conjunta de ambos ojos. Aquí podría incluirse también la clave de convergencia ocular que situamos dentro de las claves oculomotrices, puesto que en ella interviene la acción conjunta de ambos ojos, pero, sin duda, la clave estrella de la percepción del relieve, sobre la que se fundamentan todas las bases de la estereoscopia es la disparidad retinal.

4.3.1. Disparidad retinal

Tal como manifiesta Layer (1979), *“La naturaleza no nos concedió un segundo ojo sólo por seguridad”*, cada ojo, por la diferencia de posición, percibe imágenes ligeramente diferentes, lo que causa la disparidad retinal o binocular.



Fig. 4.16. La separación entre los ojos es la causante de la disparidad retinal o binocular. Pedro Cabezos

La estereopsis, cuya etimología viene del griego *stereo*, que significa sólido, y *opsis*, visión o vista, es el proceso mental que convierte la disparidad retinal en sensación de profundidad. Tal como vimos en el capítulo anterior, la respuesta de los detectores de disparidad, situados en el córtex visual, podría ofrecer una explicación fisiológica de la estereopsis.

La sensación de relieve producida por la disparidad retinal es mucho más vivaz que la producida por cualquier otra clave, a ello se refería Leonardo Da Vinci, cuando decía que ninguna pintura, por perfecta que ésta sea, puede evocar la sensación de profundidad producida por aquello que se ve reflejado en un espejo. Esta afirmación, ya citada en la introducción histórica, sitúa a Leonardo como el primero en reparar en que la disparidad binocular ofrece una sensación de relieve que las claves pictóricas no pueden proporcionar.

Es curioso que nadie antes que Leonardo hubiera reparado en ello, ya que, si bien Euclides ya había descrito que cada ojo percibía dos imágenes distintas, no se había llegado a relacionar nunca este hecho con la percepción del relieve; resulta todavía más extraño que tuviéramos que esperar a Wheatstone (1938), para aclarar esta circunstancia. Posiblemente el peso que tiene el efecto combinado del resto de claves monoculares sobre la percepción de la profundidad propició que este efecto pasara tanto tiempo inadvertido.

Nuestro cerebro fusiona las dos imágenes ofreciéndonos la sensación de relieve, pero aunque no solamos ser conscientes de ello, no todo lo que entra en nuestro campo visual se llega a fusionar, ello dependerá de que la disparidad retinal entre puntos esté dentro de los límites de fusión impuestos por las áreas de Panum, vistas en el capítulo anterior.

Cuando nuestros ojos convergen en un punto, éste pertenece al horóptero y por tanto se proyecta sobre puntos homólogos de las retinas, en consecuencia se apreciará fusionado. Por delante y por detrás del punto de convergencia se encuentran los espacios de Panum, que comprenden los puntos del espacio que producen una disparidad retinal dentro de los límites de fusión. Si un objeto se sitúa fuera de estos límites se verá doble.

Podemos realizar un sencillo experimento que nos hará apreciar que no siempre lo que vemos aparece fusionado; si miramos nuestro pulgar, mientras sostenemos un lápiz por detrás de este, tal como muestra la Fig. 4.17 (izda.), veremos que, manteniendo fija la mirada y el enfoque de nuestros ojos sobre el pulgar, el lápiz se verá doble por encontrarse fuera de los límites de fusión, tal como se pretende simular en la Fig. 4.17 (dcha.)

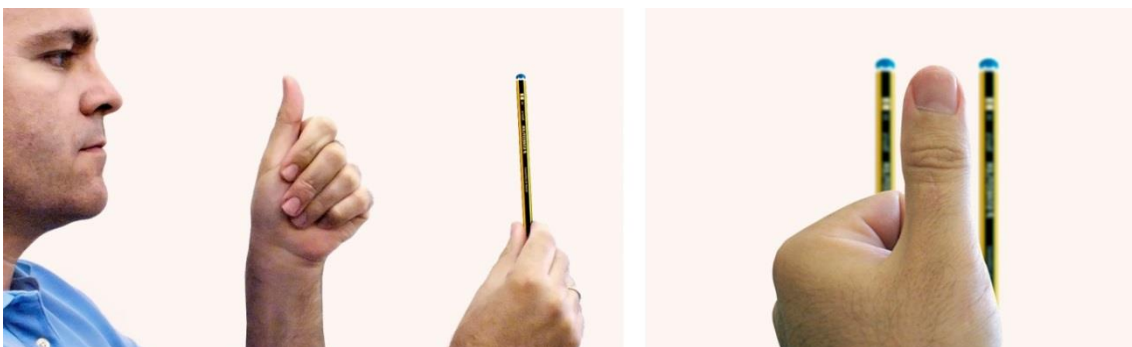


Fig. 4.17. Experimento para observar el efecto de diplopia o visión doble (izda.). Al mirar el pulgar, el lápiz queda fuera del espacio de Panum y no se fusiona (dcha.). Pedro Cabezos

En realidad, esta circunstancia se produce constantemente, pero como nuestra atención se centra en las zonas de convergencia ocular y el efecto de la profundidad de campo desenfoca las zonas separadas del punto de enfoque, es un hecho que suele pasar desapercibido.

El efecto de diplopia o visión doble es más evidente al converger la mirada sobre objetos próximos, donde los espacios de Panum son más reducidos, pero a medida que convergemos hacia objetos más lejanos, los espacios de Panum aumentan y por tanto la diplopia tiende a desaparecer.

Hubo un debate científico entre si la disparidad por si misma podía ser causante del efecto de relieve o si era necesaria una combinación con el resto de claves pictóricas, hasta que los experimentos llevados a cabo por Julesz (1971), con estereogramas de puntos aleatorios, dieron respuesta a esta cuestión, dejando claro que la disparidad en sí misma constituye una clave capaz de producir la sensación de relieve.

Los estereogramas de puntos aleatorios, ideados por Bela Julesz, están constituidos por una serie de puntos distribuidos aleatoriamente, de modo que un conjunto de puntos repiten la misma posición, tanto en la imagen derecha, como en la izquierda y, por tanto, no existe disparidad entre ellos, mientras que, otro conjunto de puntos, sufren una ligera traslación horizontal entre la imagen derecha y la izquierda, que produce una disparidad.

Esta disparidad producirá que el contorno de este conjunto de puntos sea interpretado a distinta profundidad con respecto al grupo de puntos sin disparidad.

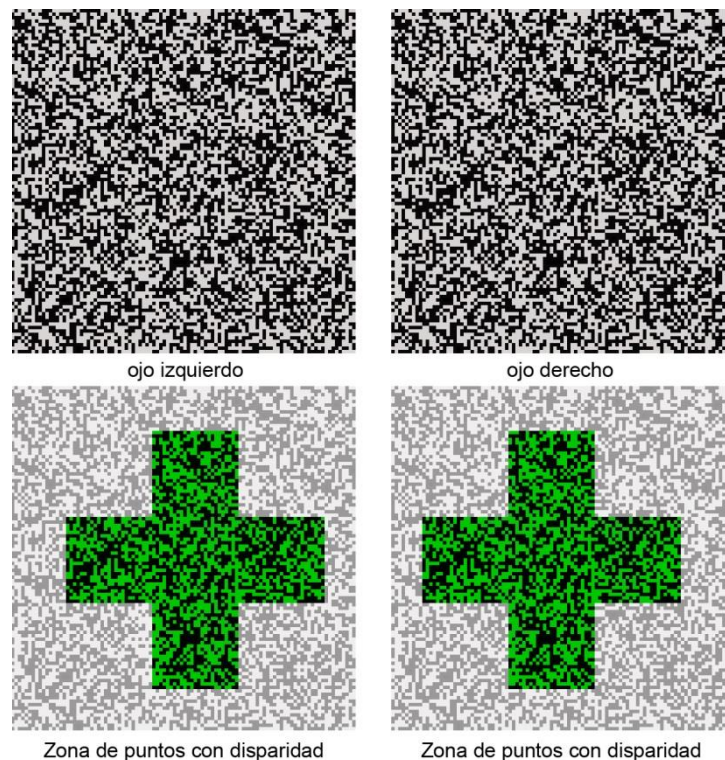


Fig. 4.18. Estereograma de puntos aleatorios, se muestra en verde el conjunto de puntos que tiene disparidad. Pedro Cabezos

En la Fig. 4.18 se muestra el estereograma de puntos aleatorios, en la parte inferior se han marcado en verde los puntos que tienen disparidad, por lo que el contorno que

encierra estos puntos forma la imagen de una cruz, que está ligeramente desplazada a la derecha, en la imagen del ojo izquierdo y viceversa.

Como este tipo de imágenes no muestran ninguna otra clave de profundidad, se demuestra claramente que la disparidad en si misma basta para producir la sensación de relieve y también que el reconocimiento de la forma que delimitan los puntos con disparidad es posterior a los mecanismos que ocasionan la sensación de relieve.

Lo ideal sería disponer el estereograma de puntos aleatorios sobre un estereoscopio y ver el resultado, pero, a falta de ello, se ha preparado el anaglifo, mostrado en la Fig. 4.19, que, si es visto sin las gafas, delata de antemano el contorno de la cruz, pero, haciendo uso de ellas, nos permitirá ver el efecto de relieve producido por el estereograma. Nos debe aparecer la silueta de la cruz flotando en primer término con respecto a los puntos que no tienen paralaje, que deberán percibirse en el plano del papel.

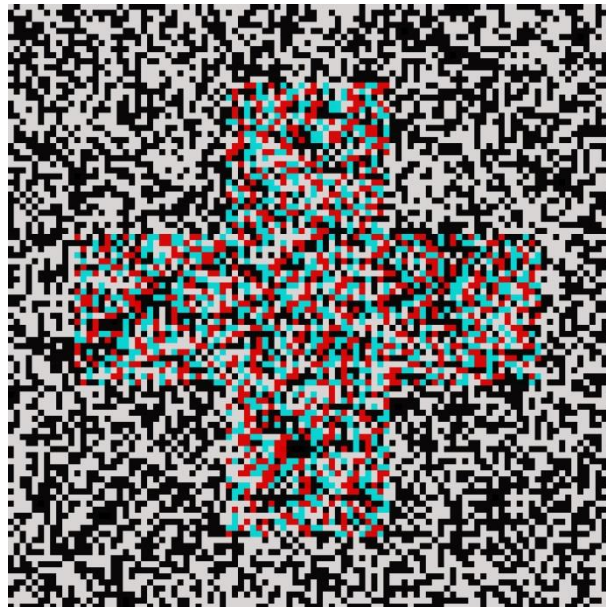


Fig. 4.19. Estereograma de puntos aleatorios con la figura de una cruz sobresaliendo del papel. Pedro Cabezos



Aunque la sensación de relieve resultará clara en la mayoría de casos, la ausencia de otras claves de profundidad puede ralentizar la percepción, en cuyo caso será necesario algo de tiempo para que la mente interprete correctamente las disparidades.

La Fig. 4.20 muestra una variante del mismo estereograma, pero en este caso la cruz se mostrará hundida tras los puntos de disparidad nula. Este ejemplo servirá para mostrar que hay dos tipos de disparidad binocular: la cruzada y la no cruzada.

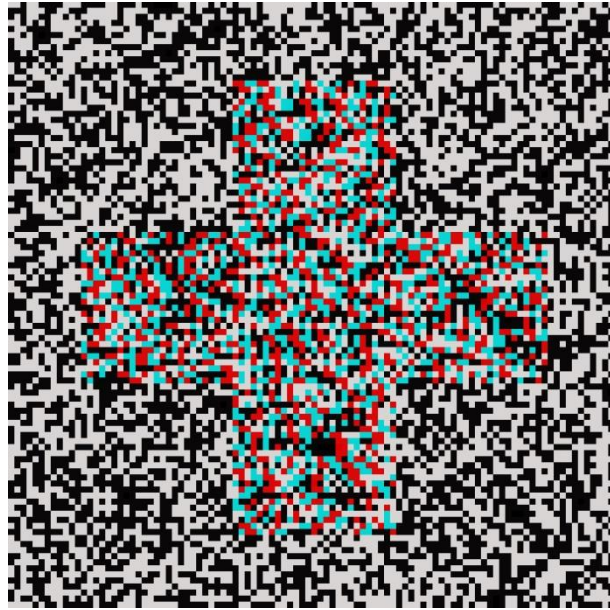


Fig. 4.20. Mismo estereograma de una cruz, pero con el efecto de profundidad invertido. Pedro Cabezos



Si tomamos el horóptero como referencia, la disparidad cruzada se produce cuando el objeto se encuentra situado por delante de éste, porque los rayos visuales que producen sus proyecciones retinianas se cruzan antes de llegar al horóptero. Por el contrario los objetos que se encuentran detrás del horóptero producen disparidad no cruzada (Fig. 4.21).

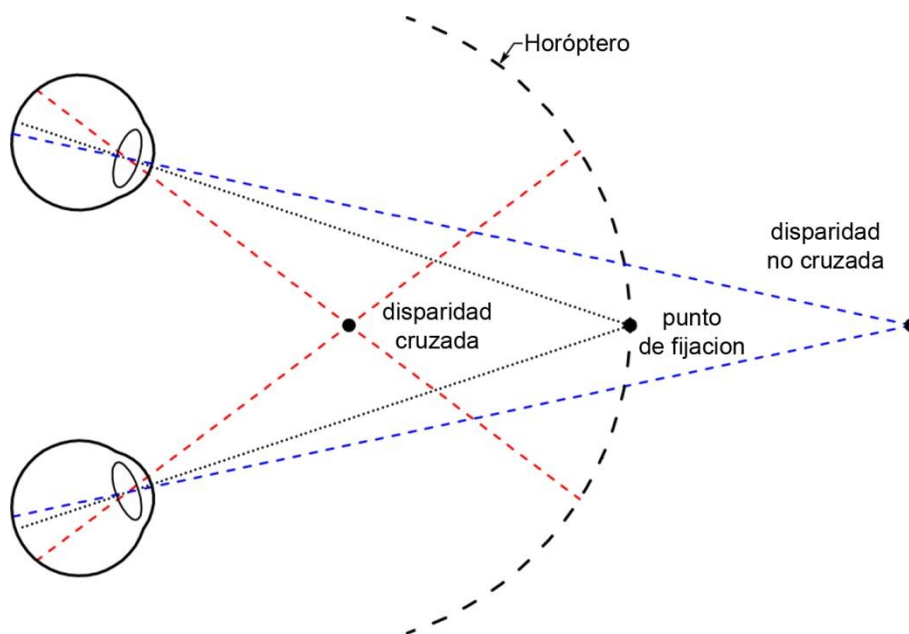


Fig. 4.21. El punto de fijación define el horóptero. Todos los puntos que están antes de llegar al horóptero producen disparidad cruzada, mientras los situados más allá de éste causan disparidad no cruzada. Pedro Cabezos

La sensación del efecto de relieve producido por la disparidad, mengua a medida que ésta decrece. La separación entre los ojos causa que las imágenes de objetos próximos al espectador tengan un alto grado de disparidad y por ello se aprecien con mucho relieve. Por otro lado, si se fija la mirada a una distancia suficientemente lejana como para considerar que los ejes visuales resultan prácticamente paralelos, las imágenes retinianas de los objetos lejanos apenas serán dispares y, en consecuencia, la sensación de relieve que tengamos de ellos será imperceptible.

Cabe destacar que la combinación de claves de profundidad enriquecerá nuestra percepción del relieve, pero, en ocasiones, aquello que percibimos no siempre es un fiel reflejo del mundo exterior, sino que hay situaciones donde las claves resultan ambiguas y pueden conducir a equívocos en la manera en que nuestro cerebro interpreta los datos, como en el caso de las ilusiones ópticas, íntimamente relacionadas con la estereoscopia, de las que nos ocuparemos en el siguiente capítulo.

5. LAS ILUSIONES ÓPTICAS

Tendemos a creer que aquello que vemos es irrefutable y se corresponde fielmente con la realidad, pero lo cierto es que se trata de una interpretación que hacemos de ella. Pongamos el ejemplo de los colores, ¿acaso podríamos afirmar que la realidad tiene los colores que percibimos?, ¿que respondería una persona daltónica que no fuera consciente de su enfermedad?

Esto nos hace reflexionar en que lo que vemos responde a una idea de realidad que creamos según las características de nuestro sistema visual, que responde ante ciertas características físicas de nuestro entorno. No obstante, nuestra percepción se corresponde suficientemente con la realidad como para poder interactuar perfectamente con lo que nos rodea.

Nuestra idea de realidad, desde un punto de vista perceptivo, tiene un carácter universal que, al margen de esta reflexión filosófica, solemos equipar con la realidad verdadera. Por este motivo, cualquier fenómeno que rompa esta relación será el causante de una ilusión.

El diccionario de la Real Academia Española define el término ilusión como:

“Concepto, imagen o representación sin verdadera realidad, sugeridos por la imaginación o causados por engaño de los sentidos”

Conseguir engañar a los sentidos no suele ser algo fácil y resulta poco habitual, este es el motivo por el que las ilusiones ópticas nos resultan tan fascinantes y sorprendentes. La curiosidad que despiertan ha llevado a muchos científicos a investigar sus causas y gracias a ello se ha podido avanzar en muchos aspectos de los mecanismos perceptivos de la visión.

Sin ir más lejos, los descubrimientos de Charles Wheatstone fueron motivados por su desconcierto ante una ilusión óptica producida por el reflejo de la llama de una vela sobre un plato de metal torneado que producía un efecto estereoscópico y comenta al respecto:

“...es curioso que un efecto como este, que debe haber sido contemplado cientos de veces, nunca haya llamado suficientemente la atención, como para ser el tema de una observación científica. Este fue uno de los primeros hechos que condujeron mi atención hacia el tema que ahora trato...”
(Wheatstone, 1938:379).

Cuando se estudia un fenómeno, siempre es conveniente realizar una clasificación en función de las variables que lo producen, pero en el caso de las ilusiones ópticas esto es algo que no resulta sencillo.

Uno de los psicólogos que más ha estudiado el campo de las ilusiones ópticas fue el recientemente fallecido Profesor Richard L. Gregory, de la universidad de Bristol, quien planteó una posible clasificación en base a dos parámetros: las causas y las apariencias (Gregory, 1997).

Gregory indica dos causas principales que inducen el engaño: las físicas y las cognitivas. Las causas físicas están relacionadas con la alteración de las señales visuales, antes de llegar a las zonas de procesamiento del cerebro, bien por una perturbación óptica entre el objeto y la retina, como, por ejemplo, la ilusión óptica producida por un espejismo, o bien, por las perturbaciones en la codificación sensorial de las señales en su camino hacia las zonas de procesamiento visual. Por ello divide a su vez las causas físicas en perturbación óptica (antes de llegar a la retina) y perturbación en la señal (defectos en la codificación de los estímulos).

Las causas cognitivas están ligadas a la interpretación de las señales que realizan los procesos perceptivos. Gregory distingue entre aquellas relacionadas con las reglas de interpretación de aspectos abstractos, como podrían ser las leyes de percepción gestálticas y la teoría de las claves, vista en el capítulo anterior, de aquellas causas inducidas por la experiencia, en el caso de objetos cotidianos.

Aparte de la causa, Gregory contempla cuatro posibles tipos de apariencia: ambigüedad, distorsión, paradoja y ficción. Las apariencias, en combinación con las causas, definen toda la casuística de las ilusiones ópticas, con un total de 16 posibilidades como muestra la tabla siguiente.

Causa \ Apariencia	Física		Cognitiva	
	Óptica	Señal	Reglas	Objetos
Ambigüedad	1	5	9	13
Distorsión	2	6	10	14
Paradoja	3	7	11	15
Ficción	4	8	12	16

Fig. 5.1. Clasificación de las ilusiones ópticas en relación a su causa y apariencia

Gregory ofrece un ejemplo con cada una de las categorías y admite que esta clasificación puede ser controvertida a la hora de catalogar algunos tipos de ilusiones y puede que tenga que ser revisada y ampliada posteriormente.

Esta clasificación tiene mucho interés desde mi punto de vista, sin embargo, los ejemplos propuestos por Gregory creo que no son siempre demasiado clarificadores, por lo que he realizado una selección propia, añadiendo otros ejemplos que considero más interesantes y claros, ordenados según los parámetros definidos por Gregory.

5.1. Ilusiones debidas a causas físicas

Hemos comentado que Gregory distingue dos grupos de causas físicas, por un lado, las debidas a perturbaciones ópticas que se producen antes de que el estímulo llegue a la retina y, por otro lado, las debidas a anomalías en el proceso de codificación del estímulo, por parte de las células ganglionares de la retina a partir de los impulsos generados en sus campos receptivos, tal como se vio en el capítulo del sistema visual.

5.1.1. Causa física relacionada con fenómenos ópticos

5.1.1.1. Apariencia ambigua (Tipo 1)

Gregory propone la niebla como un ejemplo de este caso, puesto que las gotas de agua en suspensión que componen la niebla alteran los rayos luminosos y no permiten una visión clara de los objetos.



Fig. 5.2. La niebla como ejemplo de ambigüedad causada por fenómenos físicos ópticos. Imagen promocional de la película *La niebla*, 2007

5.1.1.2. Apariencia distorsionada (Tipo 2)

Los espejismos pueden ser un ejemplo de este tipo de ilusiones, su causa física se explica por el cambio de trayectoria que experimentan los rayos de luz al atravesar las capas de aire con distinta densidad, por efecto del calor, lo que ocasiona una visión distorsionada en forma de ondulaciones de los objetos lejanos. Sin embargo, este ejemplo que propone Gregory suele provocar conjuntamente apariencias ficticias como

los reflejos sobre superficies de agua lo que daría pie a incluir también esta ilusión dentro del tipo 4.



Fig. 5.3. Distorsión en forma de ondulación producida por la desviación de los rayos luminosos al atravesar capas de aire de distinta densidad. Conjuntamente este fenómeno produce la ilusión de agua sobre la carretera. Fotografía de Joe Orman

Resultaría más indicado poner el ejemplo de la distorsión producida por un efecto físico como la refracción. El efecto de lápiz partido al ser introducido en el agua me parece idóneo para ilustrar una ilusión de este tipo.



Fig. 5.4. Distorsión del lápiz producida por la refracción. Fotografía de Alberto Vegas

5.1.1.3. Apariencia paradójica (tipo 3)

Nuestro reflejo en un espejo es fruto de un fenómeno físico: la reflexión de los rayos luminosos sobre una superficie muy pulida que da pie a la denominada reflexión especular. Ello provoca una situación paradójica: es imposible que en la realidad pudiéramos estar mirándonos cara a cara con nosotros mismos.



Fig. 5.5. La paradoja del espejo. Fotografía de Alexa Sykes

5.1.1.4. Apariencia ficticia (Tipo 4)

Gregory propone que el arcoíris, producido por la dispersión de la luz por las gotas de agua de la atmosfera, es una ilusión óptica de este tipo.

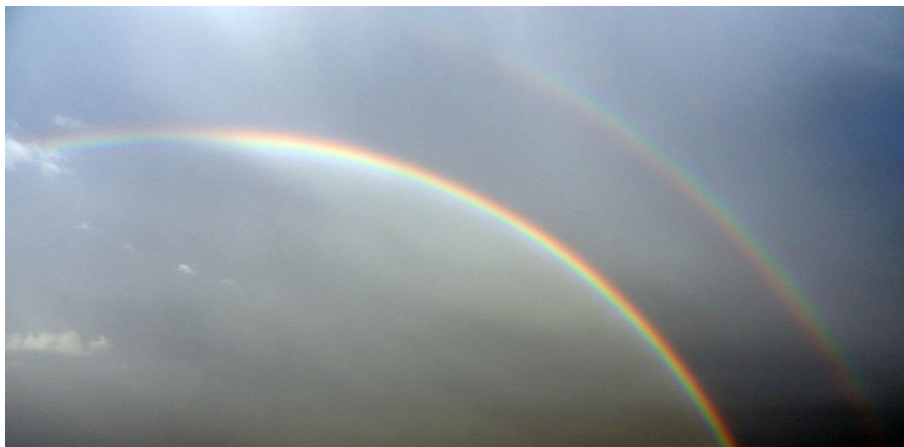


Fig. 5.6. El arcoíris como ejemplo de apariencia ficticia. Fotografía de Leonardo Weiss

5.1.2. Causa física relacionada con la codificación de las señales

5.1.2.1. Apariencia ambigua (Tipo 5)

El efecto de visión doble o diplopía, causado por los objetos que quedan fuera de los espacios de Panum, ya comentados anteriormente, puede considerarse una ilusión óptica de este tipo, debido a que la codificación de los estímulos queda fuera de los límites de fusión, como en el experimento realizado en el capítulo anterior.

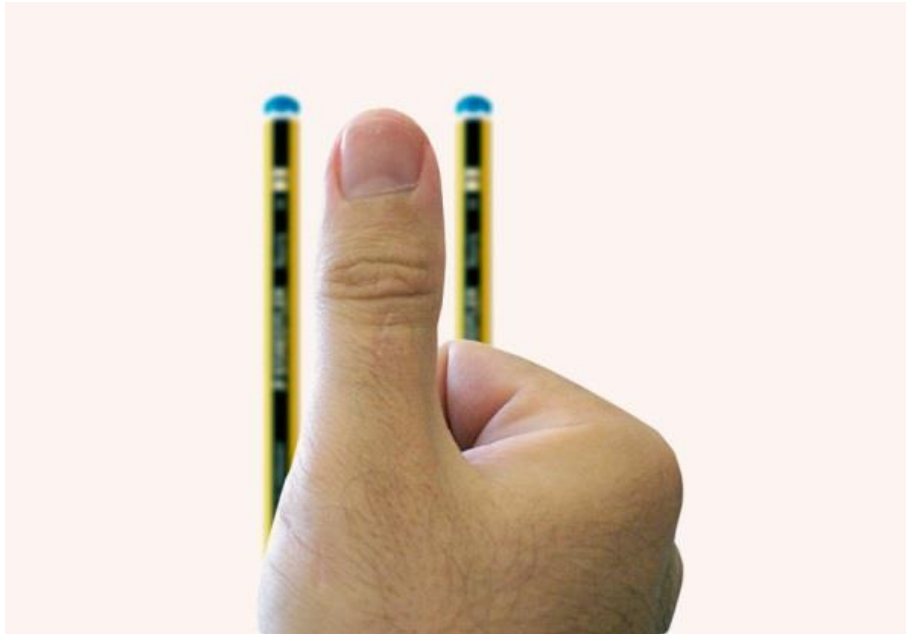


Fig. 5.7. Visión doble del lápiz situado fuera del espacio de Panum. Pedro Cabezos

5.1.2.2. Apariencia distorsionada (Tipo 6)

Gregory pone el ejemplo del *Café-wall*, ilusión que recibe su nombre por la decoración cerámica de la fachada de un café de Bristol, descubierta por uno de los miembros de su laboratorio, aunque esta ilusión es una variante de la denominada *shifted-chessboard* descrita ya por Münsterberg (1897) y la *Kindergarden illusion* estudiada por Pierce (1898).

La distorsión del paralelismo que se observa al contemplar la Fig. 5.8 está condicionada por la luminancia de la junta de mortero horizontal, de modo que el efecto desaparece cuando la luminancia del mortero es mayor o igual que la de la pieza cerámica clara, o bien, cuando es menor o igual que la de la pieza cerámica oscura (Fig. 5.9). Por esta razón Gregory considera que esta ilusión se debe a motivos relacionados con la codificación de la señal y no a causas cognitivas (Gregory, 1979).

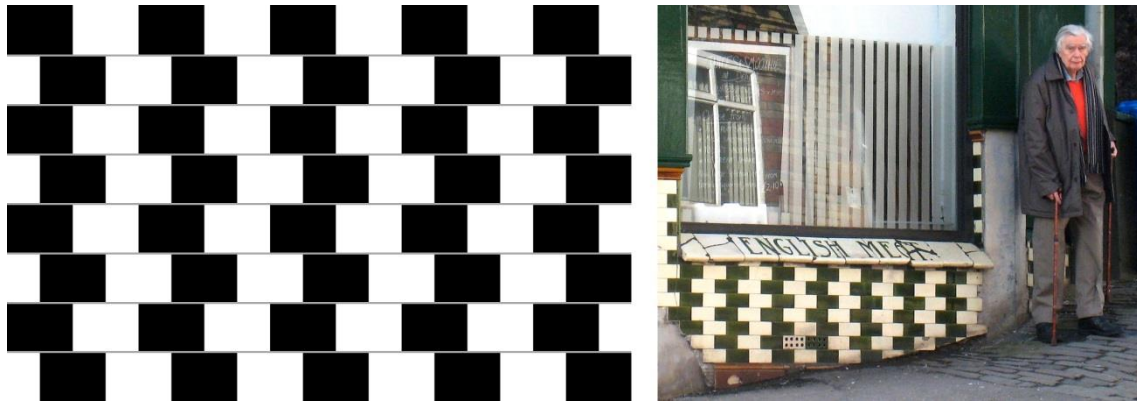


Fig. 5.8. *Café Wall illusion*. Las juntas de mortero parecen ser convergentes cuando en realidad son paralelas. Richard Gregory junto al café de Bristol que da nombre a esta ilusión. Fotografía de Steven Battle, 2010

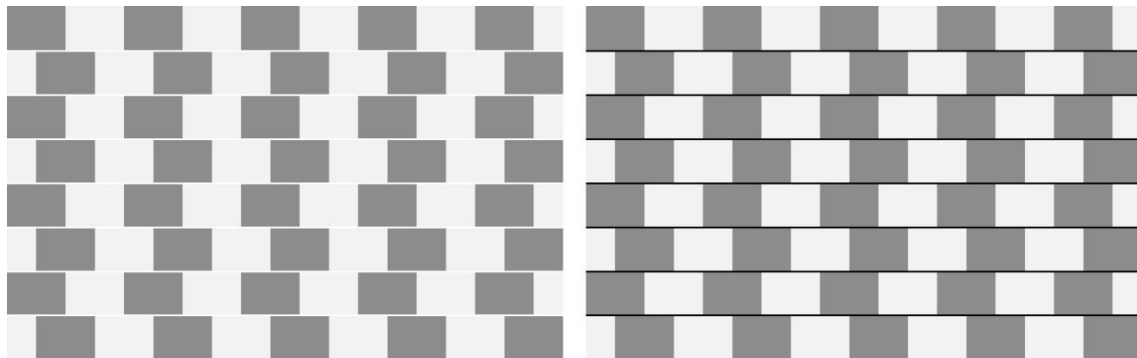


Fig. 5.9. El efecto *Café-Wall* se pierde cuando la luminancia de la junta horizontal es mayor que la pieza cerámica de color claro (izda.) o cuando es menor que la pieza cerámica más oscura (dcha.). Pedro Cabezos, adaptado de Gregory (1979)

Veamos otros ejemplos de distorsión, pero en este caso se trata de una distorsión luminosa, es decir, una desviación en la apreciación de la luminancia debida a la influencia del entorno, que afecta considerablemente la codificación del estímulo.

Ya vimos que los campos receptivos de la retina obedecen a un esquema centro-excitatorio, periferia-inhibitoria, lo que, junto con otros procesos como la inhibición lateral, por la que la codificación de un campo receptivo puede ser alterado por los vecinos, pueden explicar los efectos que se muestran a continuación.

En la Fig. 5.10 la banda central es de un tono uniforme, pero se aprecia como un degradado por la influencia de la luminancia de las zonas perimetrales. Si se tapa con un papel las zonas adyacentes a la banda central podrá comprobarse la uniformidad del tono.

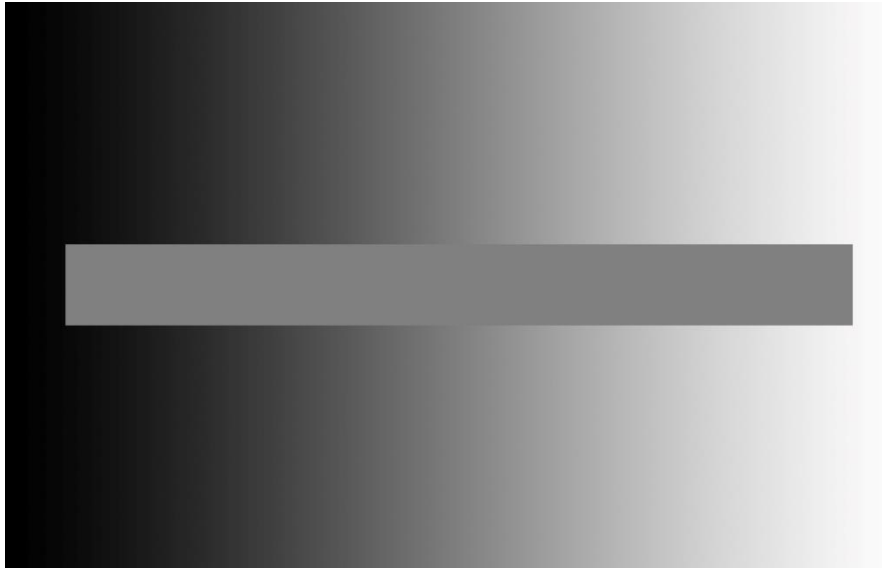


Fig. 5.10. Pese a lo que pueda parecer, la banda central es de un color uniforme. Pedro Cabezos, adaptado de Menkhoff (2010)

Otro ejemplo relacionado con el anterior es la sorprendente imagen creada por Edward H. Adelson (Fig. 5.11) donde los cuadros A y B son en realidad del mismo color

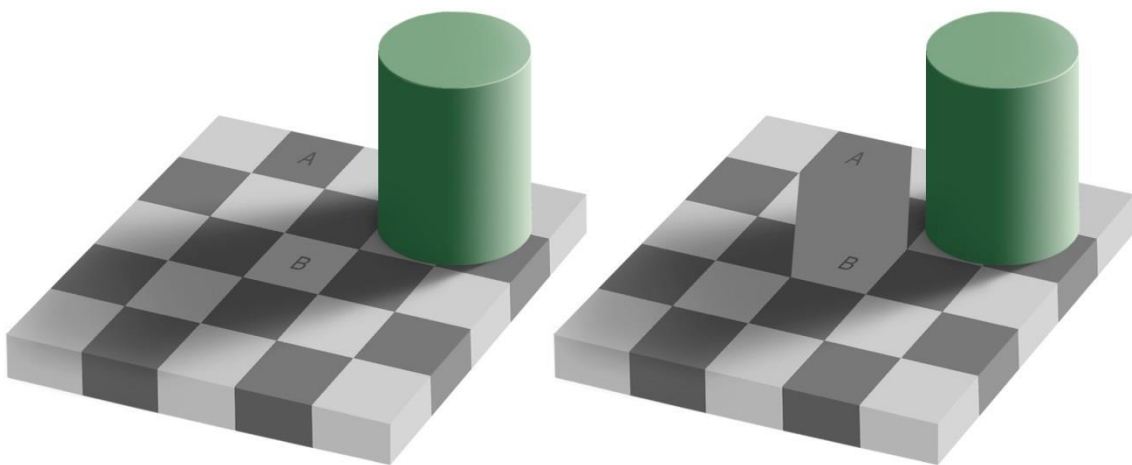


Fig. 5.11. Los colores de los cuadros del damero A y B son iguales. La influencia de los colores del entorno condiciona drásticamente la percepción. Ilusión creada por Edward H. Adelson

5.1.2.3. Apariencia paradójica (Tipo 7)

La sobrecarga de estímulos, puede desestabilizar el funcionamiento del sistema visual y crear ilusiones paradójicas, como la apreciación de movimiento a partir de estímulos estáticos.

Los siguientes ejemplos muestran este comportamiento que según Menkhoff (2010), se producen por una sobreexcitación de las células nerviosas, producida en parte por el efecto de las microsacadas, que ya habíamos definido como rápidos y constantes

movimientos oculares, a modo de vibración, producidos de manera refleja con el fin de refrescar la información de los fotorreceptores de la retina.

En la Fig. 5.12, se muestra un gráfico realizado por el profesor de psicología japonés Akiyoshi Kitaoka. En las zonas de visión extrafoveal (perimetral), con menos receptores que la zona central de la retina, se produce un efecto conocido como *Peripheral Drift Illusion*, que provoca un efecto de movimiento circular debido a la alternancia de la luminancia en los colores que definen el patrón circular, lo que condiciona también el sentido de giro (Kitaoka, 2003). Sin embargo en las zonas de visión foveal (central), no se aprecia ningún movimiento.

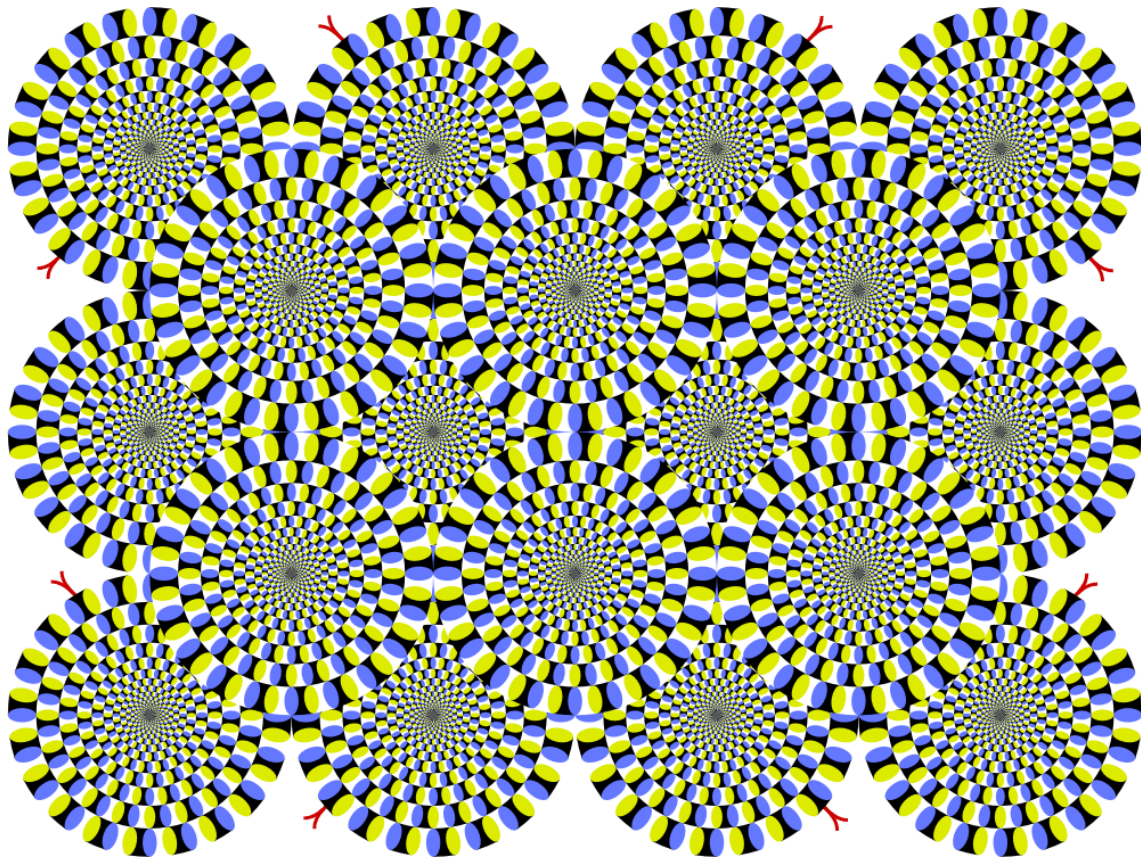


Fig. 5.12. Akiyoshi Kitaoka, 2004, *Rotsnake*,. Es una de las ilusiones visuales de mayor impacto en la red

Otro maravilloso ejemplo con efecto de movimiento puede verse en la Fig. 5.13, realizada por el profesor italiano Baingio Pinna. En esta ocasión el efecto de movimiento circular aparece cuando se aleja y se acerca repetidamente la imagen de los ojos, que deben mirar hacia el punto negro situado en el centro de la imagen. El efecto de movimiento es debido a una sobrecitación de las células nerviosas responsables de calcular la trayectoria de los objetos. A este efecto contribuye en gran medida la orientación espacial de las piezas definida por la diferencia de luminosidad de sus aristas de contorno, lo que condiciona también el sentido del movimiento de rotación apreciado (Pinna, 2000).

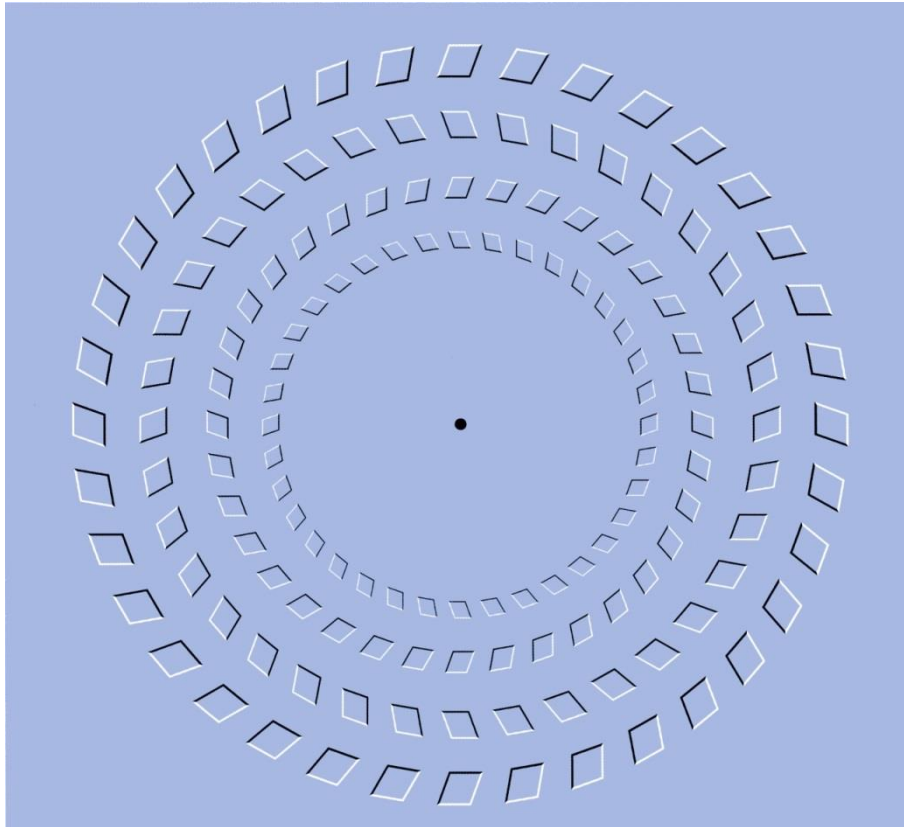


Fig. 5.13. Baingio Pinna, 2000. La ilusión de giro se produce al alejar y acercar la figura a los ojos repetidamente, mientras se mira fijamente hacia el punto central.

Llegados a este punto, la controversia a la que seguramente se refería Gregory es saber discernir la delgada línea que separa las causas debidas exclusivamente a los procesos de codificación de las señales, de los procesos cognitivos que comienzan en el NGL y el córtex. Tampoco sería ilógico pensar que pudiera deberse a causas en la que intervienen ambos factores simultáneamente, de ahí la enorme complejidad que entraña esta tarea de clasificación.

5.1.2.4. Apariencia ficticia (Tipo 8)

Aquí Gregory se basa en el fenómeno de la imagen residual o postimagen que se aprecia tras mirar fijamente una imagen contrastada durante un periodo de tiempo de aproximadamente un minuto, tras el cual se mira hacia un fondo blanco o simplemente se cierran los ojos. La postimagen permanece durante unos instantes y se corresponde con el negativo de la imagen que había sido contemplada previamente, cosa que podemos experimentar realizando el proceso con la Fig. 5.14



Fig. 5.14. Mirar la imagen fijamente durante 1 minuto, cerrar los ojos y aparecerá paulatinamente la postimagen en positivo de Marilyn. Pedro cabezos, adaptada del mítico retrato de Marilyn Monroe realizado por Gene Korman en 1953

Según Schiller y Malpeli (1977), este efecto es debido a que las neuronas pertenecientes a la zona inhibitoria (periferia) del campo receptivo, tendrán un breve aumento de descargas cuando cesa el estímulo, mientras que, por el contrario, las neuronas que pertenecen a la zona excitatoria (centro) del campo mostrarán un breve periodo de inhibición cuando finalice el estímulo.

Este mismo efecto se produce también con imágenes en color como la que se muestra a continuación, donde la imagen superior está formada por las componentes de color del modelo de color CIE Lab, separadas del canal de luminancia, que se muestra aislado en la parte inferior.

Si se observa la imagen superior durante un minuto, fijando la mirada en un punto fijo, como pudiera ser uno de los ojos, y se dirige la vista hacia la imagen inferior, mirando el mismo punto relativo, ésta parecerá estar coloreada del color complementario a la imagen superior, durante unos instantes.



Fig. 5.15. Si se mira fijamente la figura superior durante un minuto, al cambiar la mirada a la imagen inferior, ésta se verá por unos instantes teñida del color complementario de la imagen superior. Pedro Cabezos, basado en la Marilyn de Andy Warhol de 1962

5.2. Ilusiones debidas a causas cognitivas

Recordemos que entre las causas cognitivas, Gregory distingue entre las relacionadas con la interpretación de las señales en base a reglas abstractas, como las propuestas gestálticas o la interpretación de las claves vistas en el capítulo anterior, de las influenciadas por el conocimiento de objetos con los que el sujeto está muy familiarizado.

5.2.1. Causa cognitiva derivada de la interpretación de las reglas perceptivas

5.2.1.1. Apariencia ambigua (Tipo 9)

Resultan muy interesantes, desde mi punto de vista, las ilusiones causadas por el funcionamiento de los procesos cognitivos que interpretan las formas, relacionadas con las reglas o leyes perceptivas propuestas por los psicólogos de la Gestalt, como la ley de separación entre fondo-figura y por la ley de cierre de los contornos.



Fig. 5.16. Edgar Rubin, c.a.1915, *Copa de Rubin*. W. E. Hill, 1915, *Vieja o joven*

La Fig. 5.16 muestra dos clásicos de las ilusiones ópticas; la copa de Rubin (izda.), da pie a una doble interpretación, copa o caras, por el principio de fondo-figura, mientras que en el dibujo de la derecha se verá representada la imagen de una joven o una vieja, según se lleve a cabo en nuestro cerebro el proceso de cierre de contornos.

Otras ilusiones se basan en las ambigüedades en las que, bajo determinadas circunstancias, pueden incurrir los sistemas de representación de una sola vista, como las axonometrías. El famoso cubo de Necker, descrito por el cristalógrafo suizo Louis Albert Necker en 1832, es un claro ejemplo de ello; el hecho de no eliminar las líneas ocultas nos lleva a una doble interpretación del dibujo.

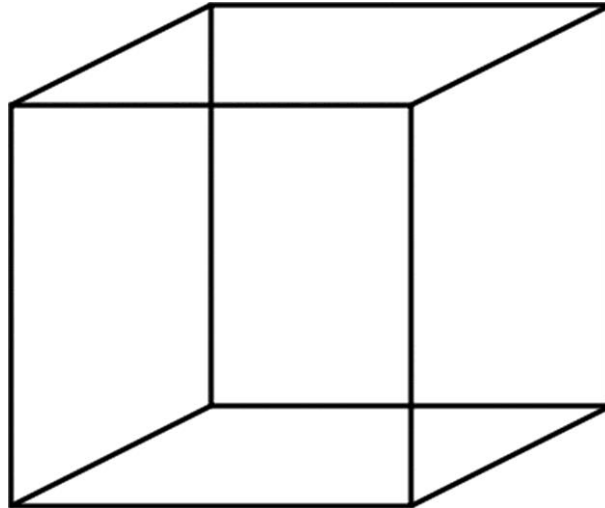


Fig. 5.17. Cubo de Necker, 1832

En la Fig. 5.18 se muestran ejemplos más actuales de este tipo de ilusiones. En la parte izquierda aparece parte del cartel cinematográfico de la película *Premonición*, en el que se percibe la cara de la protagonista (Sandra Bullock) dibujada por las ramas y los pájaros en el cielo, aunque este ejemplo podría interpretarse también como una pareidolia, de las que hablaremos al tratar el tipo 16.

Fig. 5.18 Cartel publicitario del film *Premonición*, 2007. Oleg Shuplyak, 2011, *Cuadro de Van Gogh*,

El cuadro de la parte derecha está realizado por Oleg Shuplyak, un artista contemporáneo especializado en crear retratos de personajes ilustres con el juego de la doble interpretación.

5.2.1.2. Apariencia distorsionada (Tipo 10)

Este ha sido siempre un tipo de ilusión muy recurrente, basado principalmente en la distorsión perceptual de los tamaños reales de las formas, debido a la interferencia producida por las características del entorno.

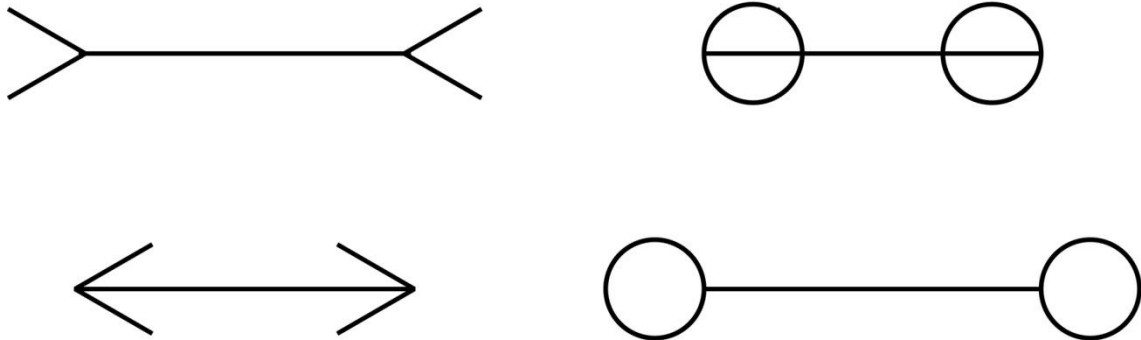


Fig. 5.19. Ilusión de Müller-Lyer (izda.) y variante de las pesas (dcha.). Todas las rectas horizontales tienen la misma longitud. Pedro Cabezos, basado en Goldstein (2009)

La famosa ilusión de Müller-Lyer (Fig. 5.19), ha dado pie a muchas especulaciones que explican su causa; el mismo Gregory señala que la constancia de tamaño nos ayuda a tener una percepción estable del tamaño de los objetos teniendo en cuenta su distancia. El escalamiento de la constancia de tamaño permite que una persona que mida 1,80 m aparente tener esa altura independientemente de dónde se encuentre.

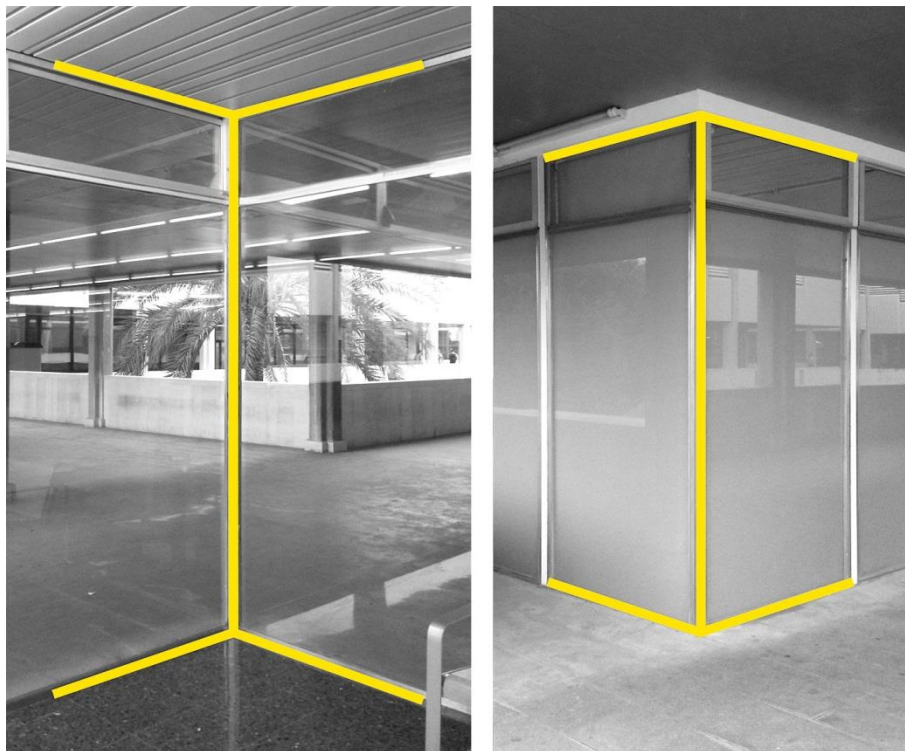


Fig. 5.20. Según Gregory la ilusión de Müller-Lyer evoca en nuestra mente el encuentro cóncavo y convexo entre dos planos. Pedro Cabezos, basado en Gregory (1973)

Gregory (1973) plantea que los mecanismos que nos ayudan a mantener la constancia de tamaño en el espacio tridimensional provocan ilusiones cuando se aplican erróneamente sobre representaciones bidimensionales y sugiere que las puntas de flecha de la ilusión de Müller-Lyer evocan en la mente dos situaciones habituales en el espacio tridimensional, el encuentro cóncavo entre dos planos y el convexo, provocando un fallo de apreciación debido al escalado de la constancia de tamaño.

Otros autores han rebatido esta teoría poniendo el ejemplo de la variante de las pesas (Fig. 5.19, dcha.), donde no hay puntas de flecha y, sin embargo, el efecto se mantiene. De Lucia y Hochberg (1991) realizan una variante de la ilusión para descartar la teoría de la constancia de tamaño (Fig. 5.21), mientras que Day (1989), expone la teoría de las claves conflictivas, según la cual, la apreciación de la longitud de la línea se ve condicionada por el tamaño total de la forma a la que pertenece.

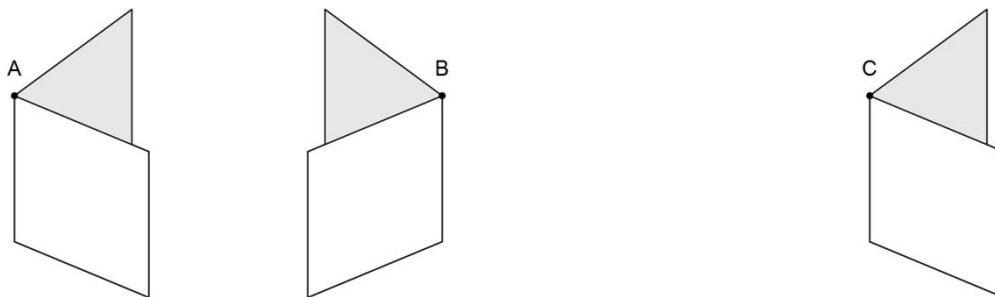


Fig. 5.21. La distancia entre A y B es la misma que hay entre B y C. Variante realizada por De Lucia y Hochberg (1991) de la ilusión de Müller-Lyer para descartar la teoría de Gregory

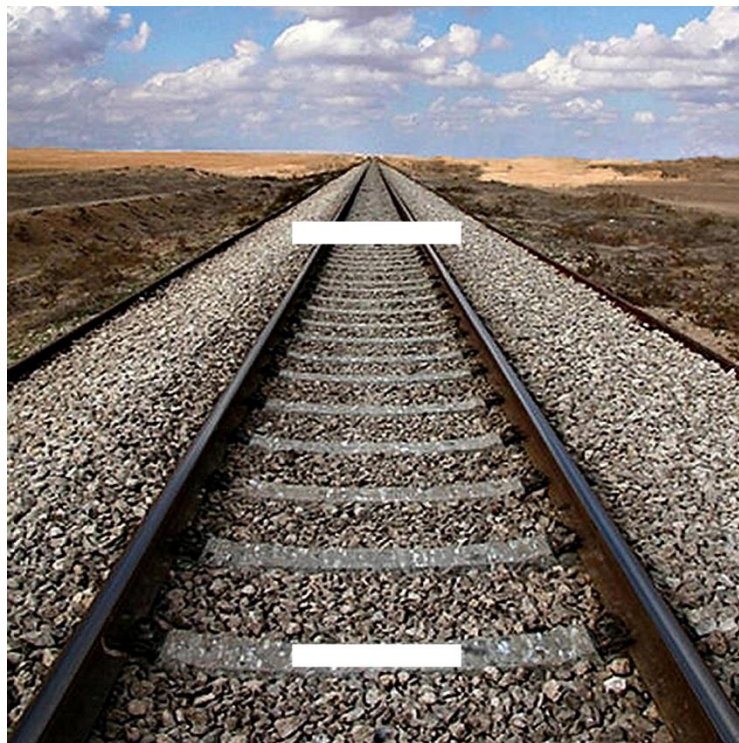


Fig. 5.22. Variante de la ilusión de Ponzo. Pedro Cabezos, inspirada en Ponzo (1910)

En otra famosa ilusión, conocida como la ilusión de Ponzo en honor a su creador, el psicólogo italiano Mario Ponzo, sí que resulta claro que la distorsión de tamaño que se aprecia entre las bandas blancas, que en realidad son iguales, se debe a un error de estimación producido por el escalado de la constancia de tamaño.

5.2.1.3. Apariencia paradójica (Tipo 11)

Ya hemos comentado cómo los sistemas de representación de una vista pueden resultar ambiguos, pero si a ello se añade una manipulación premeditada de las líneas vistas y ocultas podemos llegar a una paradoja que origina figuras imposibles como el famoso triángulo de Penrose, creado por el artista sueco Oscar Reutersvärd en 1934 y redescubierto por el físico Roger Penrose en 1950, quien lo hizo popular.

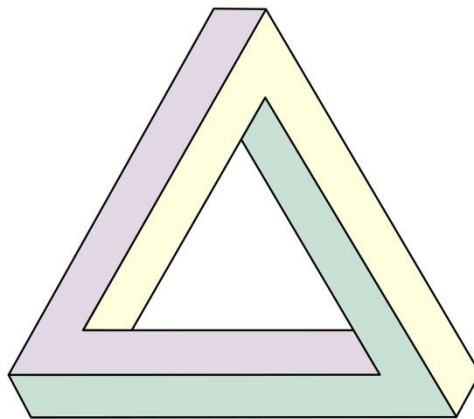


Fig. 5.23. Triángulo de Penrose ideado inicialmente por Oscar Reutersvärd en 1934

Otro artista, muy cercano, que se ha interesado en las figuras imposibles es el Catedrático de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia José María Yturralde. Su obra, caracterizada por el uso de la geometría pura, contiene una serie de cuadros dedicados a este tema, algunos de ellos con claras alusiones al triángulo de Penrose.

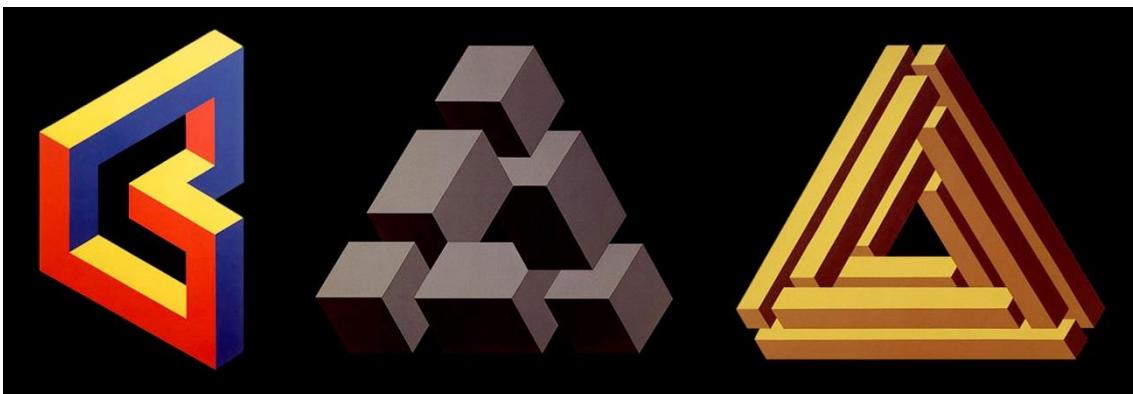


Fig. 5.24. Algunos ejemplos de figuras imposibles en la obra de José María Yturralde realizadas entre 1968 y 1973

Otro gran artista que ha demostrado su virtuosismo en este campo es el holandés M. C. Escher, que fue capaz de crear no sólo figuras, sino arquitecturas imposibles.

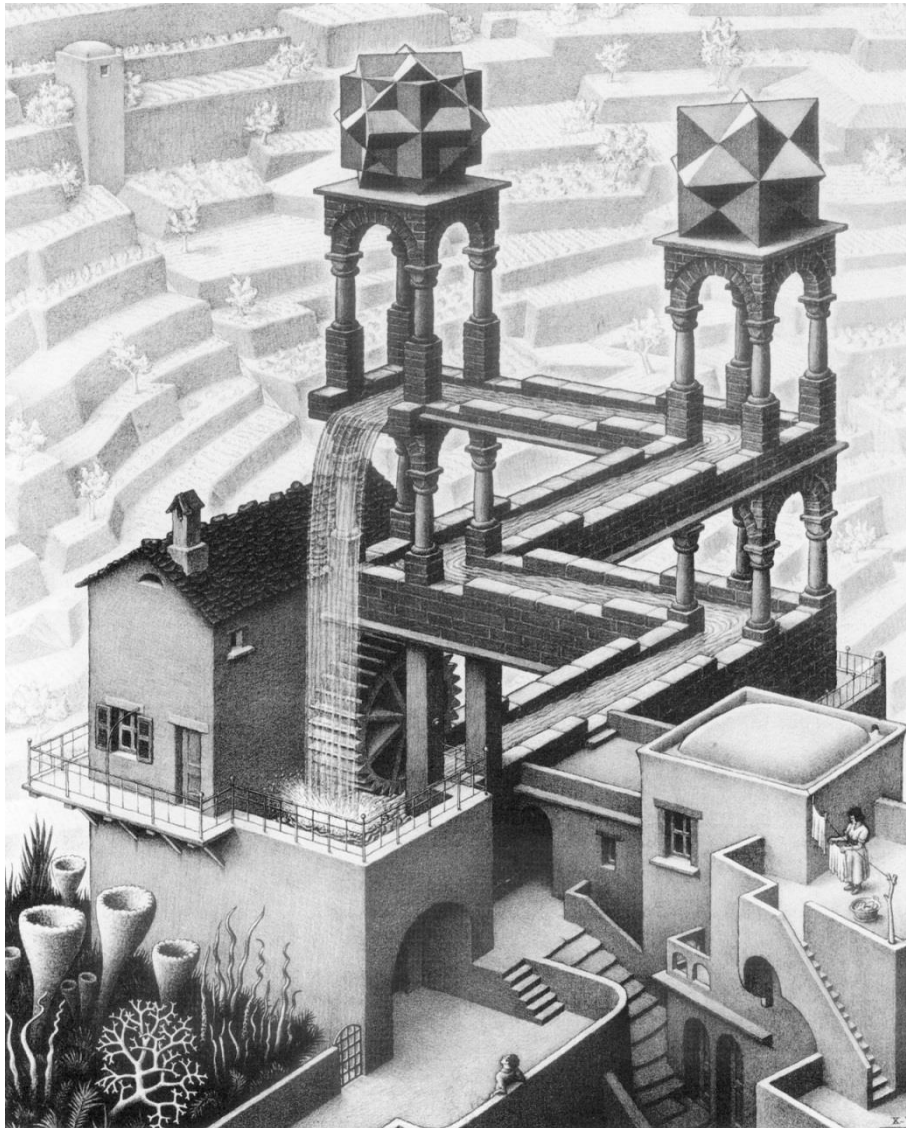
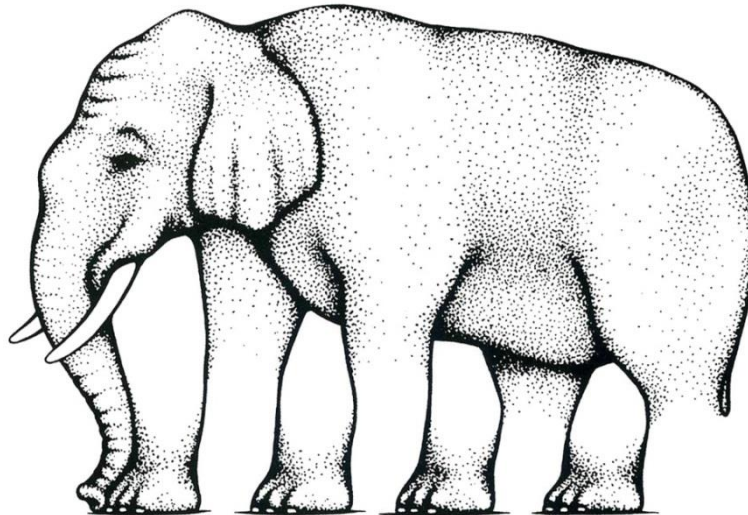


Fig. 5.25. Maurits Cornelis. Escher, 1961, *Cascada*, litografía

Aparte de las paradojas conseguidas gracias a la transgresión de líneas vistas y ocultas y a la búsqueda premeditada de proyecciones solapadas, el profesor Roger Shepard es capaz de crear paradojas con dibujos relativamente más sencillos, aunque no menos inteligentes, como en el caso del elefante que se muestra a continuación.

Fig. 5.26. Roger Shepard, 1990, *Elephant*

5.2.1.4. Apariencia ficticia (Tipo 12)

Gregory recurre en este caso a un conocido ejemplo de la psicología de la Gestalt, el triángulo de Kanizsa, ideado por el profesor de psicología italiano Gaetano Kanizsa, quien lo utiliza como ejemplo del funcionamiento de la ley gestáltica de cierre de contornos (Kanizsa, 1976).

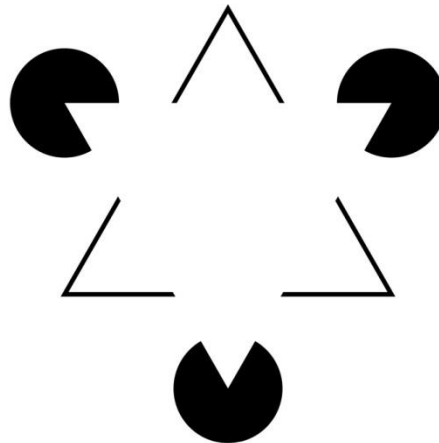


Fig. 5.27. Triángulo de Kanizsa

En esta ilusión, las formas perimetrales ofrecen escasas sugerencias de los contornos, sin embargo, éstas son suficientes como para evocar una completa percepción del triángulo.

Pienso que un claro ejemplo de este tipo, que va más allá de las teorías de la Gestalt es la pintura ilusionista, que trata de engañar a nuestros sentidos reproduciendo las claves pictóricas estudiadas en el capítulo anterior, para evocar así en nuestra mente una escena ficticia.

La pintura ilusionista es un claro precedente de la estereoscopia y su estudio resultará muy interesante para el desarrollo de esta Tesis. En el próximo capítulo, se abordará este tema con la profundidad que se merece, por lo que aquí mostraré únicamente un ejemplo del artista contemporáneo Julian Beever que sirve para ilustrar este concepto.



Fig. 5.28. Julian Beever, *Meeting Mr Frog*

5.2.2. Causa cognitiva relacionada con conocimiento previo de los objetos

5.2.2.1. Apariencia ambigua (Tipo 13)

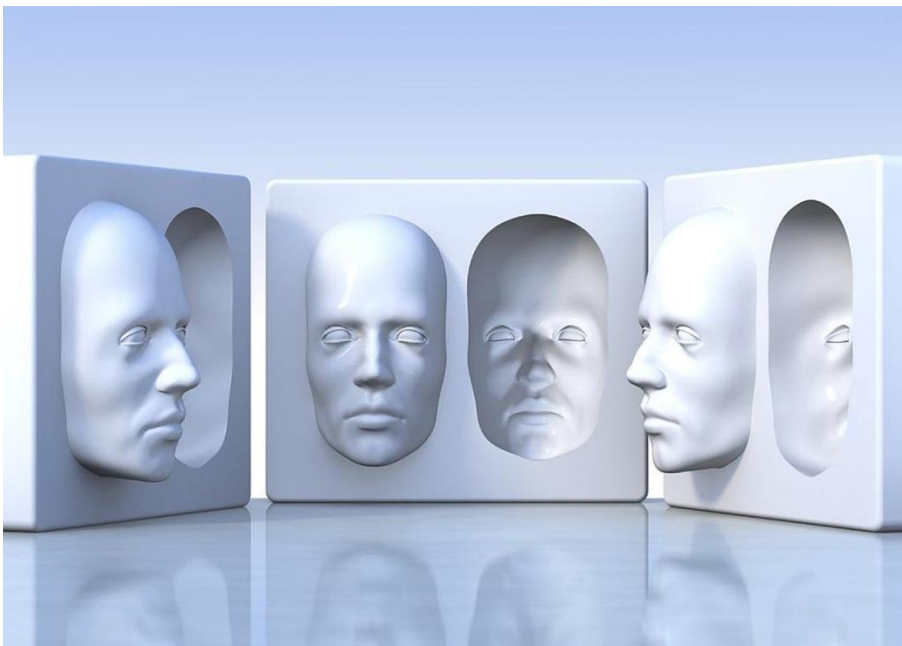


Fig. 5.29. David Mack, *Hollow face illusion*

Gregory pone un buen ejemplo para ilustrar este tipo de ilusiones, refiriéndose al efecto que se produce al contemplar una máscara desde la parte interior. El conocimiento tan arraigado en nuestro cerebro de la cara humana, nos lleva a percibir la cara convexa aun cuando miramos la máscara desde el interior.

En el bloque central de la Fig. 5.29, se suele interpretar que ambas caras son convexas, pese a que una de ellas no lo es. Sólo tendemos a apreciar el relieve correctamente cuando observamos desde un punto de vista muy sesgado, de modo que el contorno de la máscara oculte gran parte de la zona interior de la máscara (piezas laterales).

El efecto es aún más llamativo y desconcertante cuando se produce una rotación de la máscara alrededor de su eje vertical¹.

Wheatstone hace referencia en su artículo a esta misma ilusión de apreciación contraria de los relieves, refiriéndose al caso de un camafeo que podía llegar a interpretarse como bajo relieve a hueco relieve. Wheatstone comenta al respecto las teorías de sus colegas, en especial la de David Brewster, que relaciona la apreciación del relieve con la dirección de la luz. Wheatstone da a entender que la visión estereoscópica resolvería totalmente esta ambigüedad, cuando dice:

“...Cuando el bajo relieve o el hueco grabado es visto con ambos ojos, no hay lugar a confusión por los motivos que hemos comentado anteriormente, pero cuando es visto con un solo ojo no tenemos lo que resulta ser la mejor ayuda para nuestra apreciación, es decir, la presentación de dos imágenes diferentes a cada ojo, por lo que se requiere de la imaginación para suplir la deficiencia y apreciamos el objeto como hundido o elevado, en concordancia a los dictados de esta facultad. Sin duda, nuestra apreciación se verá influenciado, en gran medida, por las circunstancias del entorno y apreciaremos un hueco relieve o un bajo relieve, según nuestro conocimiento adquirido acerca de hacia dónde deberían aparecer las sombras, pero la causa real del fenómeno se encuentra en la indeterminación producida por la ausencia del medio más perfecto que tenemos para juzgar...” (Fragmento traducido de Wheatstone, 1938)

Lo cierto es que cualquiera que haya experimentado la ilusión de la máscara, en vivo, comprobará que, en este caso, la ayuda proporcionada por la visión binocular es insuficiente para deshacer la ilusión, puesto que el conocimiento adquirido de la imagen de la cara es tremendamente poderoso y prevalecerá sobre la visión estereoscópica.

¹ Puede verse una animación con este efecto en el siguiente link:
<http://www.youtube.com/watch?v=sKa0eaKsdA0>

Hemos visto como ciertas ilusiones ópticas están provocadas por la influencia del entorno del estímulo. En la figura siguiente, la interpretación del estímulo central puede verse influenciada por el entorno, pudiendo leerse como una B o como el número 13, según el sentido en el que recorremos la imagen con la mirada y procedamos a la lectura de los elementos adyacentes; su causa es claramente cognitiva y relacionada con objetos que conocemos muy bien, letras y números en este caso.

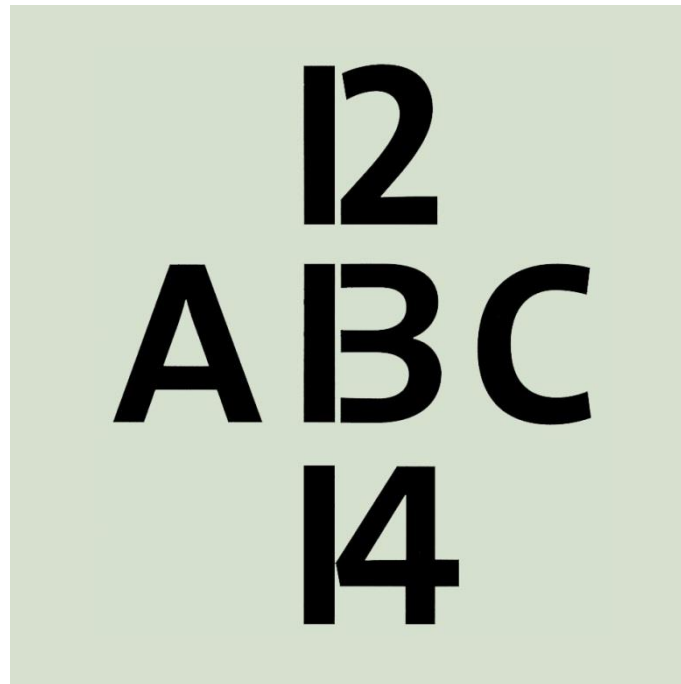


Fig. 5.30. Doble interpretación influenciada por el entorno y el conocimiento de objetos cotidianos. Adaptada de Menkhoff (2010)

5.2.2.2. Apariencia distorsionada (Tipo 14)

El ejemplo que propone Gregory para ilustrar este tipo de ilusiones pienso que no es demasiado acertado. Él se refiere a la apariencia de pesadez de los objetos, que solemos evaluar en función de su tamaño. Es cierto que tendemos a pensar que los objetos grandes son más pesados, pero hace falta involucrar el sentido del tacto para evaluar el engaño que nos produce esta apariencia.

La habitación de Ames, ideada por el oftalmólogo estadounidense Adelbert Ames, Jr. en 1946, me parece un ejemplo más indicado. Esta ilusión se basa en el equívoco al que puede conducir la imagen retiniana, ya que hay infinitos objetos que pueden corresponderse con la misma proyección. Cualquier sistema de proyección resulta ambiguo si se presenta una sola vista.

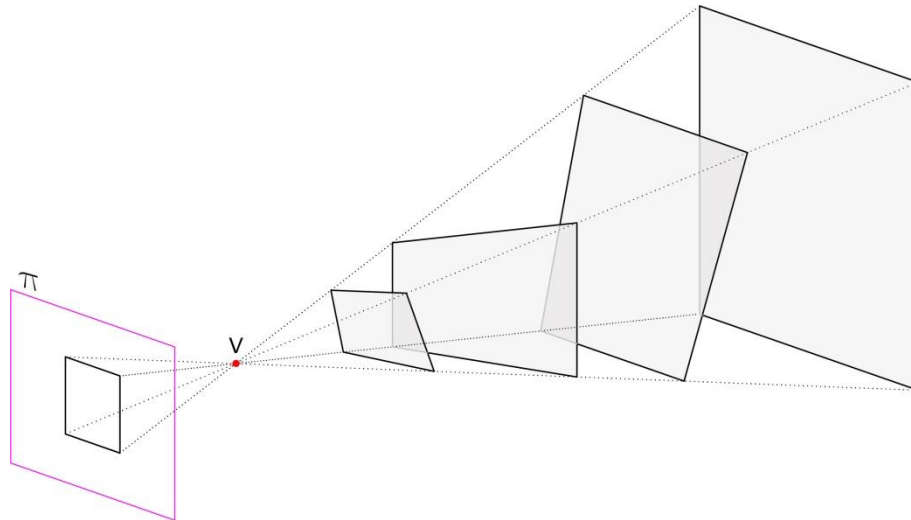


Fig. 5.31. Ambigüedad proyectiva. Infinitos objetos pueden originar la misma proyección. Pedro Cabezos

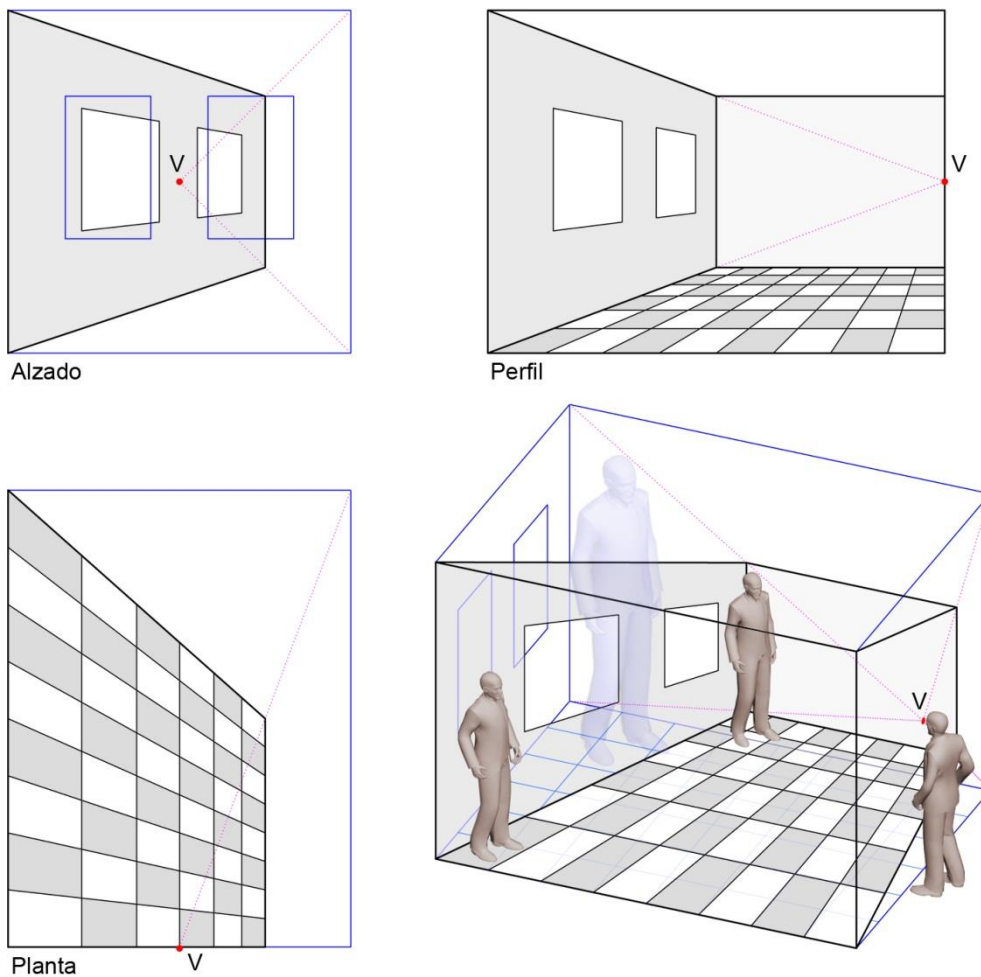


Fig. 5.32. Esquema de una posible habitación de Ames. Pedro Cabezos

La Fig. 5.32 representa las proyecciones de una posible habitación de Ames, con una geometría tronco piramidal. Dado que nuestra experiencia nos dice que la mayoría de las habitaciones son prismas rectangulares rectos, un espectador situado en V, la

interpretará como un ortoedro como el que se representa en azul y experimentará una distorsión del tamaño aparente de las personas que están situadas en el interior de la habitación, debido a que su distancia real es muy distinta a la que se percibe (Fig. 5.33).



Fig. 5.33. Percepción distorsionada producida por la habitación de Ames. Fotografía de Ian Stannard

5.2.2.3. Apariencia paradójica (Tipo 15)

Esta ilusión está muy ligada al movimiento surrealista en el que el artista trata de dejar perplejo al espectador ideando escenas que rompen las reglas de la realidad.

Tal como señala Gregory, *La reproducción prohibida*, pintado por René Magritte en 1937 es un claro ejemplo de ello. En este cuadro se produce una situación paradójica cuando el artista transgrede el funcionamiento preconcebido que tenemos de un espejo, que muestra algo que no cabía esperar, la espalda del sujeto que hay frente al espejo (Fig. 5.34, izda.).

No podemos dejar de mencionar la obra de Salvador Dalí como uno de los máximos exponentes del surrealismo, con ejemplos como *La tentación de San Antonio*, pintada en 1946, en donde se muestra un espacio que desafía las leyes de la gravedad con animales de larguísimas y esbeltas patas que cargan con la tentación que San Antonio trata de exorcizar (Fig. 5.34, dcha.).

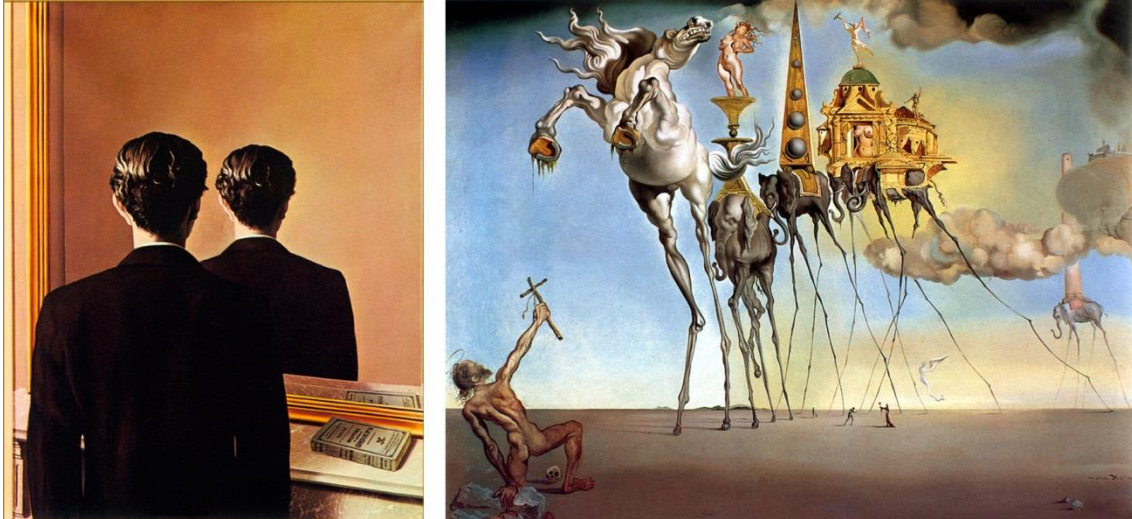


Fig. 5.34. René Magritte, 1937, *La reproducción prohibida*, óleo sobre lienzo, Museo Boijmans Van Beuningen, Rotterdam (izda.). Salvador Dalí, *La tentación de San Antonio*, 1946, óleo sobre lienzo, Museo Real de Bellas Artes, Bruselas (izda.)

Otro gran ejemplo, esta vez del surrealismo fotográfico, es la obra del fotógrafo madrileño Chema Madoz, premio nacional de fotografía en el año 2000, cuyo trabajo resulta muy original y fascinante (Fig. 5.35).



Fig. 5.35. Fotografías de Chema Madoz

5.2.2.4. Apariencia ficticia (Tipo 16)

Nuestra imaginación nos lleva con frecuencia a percibir figuras cotidianas a partir de algo que nada tiene que ver con ellas, como por ejemplo las nubes, las siluetas de las montañas, las rocas, etc. Es lo que se conoce técnicamente como pareidolia, derivada del griego *eidolon*, figura o imagen, y del prefijo *para*, junto a o adjunta.



Fig. 5.36. Pareidolia en motivos naturales y artificiales

Ciertos rasgos de los objetos de nuestro entorno evocan en nuestra mente la imagen de algo que nos resulta reconocible.

Se ha señalado que la pareidolia puede obedecer a un rasgo evolutivo orientado hacia la supervivencia, puesto que esta facultad nos podría ayudar a discernir caras en condiciones de poca visibilidad.

5.3. Ilusiones fuera de la clasificación de Gregory

En general, la clasificación realizada por Gregory sirve para clasificar bastante bien las ilusiones, al menos desde el punto de vista de las apariencias, mientras que en algunos casos resulta complicado discernir y aislar la causa que origina la ilusión.

También se ha visto que es posible que algunas ilusiones se deban a dos causas simultáneamente y creo que la ilusión estereoscópica es un claro ejemplo de ello.

Para crear una ilusión estereoscópica, en general, se debe engañar al sistema visual, por un lado, imitando las claves monoculares pictóricas, propias de la pintura ilusionista y, por otro lado, las binoculares de disparidad.

Para reproducir la disparidad retiniana hace falta un sistema óptico que consiga mostrar a cada ojo y de forma independiente la imagen del par estereoscópico que le corresponde, o bien, se puede utilizar una técnica como la visión cruzada libre para provocar una alteración en la convergencia ocular. De estas técnicas tendremos ocasión de hablar más adelante, pero la necesidad de su uso situaría a la ilusión estereoscópica dentro del grupo de aquellas que tienen una causa física óptica, pero, por otro lado, tanto las claves monoculares pictóricas, como las de disparidad, han de ser interpretadas por nuestro cerebro, por lo que también existe una causa cognitiva. Nos encontraríamos, en este caso, ante una ilusión óptica de apariencia ficticia y de causa óptico-cognitiva, cosa que no contempla la clasificación de Gregory.

Con este razonamiento no se pretende rechazar en absoluto la clasificación, sino aportar un caso que sugiere una ampliación o flexibilización de las causas como el mismo Gregory reconoce que podría ocurrir en su artículo.

Como ejemplo de este tipo se podría poner cualquier imagen estereoscópica, pero quisiera concluir este capítulo comentando aquella ilusión estereoscópica que tanto llama la atención de Wheatstone, quien describe el efecto de la siguiente manera:

“...Otro efecto curioso de percepción binocular se puede observar sobre un plato plano de metal, cuya superficie ha sido torneada. Cuando se acerca una vela a la superficie del plato, parece sobresalir de él una línea que aparenta estar mitad por encima y mitad por debajo de la superficie del plato; la posición e inclinación de esta línea cambia al cambiar la situación de la vela o la del observador, pero ésta pasa siempre por el centro del plato. Al cerrar el ojo izquierdo el efecto de relieve desaparece y la línea luminosa coincide con uno de los diámetros del plato; cerrando el ojo derecho, la línea aparece igualmente sobre el plano de la superficie, pero coincidiendo con otro diámetro; abriendo ambos ojos, aparece de nuevo el relieve. (La línea luminosa, vista por un solo ojo, es debida a la reflexión de la luz producida por cada uno de los surcos

circulares producidos por el proceso de torneado. Si el plato no es demasiado grande, estas reflexiones no difieren de una línea recta)...”
(Wheatstone, 1938, 379).

En efecto, lo que plantea Wheatstone es que la reflexión de la llama de la vela, sobre el plato torneado, es vista por cada ojo en posiciones distintas, debido al efecto de anisotropía que causan los surcos del plato, originándose así la ilusión estereoscópica.

En próximos capítulos analizaremos en profundidad las técnicas estereoscópicas, pero tal como se ha mencionado previamente, merece la pena ahondar en un claro antecedente de la estereoscopía, la pintura ilusionista, estrechamente ligada a la anamorfosis como veremos en el capítulo siguiente.

6. LA ANAMORFOSIS. HISTORIA Y EVOLUCIÓN

La pintura ilusionista ha producido el asombro y fascinación del hombre desde hace siglos, el hecho de conseguir engañar a nuestro sistema visual para percibir aquello que no existe siempre ha sido considerado como algo mágico y sorprendente. Por ello muchos artistas han tratado de producir este engaño con sus pinturas, también llamadas trampantojos, de “trampa ante el ojo”, o como denominan los franceses, trompe-l’oeil, “engaña el ojo”.

Vitrubio y Plinio el viejo ya nos hablan del arte del trampantojo en la pintura griega con el mito de Parrasio y Zeuxis, pintores del siglo V a.C., que compitieron para demostrar quién era el mejor artista. Cuando Zeuxis desveló su pintura de uvas, era de tal realismo que los pájaros bajaron e intentaron picotearlas. Zeuxis pidió entonces a Parrasio que corriera la cortina que ocultaba su obra y éste reveló que era la propia cortina lo que había pintado, por lo que Zeuxis tuvo que reconocer la victoria de su contrincante, admitiendo que él sólo había conseguido engañar a los pájaros mientras que su oponente había engañado a un artista.

Una de las aplicaciones iniciales de la pintura ilusionista fue su uso en escenarios teatrales. Vitruvio señala a Agatarco de Samos (siglo V a.C.), como el inventor de un método para producir escenarios que simulaban profundidad, denominado escenografía, aplicado también en la decoración de las villas más ostentosas, tradición que siguieron también los romanos.

Dado que la vocación de la pintura clásica es, en general, representar con fidelidad una escena real o imaginada, puede resultar complicado establecer el límite entre lo que consideramos una pintura convencional y un trampantojo, si bien, éste último requiere un virtuosismo extremo del artista, no solo en el control de las luces, las sombras y la perspectiva, sino también por la adaptación de la obra al espacio que la envuelve. Quizás sea este último aspecto o voluntad del artista la clave que confiere a la obra el carácter ilusorio.

La relación de la obra con el espacio circundante en ocasiones se limita al marco del cuadro, de donde los personajes parecen sobresalir, como en la obra de la Fig. 6.1, izquierda, de Pere Borrell, mientras que en otras ocasiones la arquitectura misma se convierte en el lienzo sobre el que se produce el engaño, con lo que se añade una dificultad adicional cuando las superficies a cubrir son curvas u oblicuas con respecto al espectador, como en el detalle del fresco representado en Fig. 6.1, derecha, pintado sobre una bóveda esquifada del Palazzo Pitti de Florencia.

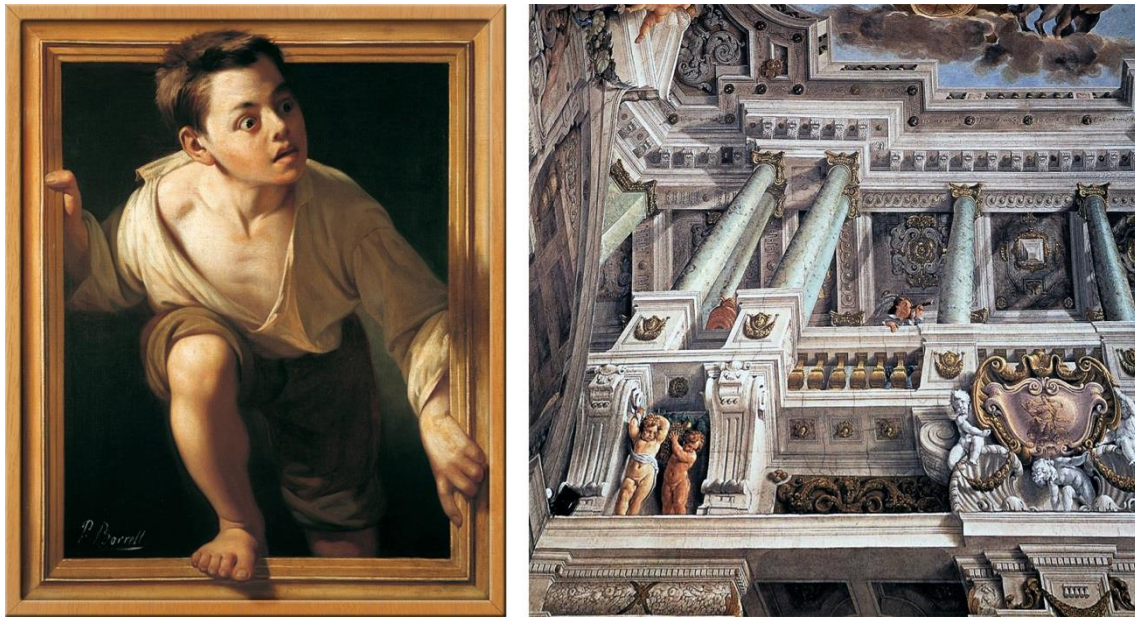


Fig. 6.1. Pere Borrell, 1874, *Huyendo de la crítica*, óleo sobre lienzo, Colección Banco de España, Madrid (izda.). Detalle de la bóveda de la sala de audiencia privada del Palacio Pitti, Florencia, Angelo Michele Colonna y Agostino Mitelli, 1640 (dcha.)

La cámara de los esposos, pintada entre 1470 y 1474 por Andrea Mantegna (Fig. 6.2), constituye uno de los primeros ejemplos de pintura ilusionista en los que la estancia se convierte en un lienzo tridimensional. Mantegna tuvo que emplear todos sus conocimientos de perspectiva para recrear el espacio fingido que se aprecia al situarse en el centro de la estancia. Para el techo de la sala pone en práctica la denominada vista “*di sotto in su*”, vista desde abajo hacia arriba, para simular un óculo abierto hacia el exterior.



Fig. 6.2. Andrea Mantegna, 1474, *Cámara de los esposos*, Palacio Ducal, Mantua

6.1. La anamorfosis

Tradicionalmente se ha considerado que los dibujos plasmados sobre una superficie curva, o bien, sobre planos oblicuos con respecto al observador constituyen una anamorfosis, término de origen griego que significa 'transformación'. La Real Academia Española define la anamorfosis como:

”Pintura o dibujo que ofrece a la vista una imagen deforme y confusa, o regular y acabada, según desde donde se la mire”

El primer elemento que el pintor debe establecer es el punto de vista donde debe colocarse el espectador. Es frecuente encontrar referencias en el pavimento que indican al observador el punto de observación, pues de lo contrario las pinturas se verán deformadas y se perderá el efecto ilusorio.

Si somos rigurosos, deberíamos considerar que todo dibujo construido en perspectiva constituye una anamorfosis, por tanto, incluso los cuadros que vemos de manera frontal deberían ser considerados como tal, si bien, es cierto que las deformaciones que se aprecian cuando el observador no está situado en el punto de vista, son mucho menores en las pinturas frontales que en las trazadas sobre planos oblicuos con respecto al observador o superficies curvas.

Las deformaciones que primero saltan a la vista, cuando la situación del cuadro es frontal, son las conocidas aberraciones marginales, más notorias en cuadros de gran campo visual, que han sido las culpables de suscitar numerosas críticas con respecto a la validez de la perspectiva para representar adecuadamente las formas tal como las percibimos. Sin embargo, estas deformaciones marginales desaparecen cuando el espectador se sitúa en el punto de vista apropiado y éste puede recorrer libremente la pintura con su mirada, aspecto que niega Panofsky (1927) cuando acepta como premisa que el ojo debe permanecer inmóvil.

La concretización de las leyes de la perspectiva se fragua en los tratados que proliferan a partir de la obra de Alberti que, junto con la llegada del estilo barroco, ávido de suntuosidad y apariencias, propician la creación de una nueva corriente pictórica destinada a representar arquitecturas fingidas, surgida en Italia, donde se denominó Quadraturismo, derivado del término “quadrettatura”, que hace alusión a la cuadrícula que se tomaba de referencia para transferir las perspectivas a las superficies arquitectónicas.

La complejidad geométrica que supone representar correctamente la perspectiva sobre las distintas superficies arquitectónicas, implica un gran conocimiento de las leyes de la perspectiva legítima y de métodos específicos que pocos pintores llegaban a dominar, por requerir una gran destreza y especialización.

6.2. La perspectiva sólida

Aunque la definición de anamorfosis ofrecida por la Real Academia se refiere a pinturas o dibujos, también se puede considerar una anamorfosis, las que se obtienen a partir de cuerpos geométricos colocados convenientemente, con el fin de evocar un espacio ilusorio al ser vistos desde el punto de vista adecuado.

Un claro ejemplo de este tipo de anamorfosis es la falsa cabecera de la iglesia de *Santa Maria presso San Satiro*, atribuida a Bramante, realizada entre ca.1478 y 1490. Durante su construcción surge un problema de espacio originado por una calle que ocupaba el espacio del coro.

Bramante, gran conocedor de las leyes de la perspectiva por su trabajo como pintor, para dar una solución a este inconveniente, idea una perspectiva tridimensional para simular el espacio, a modo de bajo relieve de aproximadamente un metro de profundidad. Es lo que se ha denominado perspectiva sólida, en la que el plano del cuadro se desdobra en dos, el plano de las trazas y el plano de las fugas, que contiene los puntos de fuga de todas las posibles direcciones del espacio, de manera que la perspectiva queda comprendida entre ambos planos. (Migliari, 2007)

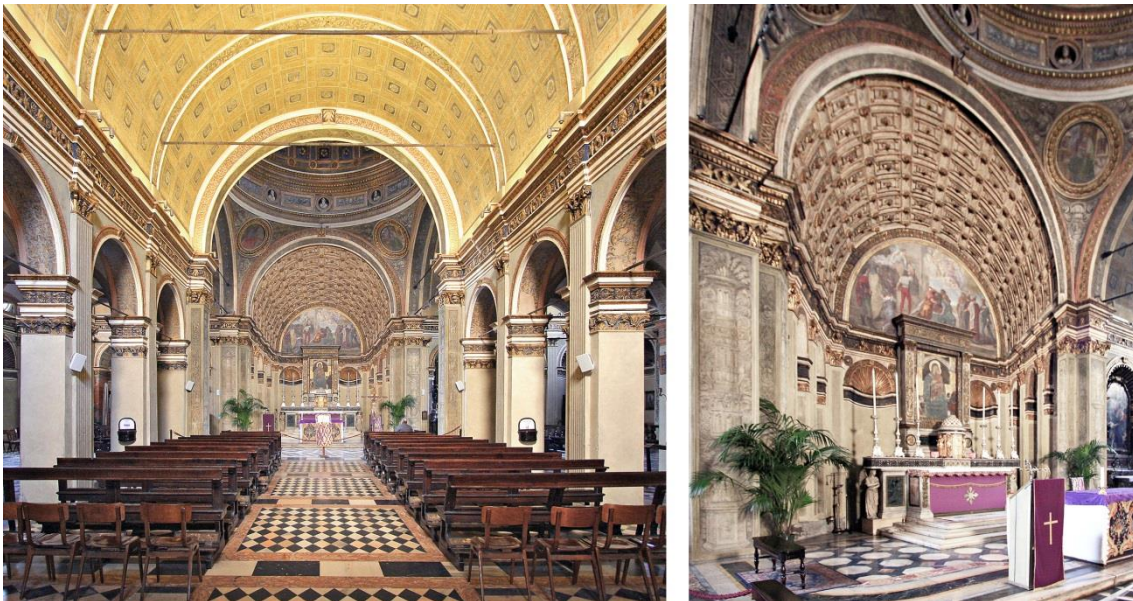


Fig. 6.3. Falso coro realizado por Bramante en la Iglesia de *Santa Maria presso San Satiro*, Milán.

Si el plano de las fugas se sitúa por detrás del plano de las trazas, en relación al observador, se obtiene una perspectiva acelerada, es decir, se logra magnificar el efecto de profundidad, mientras que si, por el contrario, éste queda por delante del plano de las trazas, se produce entonces una perspectiva retardada, que provoca el efecto contrario. En ambos casos se trata de mantener la relación homográfica entre espacio percibido y espacio construido, al igual que ocurre en el ejemplo de la habitación de Ames, visto en el capítulo anterior.

En este caso, se realiza una perspectiva acelerada en la que las aristas en profundidad convergen en un punto de fuga situado a la altura de los ojos del espectador. El efecto ilusorio es extraordinario y puede apreciarse perfectamente mientras caminamos hacia el altar siguiendo el eje de la nave central, sin embargo la profundidad aparente del espacio ficticio varía a lo largo del recorrido, disminuyendo a medida que nos acercamos al coro. Para apreciar las proporciones correctas de este espacio deberíamos situarnos sobre el punto que marca la Fig. 6.4, izquierda.

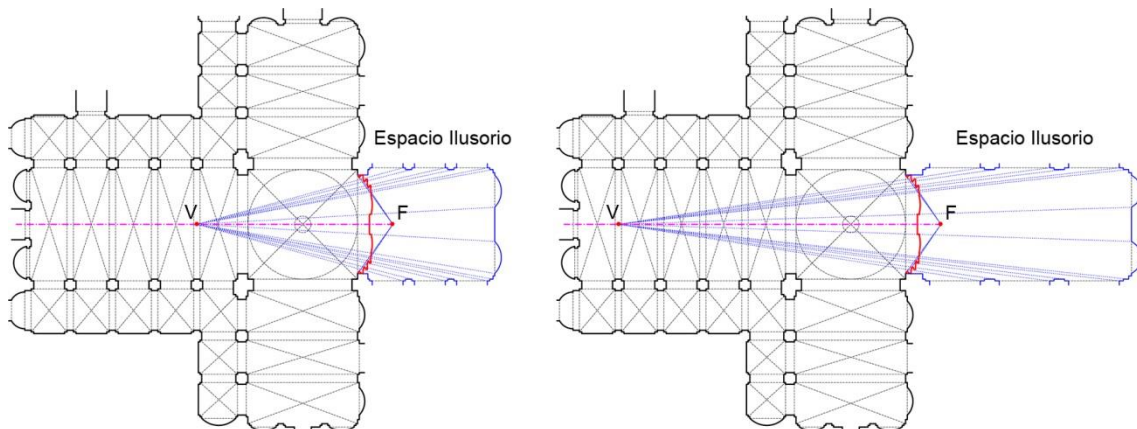


Fig. 6.4. Proporciones del espacio ilusorio recreado según la posición del punto de vista. Pedro Cabezos

Otro gran ejemplo es el decorado del Teatro Olímpico de Palladio en Vicenza, realizado por Vincenzo Scamozzi entre 1584 y 1585. En él se recrea un ambiente urbano con cinco largas calles que parten hacia el horizonte, además de los dos accesos laterales que también quedan incluidos dentro de la escenografía.

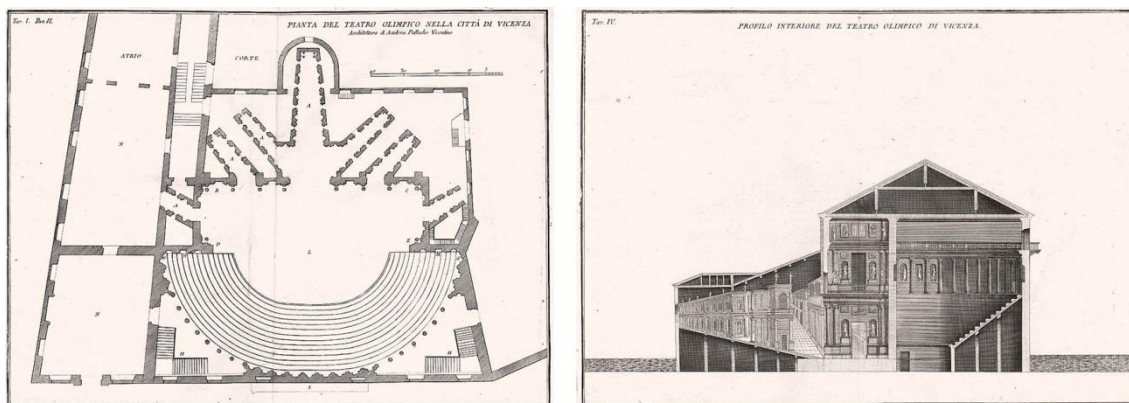


Fig. 6.5. Planta y Sección del Teatro Olímpico de Palladio. Dibujos de Francesco Muttoni

Scamozzi realiza una perspectiva acelerada para adecuar el decorado al tamaño disponible en el Teatro; como los espectadores ven la escena desde distintos puntos de vista, Scamozzi sitúa estratégicamente los puntos de vista de cada calle, repartidos por la platea para que la mayor parte de espectadores pueda percibir correctamente el efecto ilusorio.

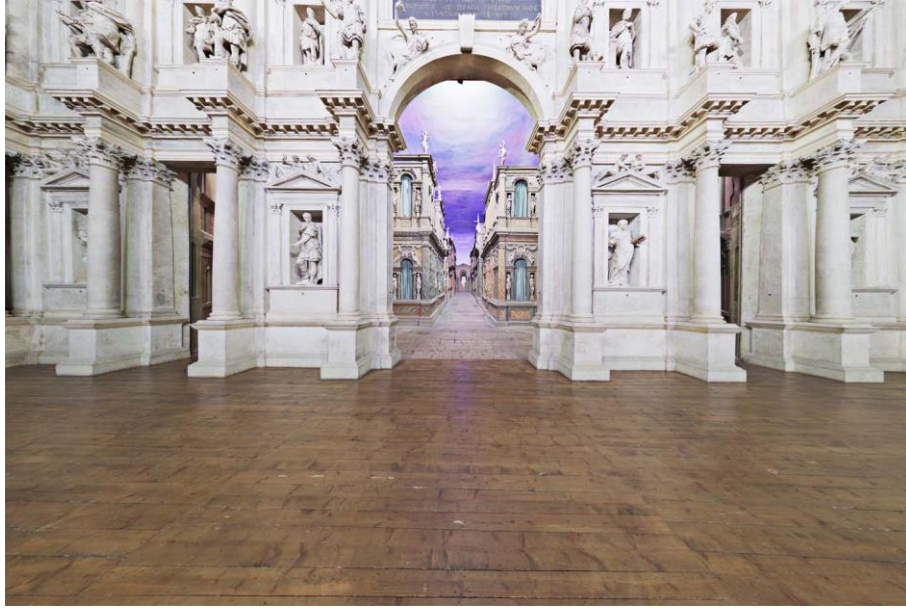


Fig. 6.6. Interior del Teatro Olímpico de Palladio, Vicenza. Pedro Cabezos

La galería del *Palazzo Spada*, ca. 1653, es otro ejemplo de este tipo de anamorfosis, aunque su autoría se ha atribuido siempre a Francesco de Borromini, la intervención en el proyecto del matemático Padre Giovanni Maria da Bitonto ha suscitado la polémica alrededor de la paternidad de esta obra (Fallacara, 2004).

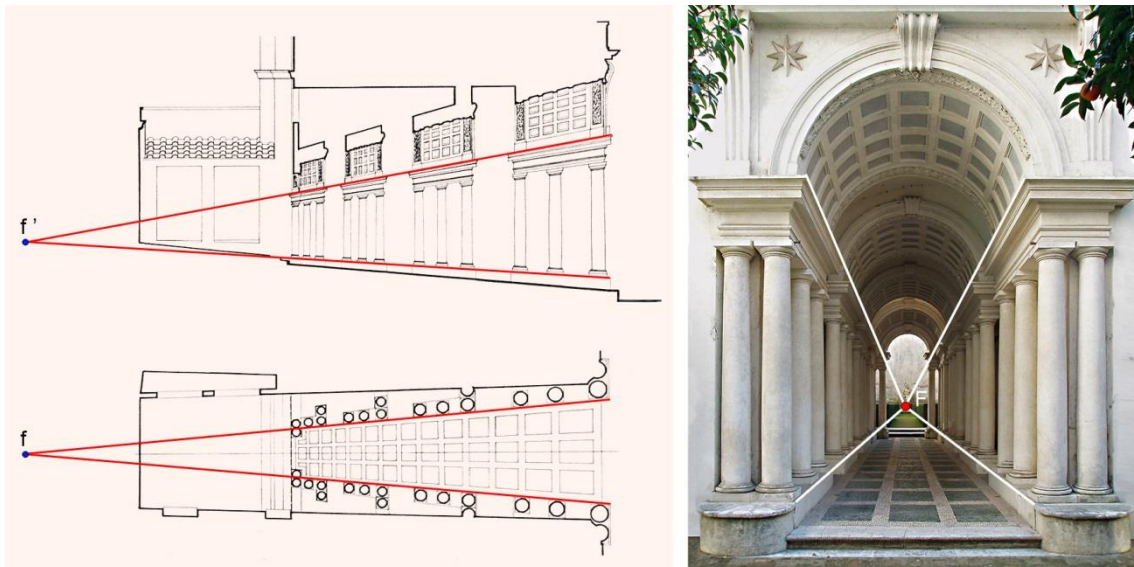


Fig. 6.7. Galería del *Palazzo Spada*. Punto de fuga de la perspectiva sólida

En este caso de perspectiva sólida se logra recrear un corredor de más de 30 metros utilizando un espacio real de 8 m de profundidad. La estatua que se observa en el patio situado al final del corredor aparenta ser de tamaño natural, cuando en realidad mide tan sólo unos 60 cm de alto.

6.3. Los tratados del Barroco y la pintura cuadraturista

Los primeros tratados en abordar la anamorfosis son los de Vignola (1562) y Barbaro (1568), más tarde aparecerían otros, entre los que destacan el de Nicerón (1638), Bettini (1642), Pozzo (1693) y Bibiena (1711), que tratan el problema con mayor profundidad y rigor. En los tratados españoles de García Hidalgo (1681) y Palomino (1724), también se contempla el tema de la anamorfosis.

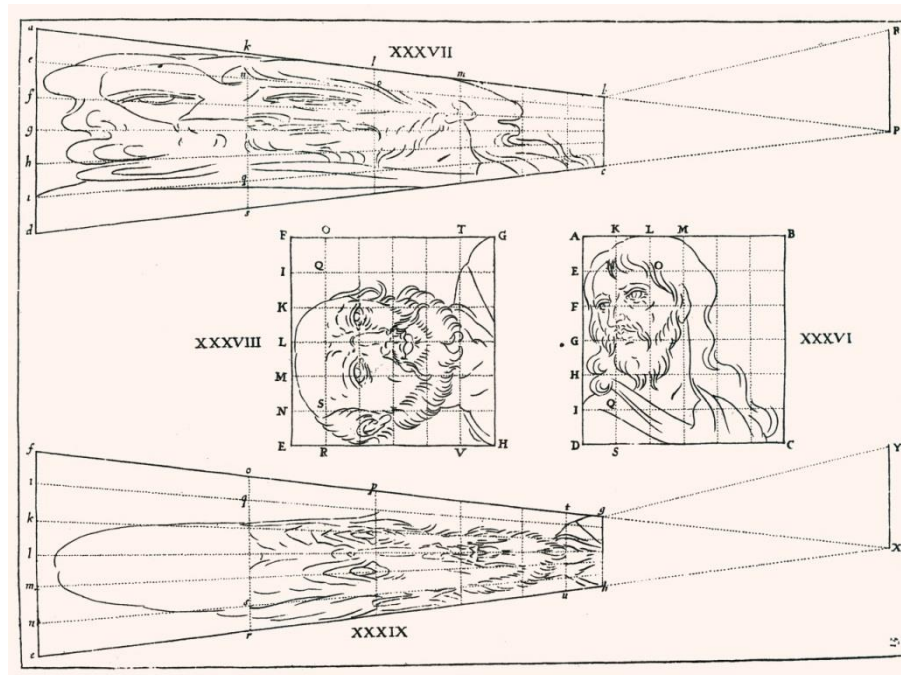


Fig. 6.8. Tratado de Nicerón. Anamorfosis plana

Uno de los casos más sencillos es la anamorfosis plana, que se realiza sobre un plano oblicuo al espectador. Nicerón resuelve este tema con la construcción en perspectiva legítima de la cuadrícula de referencia que muestra la Fig. 6.8. Este procedimiento sirve tanto para planos horizontales (construcción XXXIX), como para planos verticales (XXXVII), tratándose de procedimientos análogos.

En el caso del apóstol, el segmento abatido X-Y, es la distancia del punto de vista X al plano horizontal donde se dibuja la cuadrícula, por tanto el punto Y es el punto de distancia por donde debe pasar la diagonal de la cuadrícula, mientras que, en el caso de la cabeza de Cristo, el segmento abatido P-R, es la distancia del punto de vista P, al plano vertical donde se dibuja la cuadrícula, actuando análogamente el punto R como punto de distancia.

Obsérvese que los dibujos que servirán de referencia para trasladar a la cuadrícula en perspectiva (XXXVIII y XXXVI), cambian de orientación para ajustarse correctamente a su posición horizontal, caso del retrato del apóstol, o vertical, caso del retrato de

Cristo. Esta construcción obedece también al auge que tuvieron los retratos anamórficos, tal como hace referencia Navarro (1996).

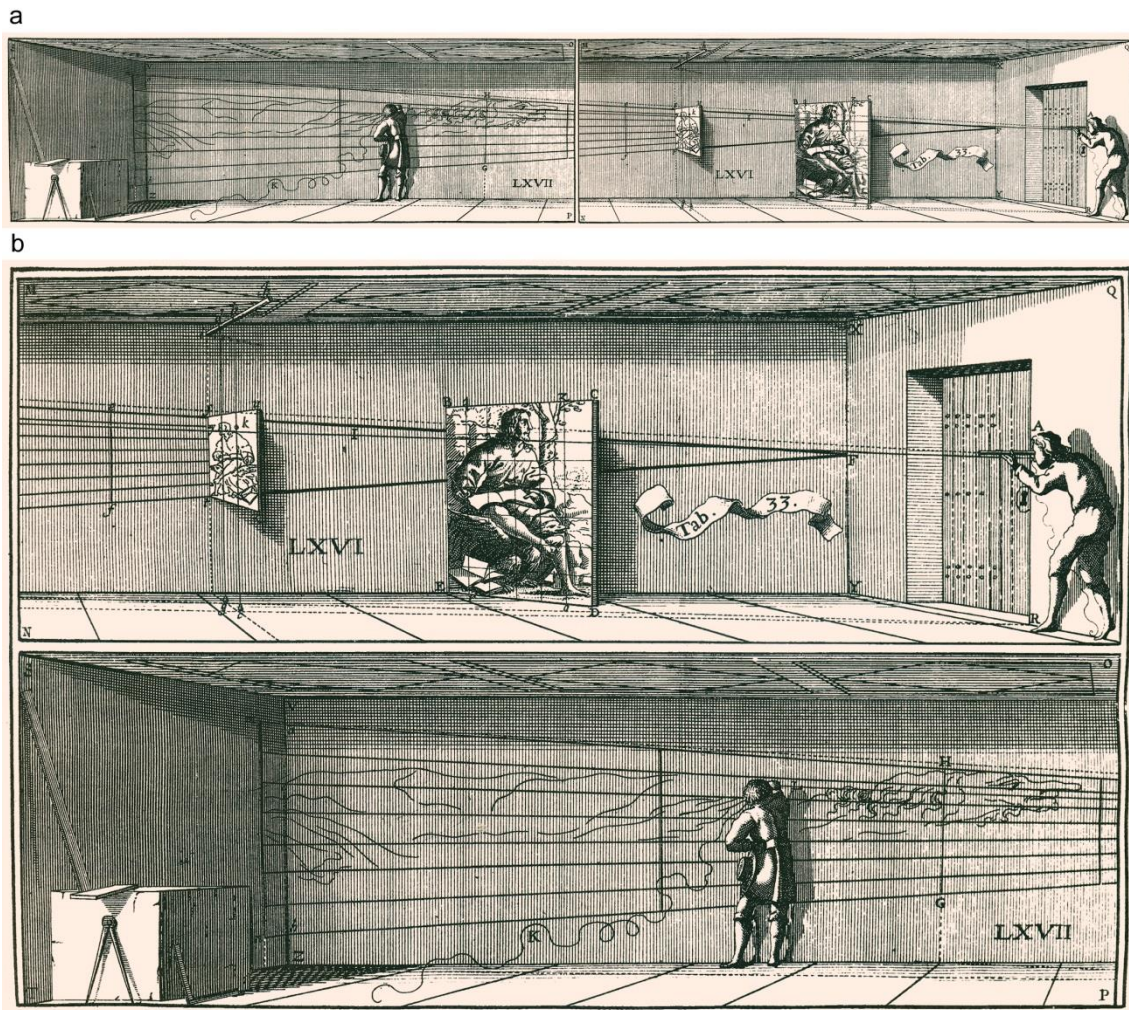


Fig. 6.9. Tratado de Nicerón. Método para trazar una anamorfosis según Maignan

En la Fig. 6.9a, se ha realizado una composición de dos figuras del tratado de Nicerón, tal como deberían disponerse, ya que, por motivos de espacio, aparecen separadas en el tratado original (Fig. 6.9b). La figura ilustra muy bien el procedimiento empleado para trasladar la imagen sobre la pared vertical oblicua con respecto al espectador, que se sitúa en *A*. La tabla *BCDE* es el cuadro original, que se ha cuadriculado únicamente para facilitar la reducción de escala con la que se obtiene el lienzo más pequeño, que servirá de referencia para trasladar el diseño al muro. Este lienzo funciona de forma análoga a la ventana que describe Durero (1525), es decir, puede ser abatible para no entorpecer el paso del cordel, que parte del punto de vista *A*, pasa por el punto *K*, situado sobre el cordel *bc*, que marca el punto del lienzo que se proyectará sobre la pared. Según Baltrusaitis (1969), Nicerón complementa este método, con el utilizado por el padre Maignan en el fresco de la Trinità dei Monti, que representa a San Francisco de Paula.

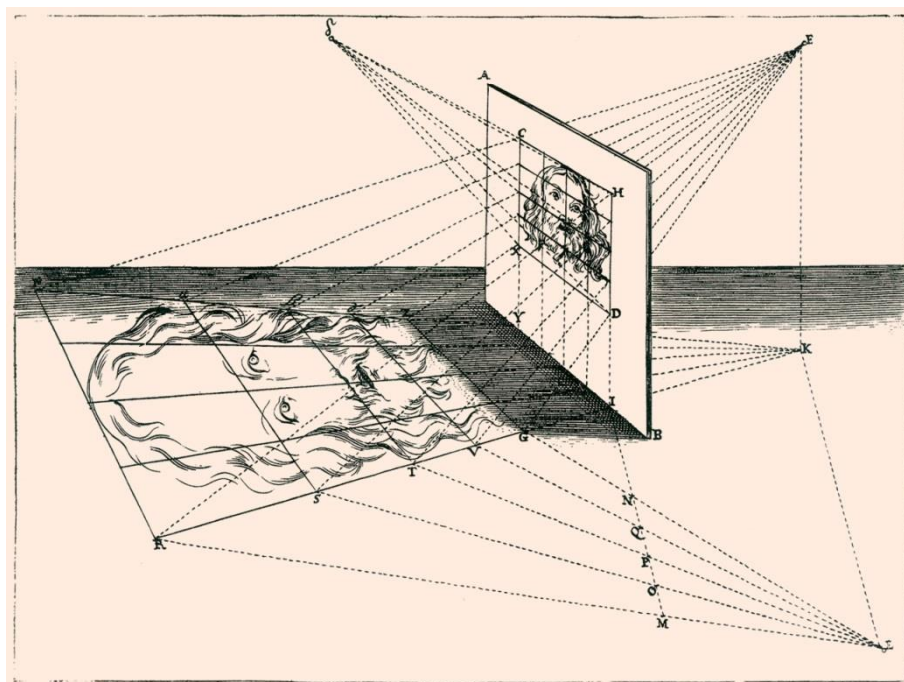


Fig. 6.10. Tratado de Bettini. Anamorfosis plana

Bettini plantea un procedimiento algo más laborioso en la Fig. 6.10, donde abate la cara de la pirámide visual ERK , para realizar las divisiones de la cuadrícula en perspectiva. El esquema de Bettini, aunque clarifica espacialmente el concepto de anamorfosis, es menos eficiente que el de Nicerón. Además, si se analiza la propia construcción en perspectiva del esquema, se puede constatar que está lleno de incongruencias, las aristas horizontales de la Tabla AB , deberían fugar al mismo punto que las rectas de la cuadrícula en perspectiva, a la que son paralelas. Si trazamos la diagonal de la cuadrícula, observaremos que no pasa por vértices de ésta, tal como debería ocurrir, y la construcción abatida, no parece descansar sobre el plano horizontal.

Un ejemplo de virtuosismo de anamorfosis plana, que se menciona siempre que se habla del tema, y no es para menos, es el cuadro *Los embajadores* de Hans Holbein el Joven, pintado en 1533. En él aparece una desconcertante figura que cualquier espectador no familiarizado con este tipo de imágenes, no sabrá identificar a qué corresponde. Bastará encontrar el punto de vista adecuado para descubrir que se trata de la imagen de un cráneo humano. La Fig. 6.11 muestra la posición del punto de vista que se ha obtenido para visualizar correctamente la calavera. Se muestra el trapecio isósceles $abcd$, fruto de la intersección de la pirámide visual, de base cuadrada y vértice V , con el plano vertical que contiene al cuadro. Posteriormente se ha realizado una transformación proyectiva, correspondiente a una homología, para convertir el trapecio en el cuadrado $ABCD$ y mostrar la imagen que vería un observador situado en el punto de vista V .

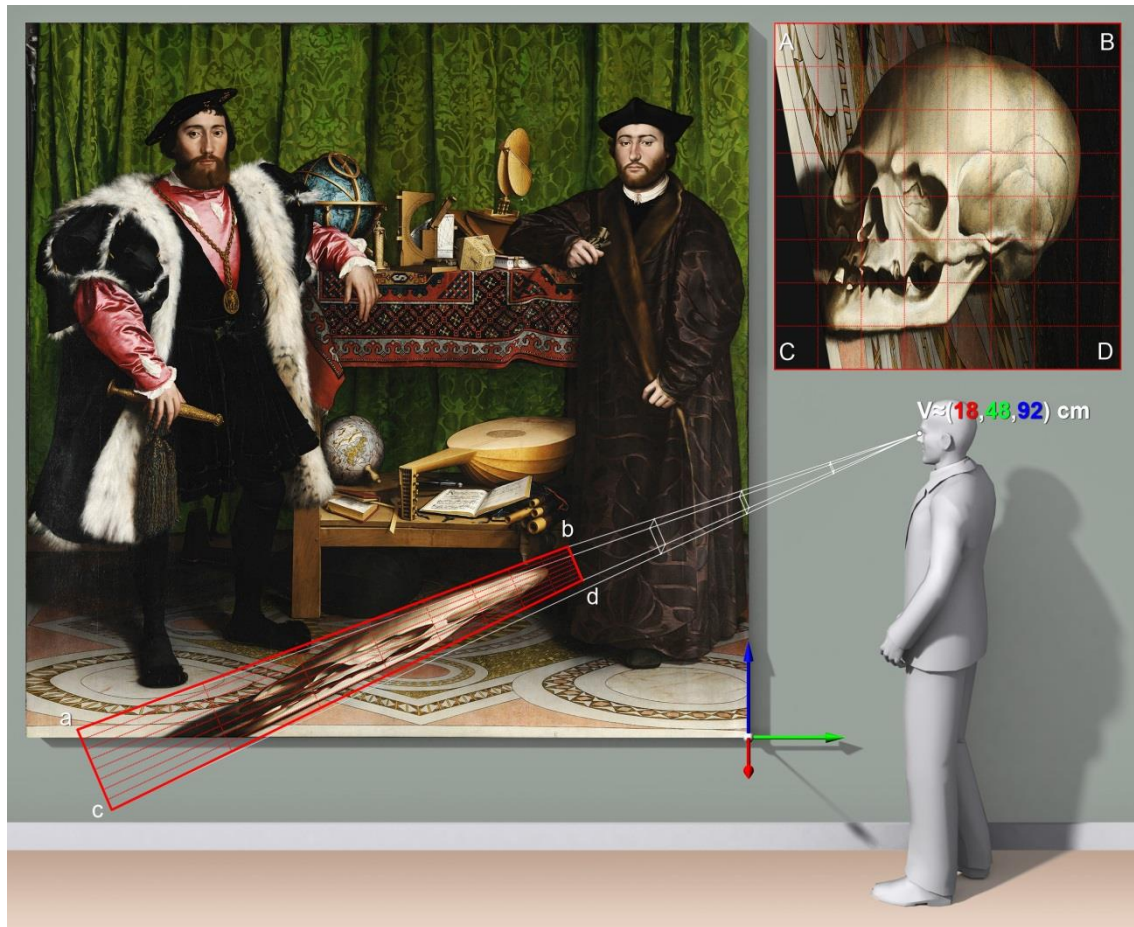


Fig. 6.11. Estudio del punto de vista para observar la anamorfosis que contiene el cuadro Los embajadores de Hans Holbein. Pedro Cabezos

Está claro que Holbein dejó patente en esta pintura todo su talento, no sólo como pintor, sino como gran conocedor de las leyes de la perspectiva, envolviendo su trabajo de un aire místico. Es un cuadro para saborear de cerca por sus maravillosos detalles y simbología oculta. Afortunadamente, para disfrutarlo no es necesario acudir a la National Gallery de Londres, donde se encuentre expuesto, sino que gracias a la web de la propia National Gallery², puede contemplarse con resolución gigapixel, lo que permite admirar sus pequeños detalles. Sin embargo, de este modo no es posible situarse en el punto de vista desde donde se visualiza la calavera correctamente.

El tratado del padre jesuita Andrea Pozzo fue sin duda uno de los más brillantes del barroco. Él supo plasmar, de manera ejemplar, toda su experiencia como pintor cuadraturista. Uno de sus trabajos más importantes fueron las pinturas realizadas en la Iglesia de San Ignacio de Roma, donde destaca *El triunfo de San Ignacio*, pintado al fresco entre 1691 y 1694 sobre la bóveda de la nave central (Fig. 6.12). Se trata de una anamorfosis curva sobre una bóveda de cañón con lunetos.

² <http://www.nationalgallery.org.uk/paintings/hans-holbein-the-younger-the-ambassadors>



Fig. 6.12. Andrea Pozzo, 1694, *Triunfo de San Ignacio*, Iglesia de San Ignacio, Roma. Fotografía de Pedro Cabezos

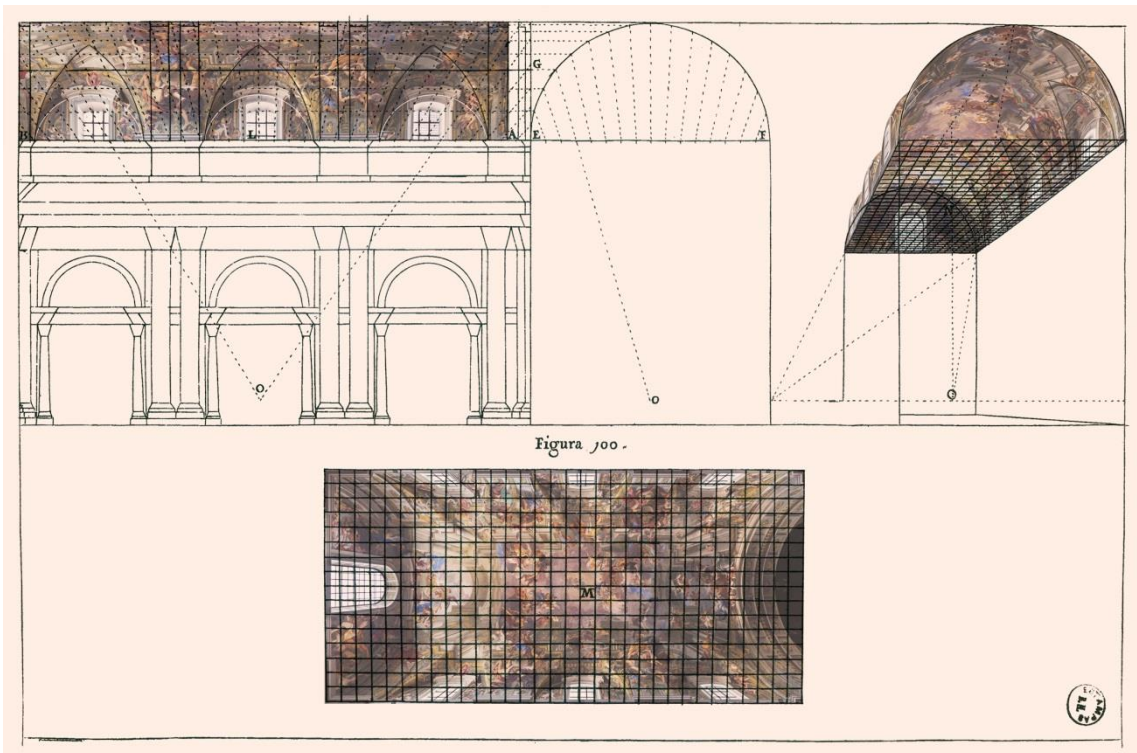


Fig. 6.13. Superposición de las vistas reales de la bóveda sobre la lámina original de Andrea Pozzo que describe la proyección de la cuadrícula sobre la bóveda. Pedro Cabezos, adaptado del tratado de Pozzo

La Fig. 6.13 muestra el trazado que realiza Pozzo para explicar la proyección de la cuadrícula, situada en el plano horizontal del arranque de la bóveda, sobre la superficie cilíndrica de ésta, a partir del punto de vista. Se han superpuesto sobre el esquema original las vistas reales de la nave. En la práctica, la proyección de la cuadrícula sobre una superficie compleja podía hacerse a oscuras, situando una fuente luminosa en el punto de vista y calcando la sombra de la cuadrícula que se

proyecta sobre la superficie, pero esto no sería viable en casos donde la distancia a la fuente luminosa es grande, en cuyo caso se utilizaría la técnica del cordel anclado al punto de vista.

La falsa cúpula del crucero de San Ignacio, realizada en 1685, es otra de las grandes obras que realizó el padre Pozzo. Se trata de un lienzo de tela plano que simula el espacio de la bóveda, que se había proyectado inicialmente. Por desgracia, el lienzo original de Pozzo fue destruido en un incendio y la obra actual es una reproducción realizada por Francesco Manno, en 1823, a partir de los estudios y diseños originales de Pozzo. En la Fig. 6.14 se ha realizado un esquema comparativo entre el diseño que Pozzo incluye en su tratado y el lienzo actual.



Fig. 6.14. Andrea Pozzo, 1685, Falsa cúpula de San Ignacio. Comparación entre el diseño que aparece en el tratado y el lienzo actual. Fotografía de Pedro Cabezos

En el suelo de la iglesia, sobre el eje longitudinal, hay dos piezas circulares de mármol amarillo. La primera, situada a mitad de la nave central, indica la posición sobre la que debe situarse el espectador para observar correctamente la bóveda, mientras que la otra, situada al final de la nave central, muy próxima al crucero, marca la posición para visualizar la falsa cúpula.

Otro grandioso ejemplo de la obra de Andrea Pozzo es el Corridoio de Sant Ignazio, en la Casa Profesa del Gesù en Roma, realizado en torno a 1680. Se trata de un espacio cuya planta tiene forma de trapecio rectángulo bastante alargado, de aproximadamente 15 metros de largo y 4 de ancho, cubierto por una bóveda de cañón rebajada. Cuando el espectador se sitúa en el centro de la sala, descubre la magnificencia del espacio recreado por Pozzo. La perfección de la ejecución es tal, que desdibuja totalmente la verdadera arquitectura de la sala.



Fig. 6.15. Andrea Pozzo, 1680, Corridoio de Sant Ignazio, Casa Profesa del Gesù, Roma. Superposición de aristas y generatrices para evidenciar las superficies arquitectónicas reales. Pedro Cabezos

En la Fig. 6.15 se muestra una fotografía del corredio, realizada desde el punto de vista, sobre la que se han marcado las aristas y generatrices de las superficies reales, que llegan a diluirse, especialmente en la bóveda rebajada que Pozzo consigue transformar en un plano lleno de vigas que apoyan sobre ménsulas.

Otro tratadista y pintor destacable fue Ferdinando Galli Bibiena, cuyo tratado es, junto al de Pozzo, uno de los mejores de su género.

La Fig. 6.16 reproduce una de sus magníficas ilustraciones, en las que se representa tanto el espacio real de la sala, como el espacio que debería evocar en el espectador, la pintura realizada en el techo.

Algunos tratados de este periodo llegan incluso a describir anamorfosis catópticas, que deben ser reflejadas sobre una superficie especular, cónica o cilíndrica, dependiendo del caso, para su correcta visualización.

Según Baltrusaitis (1969), las anamorfosis catópticas fueron descritas por primera vez en el tratado de Vaulezard (1630) y también por Nicerón (Fig. 6.17). El trazado de la cuadrícula en estos tratados es a veces poco riguroso; en la Fig. 6.18 se muestran unas infografías con el trazado adecuado de la cuadrícula.

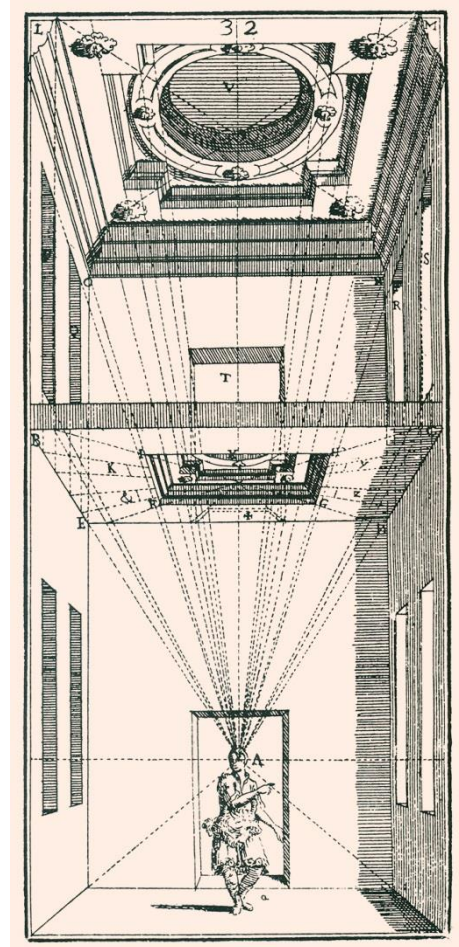


Fig. 6.16. Tratado de Galli Bibiena. *Vista di sotto in su*

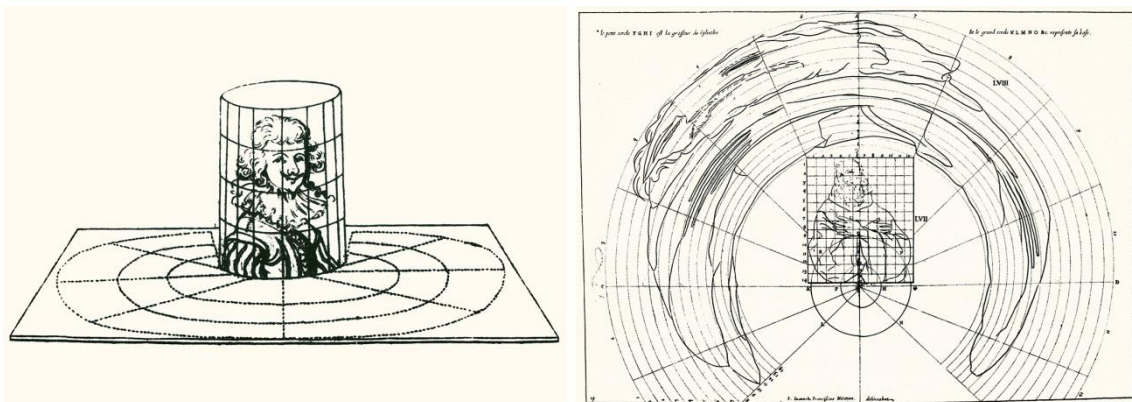


Fig. 6.17. Anamorfosis catóptica cilíndrica en los tratados de Vaulezard (izda.) y Nicerón (dcha.)

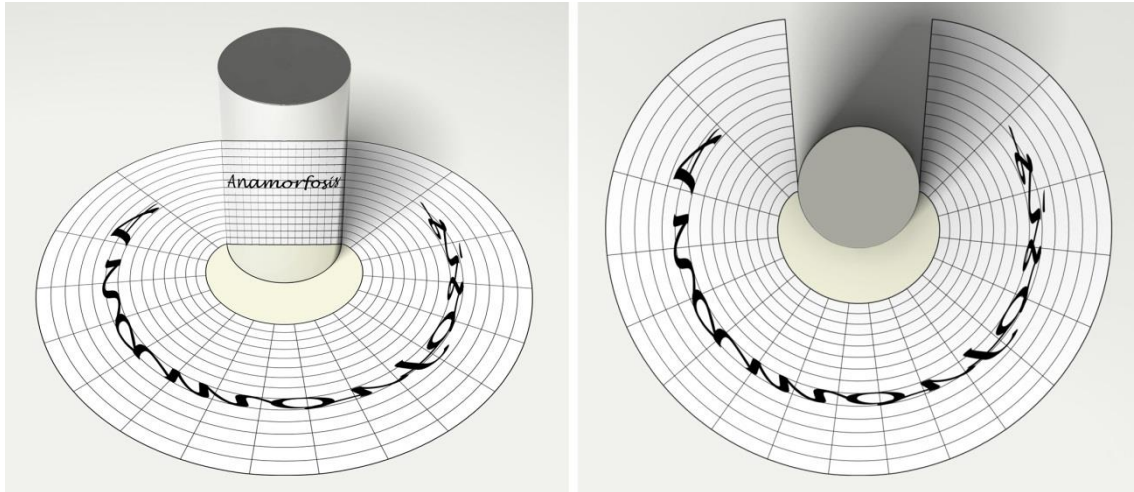


Fig. 6.18. Anamorfosis catóptrica. Infografías con un trazado riguroso de la cuadrícula. Pedro Cabezos

6.4. Los panoramas del XIX

Las anamorfosis se convirtieron en un espectáculo muy popular, considerado como un antecedente del cine, con la aparición de los panoramas o cicloramas, pintados sobre la pared interior de un edificio cilíndrico, en el que los espectadores, situados en el centro del cilindro, tenían la sensación de verse inmersos en una escena de 360 grados. La pintura solía tratar alguna escena histórica, como batallas, o paisajes realizados desde puntos de vista privilegiados y solía acompañarse con música y los comentarios de un narrador.

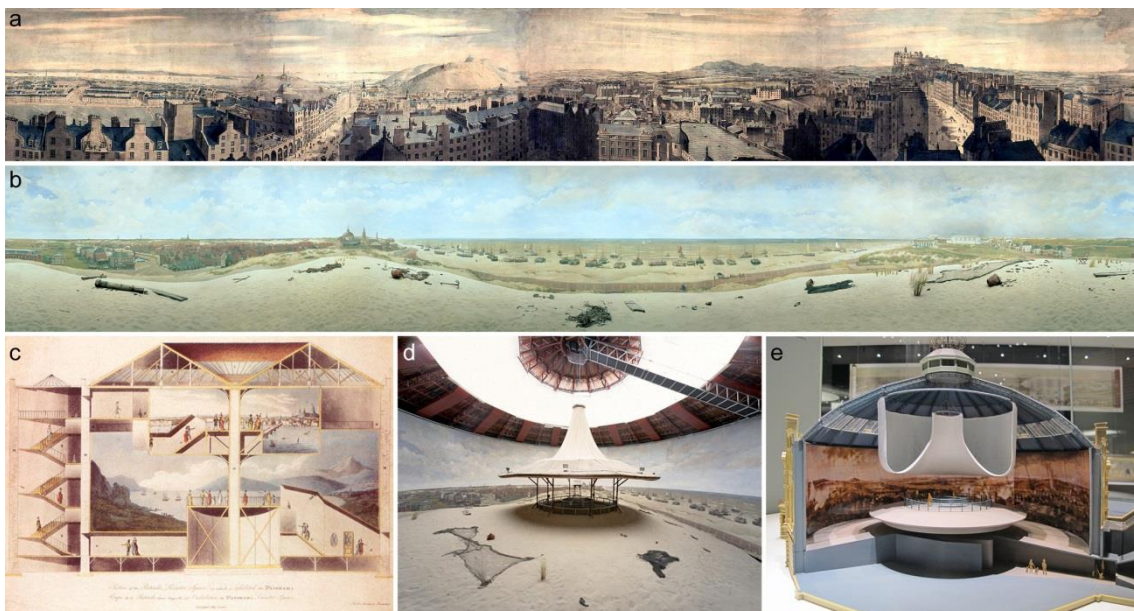


Fig. 6.19. (a) Robert Barker, 1792, Panorama de Edimburgo. (b) Hendrik Willem Mesdag, 1881, Panorama Mesdag, La Haya. (c) Sección del panorama de Robert Barker en Leicester Square. Dibujo del arquitecto Robert Mitchell, ca. 1793. (d) Interior del panorama Mesdag. (e) Maqueta de un panorama en Frankfurt, fotografía de I. Saïlko

El primer panorama fue realizado por Robert Barker en 1792 (Fig.14), durante el siglo XIX se construyeron cientos de edificios dedicados a albergar los panoramas en las principales ciudades mundiales. En España, el primero fue construido en Cádiz en 1845.

Actualmente, casi todos han desaparecido y algunas pinturas han podido ser trasladadas a museos, sin embargo, el panorama Mesdag, de 1881, todavía se conserva en su emplazamiento original en la Haya. Se trata de uno de los más grandes con 38 metros de diámetro (120 m. de desarrollo) y 14 de altura (Fig.14).

6.5. Las anamorfosis contemporáneas

Las anamorfosis fueron utilizadas en decorados teatrales y cinematográficos antes de la llegada de los efectos especiales. Un magnífico ejemplo de anamorfosis escenográfica lo podemos encontrar en la Sala Mae West del Museo Dalí de Figueras, realizada en 1975, fruto de la colaboración entre Salvador Dalí y Oscar Tusquets. La obra ofrece una interpretación espacial del retrato de Mae West de Dalí. La Fig. 6.20 compara el cuadro original y la sala, fotografiada desde el punto de vista apropiado, e incluye algunos dibujos de Oscar Tusquets donde se definen los elementos escenográficos de la anamorfosis, proyectando desde el punto de vista los elementos singulares del cuadro sobre la sala.

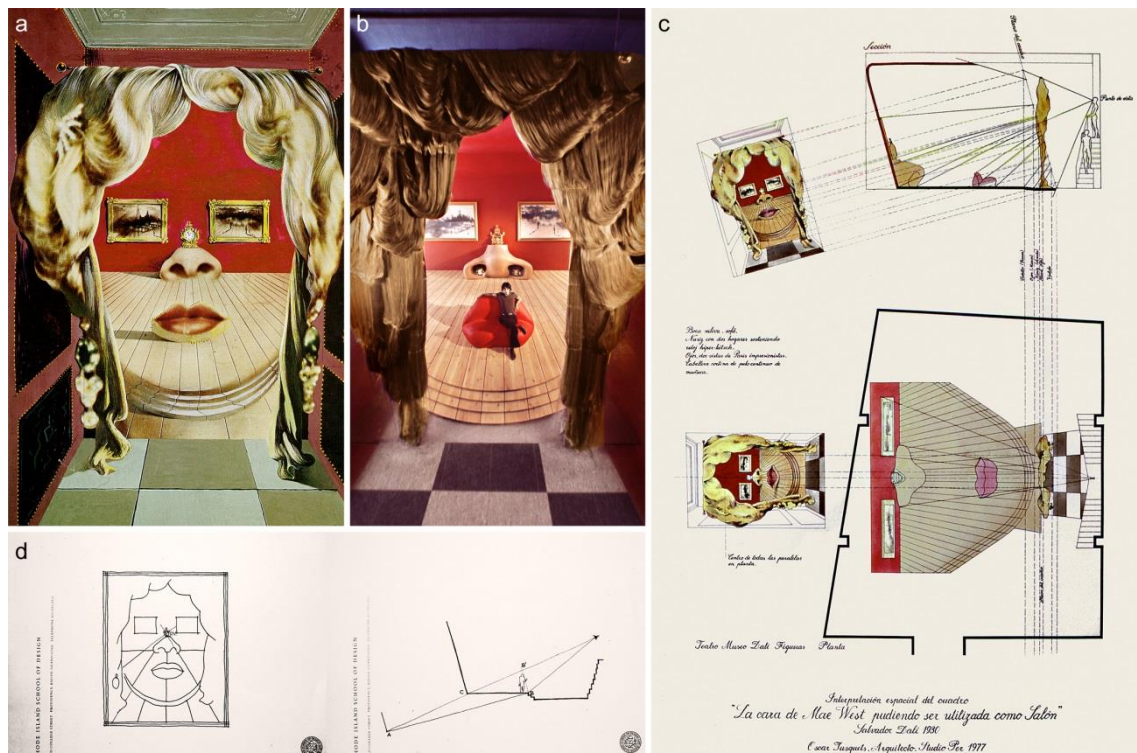


Fig. 6.20. (a) Salvador Dalí, 1936, La cara de Mae West..., Instituto de arte de Chicago. (b) Oscar Tusquets en la sala Mae West. (c) Dibujos de Oscar Tusquets para definir la anamorfosis (d) Bocetos iniciales para situar el punto de vista

Algunos pintores muralistas se han especializado en los trampantojos de temas arquitectónicos, ejemplo de ello lo tenemos en los edificios pintados por Richard Haas (Fig. 6.21) y también en los murales del artista John Pugh, caracterizados por un realismo y una calidad técnica encomiable (Fig. 6.22).

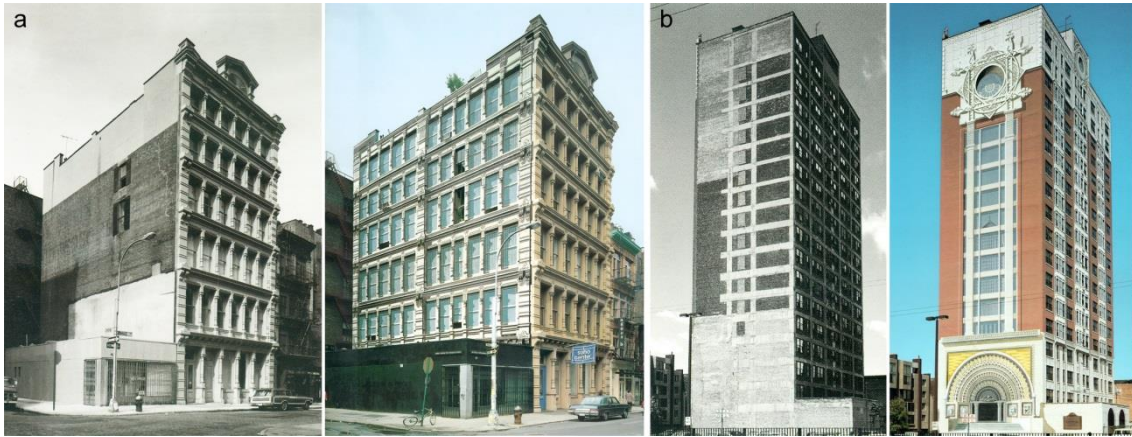


Fig. 6.21. Richard Haas, (a) 1975, Mural en Prince Street, Nueva York. (b) 1980, Homage to the Chicago School, Chicago. (Haas, 2001)



Fig. 6.22. John Pugh, (a) 1996, Mural en el café expreso, San José, California. (b) 1986, Siete punto uno, Los gatos, California. (c) 1980, Academe, Chico State University, California

Otro artista cuya obra se caracteriza por el empleo de la anamorfosis es Felice Varini, con un concepto muy original, que se basa en superponer una serie de figuras

geométricas sencillas sobre un escenario real, ya sea un espacio interior o un paisaje abierto de grandes proporciones, lo que confiere a la obra de Varini una dificultad considerable (Fig. 6.23).

Artistas callejeros como Julian Beever, Edgar Mueller o Kurt Wenner, prefieren utilizar el suelo como lienzo, sus dibujos de carácter distendido revelan un gran dominio técnico (Fig. 6.24).

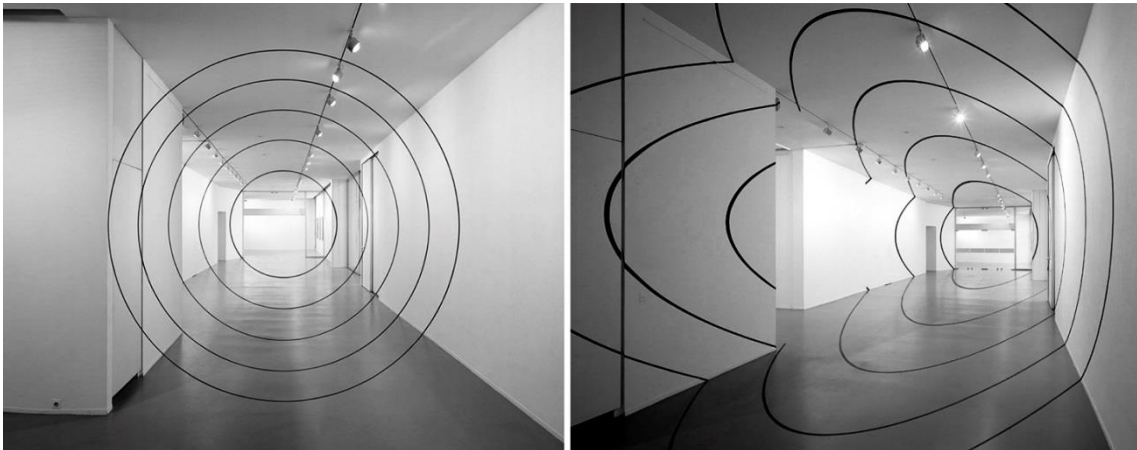


Fig. 6.23. Felice Varini, 1993, Cinq cercles concentriques, noir



Fig. 6.24. (a) Julian Beever, Snail (b) Edgar Mueller, 2008, Lava Burst, Geldern, Alemania (c) Kurt Wenner, 2008, Gluttony, Palazzo Te, Mantua

En el arte *underground* también podemos encontrar ejemplos como los del enigmático artista Banksy, cuyos grafitis de crítica social ofrecen una versión minimalista de la anamorfosis, aunque no por ello resultan menos impactantes (Fig. 6.25).



Fig. 6.25. Banksy, (a) 2006, Maid, Londres (b) 2009, No ball games, Londres (c) 2013, The Street is in play, Nueva York

En el mundo de la publicidad también hallamos ejemplos en el uso de la anamorfosis, como los anuncios colocados sobre el césped de los campos de fútbol. Algunos publicistas, conscientes del interés que despiertan este tipo de ilusiones, realizan propuestas publicitarias anamórficas, como en los premios *Rhino Rolling advertising award*, destinados a la publicidad sobre vehículos de transporte (Fig. 6.26) o como en algunos spots publicitarios recientes³.

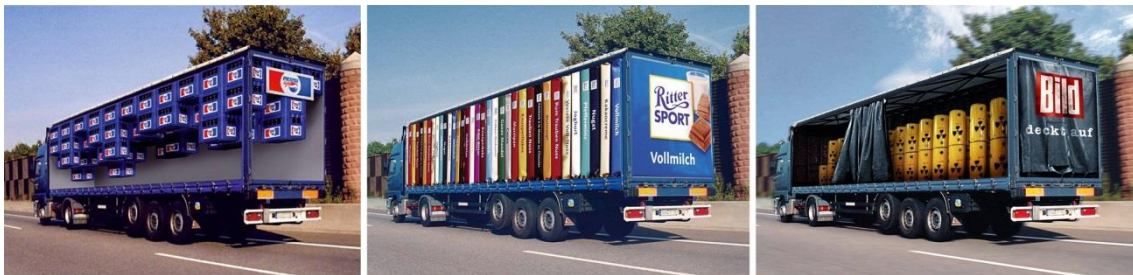


Fig. 6.26. Propuestas publicitarias presentadas en los Rhino Rolling advertising awards, celebrados desde 2005

Al margen de la pintura, se pueden conseguir anamorfosis a partir de fotografías⁴, realizando una transformación proyectiva. La Fig. 6.27 describe la anamorfosis de una maqueta de la silla roja y azul de Rietveld, obtenida mediante la ortorectificación de una fotografía, realizada desde el mismo punto de vista que la Fig. 6.27b.

Los avances técnicos permiten otras formas de crear anamorfosis, las aplicaciones de realidad virtual, entornos CAVE y realidad aumentada, utilizan los mismos principios. También las novedosas técnicas de video mapping para proyectar imágenes sobre edificios son todo un ejemplo de trampantojo en movimiento que, combinado con la música y los efectos de sonido, constituyen todo un espectáculo⁵ (Fig. 6.28).

³ Spot publicitario de Honda: <http://www.youtube.com/watch?v=A9G-cwylC1E>

⁴ Otros ejemplos de fotografía anamórfica: <http://www.youtube.com/watch?v=tBNHPk-Lnkk>

⁵ <http://vimeo.com/5595869>

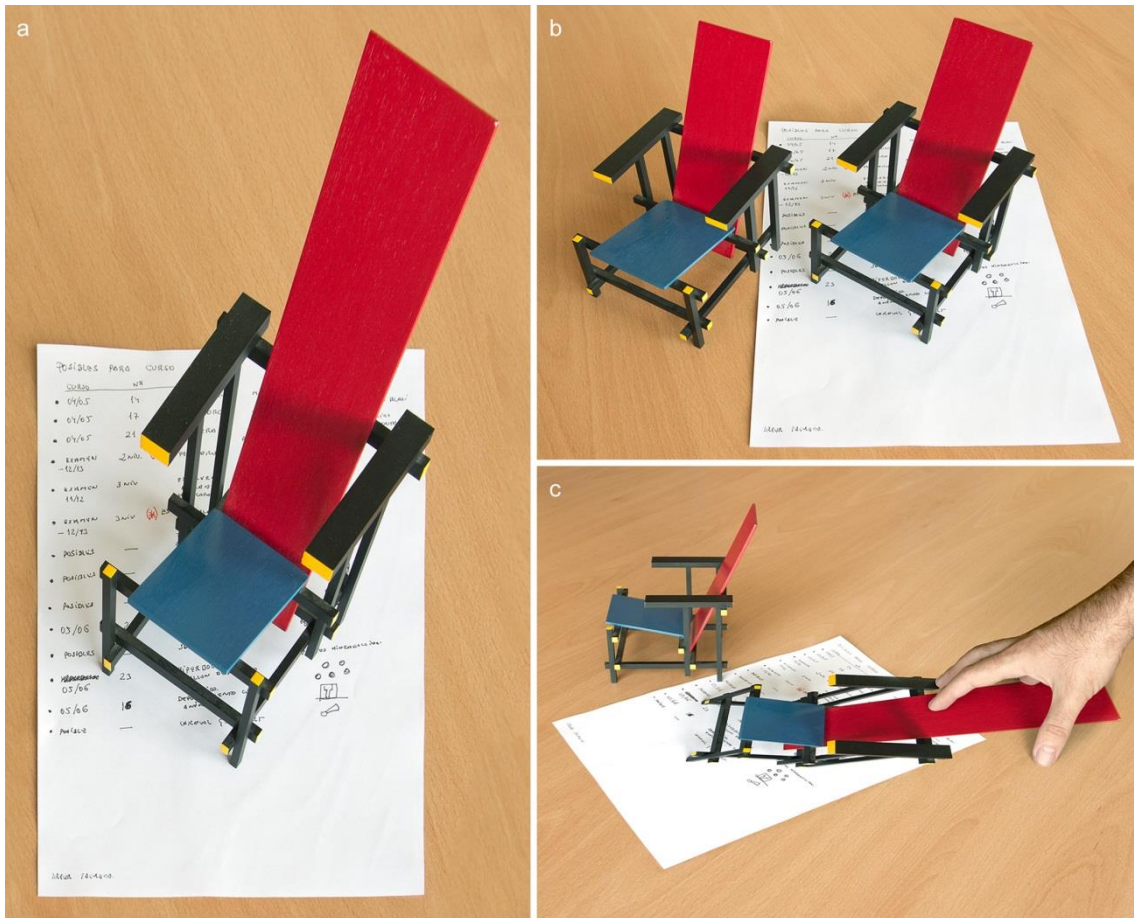


Fig. 6.27. Anamorfosis plana a partir de la ortorectificación de una fotografía. (b) Vistos desde la posición adecuada, el modelo real y la anamorfosis plana son indistinguibles. (c) Otro punto de vista. Pedro Cabezos

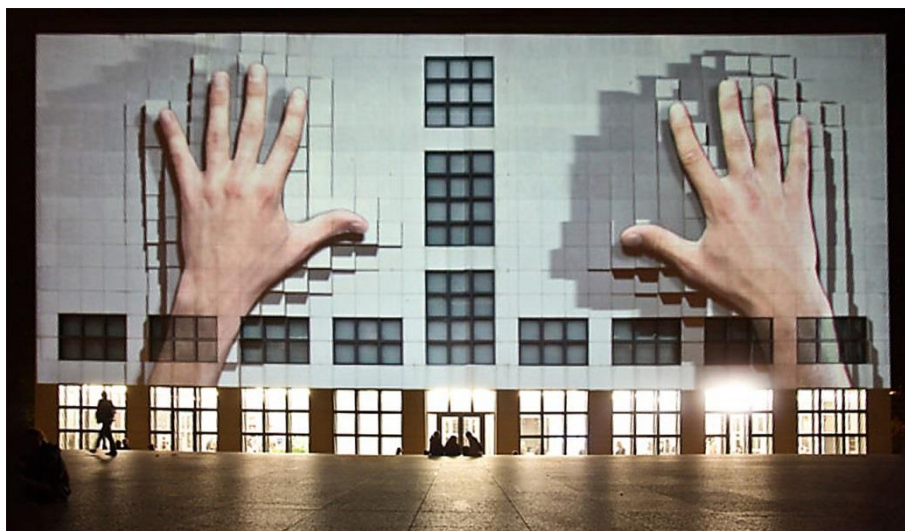


Fig. 6.28. Urban Screen, 2009, 555 Kubik, Video Mapping sobre la fachada de la Galería Contemporánea del arquitecto O. M. Ungers, Hamburgo

Las anamorfosis catóptricas son menos frecuentes, pero podemos encontrar excelentes ejemplos, como los del artista István Orosz, cuyos grabados tienen una doble lectura dependiendo de si se ven reflejadas o no (Fig. 6.29).

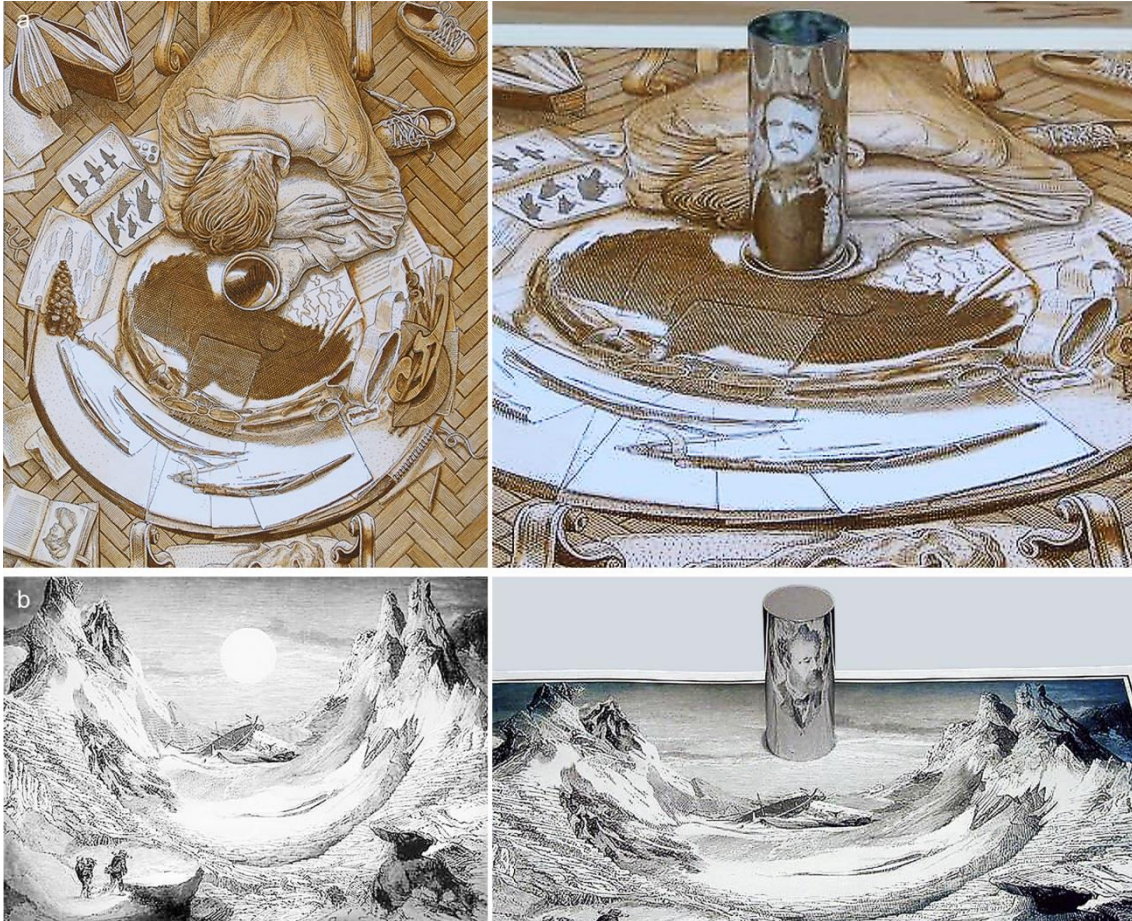


Fig. 6.29. István Orosz, (a) 2007, *Retrato anamórfico de Edgar Allan Poe*. (b) 1983, *Retrato anamórfico de Julio Verne*.

6.6. Anamorfosis estereoscópica

Tradicionalmente los artistas siempre han trabajado considerando un punto de vista único, obviando el hecho de que poseemos visión binocular, pero podemos combinar las técnicas estereoscópicas con las anamorfosis, para conseguir mejorar la sensación de relieve y perfeccionar la ilusión óptica.


Las primeras anamorfosis estereoscópicas fueron realizadas por M. Richard y publicadas en Vuibert (1912). Estas imágenes tenían una finalidad didáctica: mostrar, de manera más eficiente, las diversas formas geométricas, lo que resultó ser idóneo para la divulgación de la Geometría Descriptiva. Richard combinaba dos anamorfosis planas, una para cada ojo, y usaba el método de los anaglifos como medio de visualización.

Los dibujos estaban preparados para contemplarse oblicuamente en una posición de lectura natural, como la que se adopta cuando el lector permanece sentado frente al libro que permanece apoyado en posición horizontal sobre la mesa. El efecto de relieve que se consigue al contemplar este tipo de anamorfosis suele ser muy intenso, las figuras parecen sobresalir o adentrarse en el papel, en dirección ortogonal a éste.

Las dificultades técnicas que conlleva la realización de este tipo de anamorfosis ha provocado que los ejemplos sean bastantes escasos y se encuentren principalmente en algunos libros de geometría descriptiva como Herrera (1920), Taibo (1943), Pal (1959), Pérez (1968) y Schmidt (1977), obras que por su interés tendremos ocasión de analizar posteriormente.

La anamorfosis estereoscópica es conocida en los círculos de la estereoscopía amateur con el nombre de fantograma, traducido del inglés *phantogram* (imagen fantasma), término que prefiero no emplear ya que, en mi opinión, resulta poco riguroso.

Aunque la concretización técnica de estas anamorfosis se verá en los siguientes capítulos. A continuación, se muestra un ejemplo de anamorfosis estereoscópica de un modelo arquitectónico, en el que se podrá comprobar que la profundidad de la escena se percibe en dirección ortogonal al papel y que algunos elementos parecerán sobresalir del papel, mientras que otros parecerán adentrarse en él.

El símbolo  que aparece en el pie de página, indica al lector que la figura debe ser contemplada usando las gafas de filtro de color y situando la revista sobre la mesa, en posición horizontal, observando con un ángulo de 45° y a una distancia de aproximadamente 45cm, tal como se explica al comienzo de la tesis.

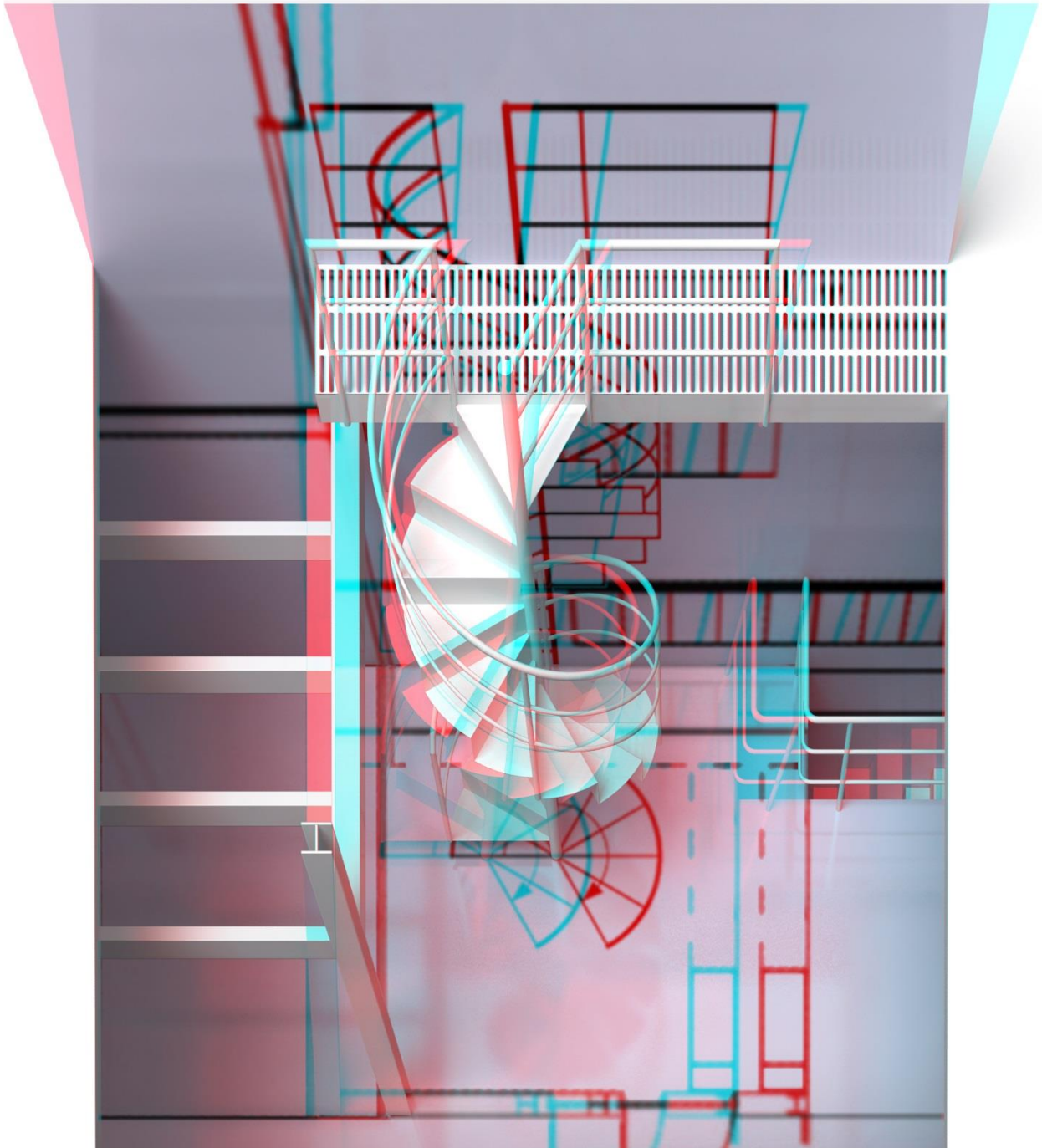


Fig. 6.30. Escalera de caracol diseñada por Sugiura Office para la Casa "H", Japón. Pedro Cabezos



7. LA ESTEREOSCOPIA

Se entiende por estereoscopia el conjunto de técnicas que permiten evocar en el espectador la sensación de profundidad producida principalmente por la disparidad retinal, presentando ante los ojos dos imágenes ligeramente diferentes, denominadas par estereoscópico, que son mostradas de forma independiente cada una al ojo que le corresponde.

La estereoscopia debe su nombre al estereoscopio creado por Sir Charles Wheatstone que, gracias a su sistema de espejos, permitía observar el par estereoscópico. Tal como se mencionó en los antecedentes históricos, Wheatstone (1938) ofrece una descripción completa del estereoscopio (Fig. 7.1) y establece los fundamentos teóricos que permiten recrear el efecto estereoscópico.

7.1. El estereoscopio reflector de Wheatstone

El estereoscopio consta de dos espejos A' y A , que se sitúan con un ángulo de 45 grados con respecto a los ojos del espectador, para reflejar las imágenes del par estereoscópico, que se fijan en los paneles deslizantes E' y E . Estos paneles, además de permitir un deslizamiento hacia adelante o hacia atrás con respecto al observador, también pueden desplazarse lateralmente y en dirección opuesta, con la ayuda de un usillo doble l y r , con el fin de que la imagen reflejada se aproxime o se aleje de los ojos del espectador.

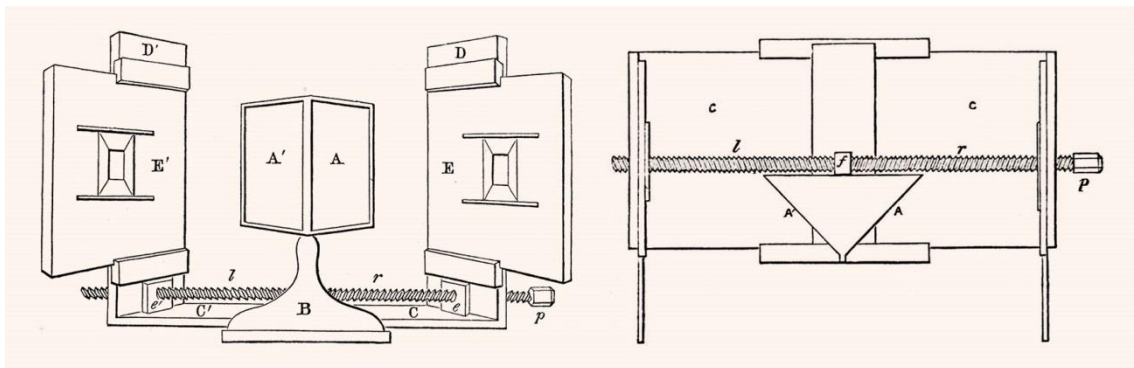


Fig. 7.1. Estereoscopio de Wheatstone, perspectiva frontal (izda.) y esquema en planta (dcha.). (Wheatstone, 1838)

El objetivo principal de la estereoscopia, que resume las teorías enunciadas por Wheatstone, es conseguir reproducir en las retinas del espectador las mismas imágenes que produciría una escena tridimensional, mediante dos proyecciones cónicas de esa misma escena que constituyen un par estereoscópico, que deberán reproducir las mismas claves de profundidad, tanto monoculares como binoculares. Con ello se logrará evocar en la mente del espectador, la propia escena tridimensional.

Esta idea tan sencilla entraña respetar una serie de parámetros, no tan sencillos, cuya variación abre un abanico de posibilidades perceptivas, siempre dentro de los límites que impone nuestro sistema visual, de ahí la extrema importancia de conocer su

funcionamiento. Wheatstone realiza interesantes reflexiones acerca de cómo un correcto ajuste de las imágenes en el estereoscopio causa una percepción inmediata del relieve, cuando se reproduce la situación de convergencia ocular natural, mientras que si la convergencia es algo forzada o antinatural, se producirá un retraso o dificultad en la percepción del efecto estereoscópico, llegando incluso a ocurrir que el espectador no llegue a fusionar las imágenes del par estereoscópico y se produzca diplopía. Wheatstone también describe el fenómeno de la pseudoscopia o efecto de relieve invertido que se produce cuando se permutan las imágenes que componen el par.

Podemos decir que el trabajo que se realiza en estereoscopia comprende dos fases íntimamente relacionadas, por un lado, han de definirse las condiciones de visionado y, por otro lado, deben ajustarse los parámetros para la creación del par estereoscópico, en concordancia con las primeras.

7.2. Condiciones de visionado. La ventana estereoscópica

En la actualidad existen diversas técnicas para visionar el par estereoscópico, tal como veremos más adelante, pero en todas ellas suele haber un sistema óptico que muestra separadamente a cada ojo la imagen correspondiente del par estereoscópico, que se reproduce habitualmente sobre una superficie plana, ya sea una pantalla o el medio impreso. Esta superficie suele tener forma rectangular, con un tamaño y distancia determinada con respecto al observador y constituye la denominada ventana estereoscópica que acota el espacio volumétrico donde se produce la percepción del relieve de la escena. Este volumen es la intersección de las pirámides visuales definidas por la posición de los ojos y la ventana estereoscópica, que se ha representado en color magenta claro en la Fig. 7.2.

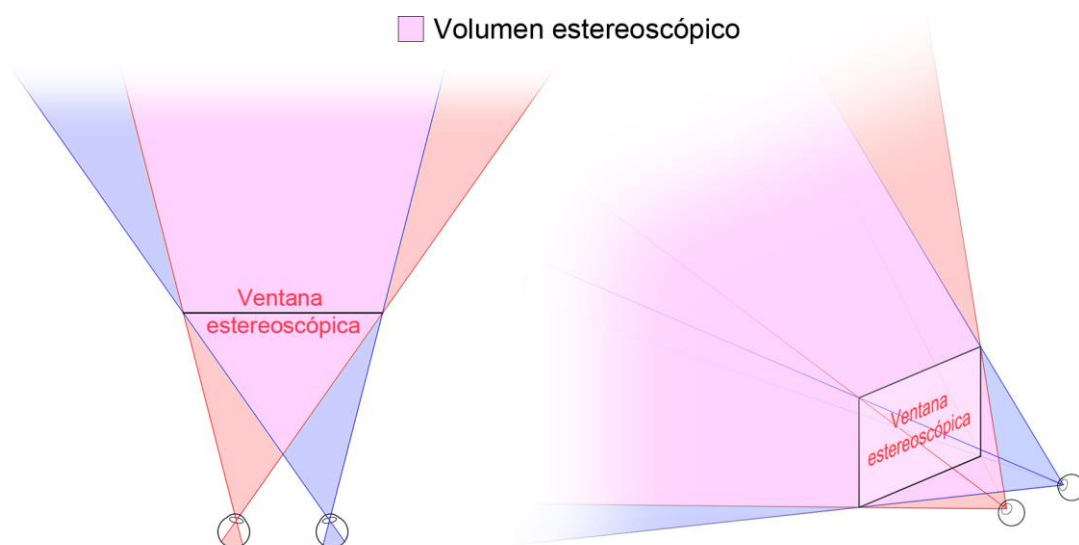


Fig. 7.2. La ventana estereoscópica delimita el espacio o volumen estereoscópico donde se percibirá la escena. Pedro Cabezos

Aunque pudiera parecer que este volumen se extiende hasta el infinito, en realidad no siempre es así, puesto que los límites de fusión impuestos por las áreas de Panum de la retina, descritas en el capítulo del sistema visual, junto con otras limitaciones que veremos posteriormente, acotarán este espacio tanto por delante como por detrás de la ventana estereoscópica.

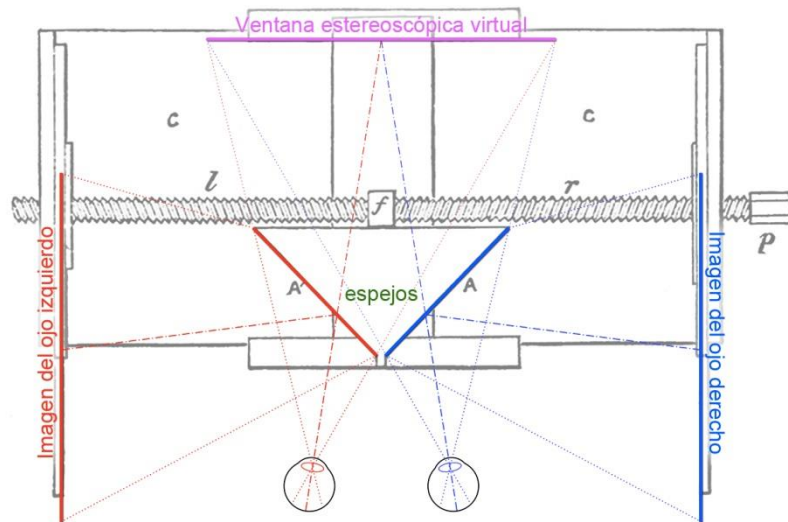


Fig. 7.3. Ventana estereoscópica virtual percibida en el estereoscopio de Wheatstone. Pedro Cabezos

Wheatstone menciona que, para conseguir una percepción natural del relieve, el par estereoscópico debe realizarse de tal manera que se reproduzcan las condiciones de convergencia ocular y distancia relativa al objeto que se dan en el estereoscopio (Fig. 7.3), diciendo al respecto:

“...las imágenes se fusionan con diferentes posiciones de los paneles, en consecuencia, con distintas inclinaciones de los ejes ópticos, pero sólo hay una posición dónde las imágenes se fusionaran instantáneamente, debido a un ajuste correcto que no fatiga los ojos, ya que, sólo en esta posición, se mantienen las relaciones naturales entre, el tamaño de las imágenes en la retina, la inclinación de los ejes ópticos y la distancia de acomodación del ojo...”

(Wheatstone, 1838:375) (fragmento traducido)

La importancia de definir o conocer de antemano el tamaño y la posición de la ventana estereoscópica en relación al espectador, se debe a que estos parámetros condicionan el proceso de obtención de las imágenes que configuran el par estereoscópico.

7.3. El par estereoscópico

Tal como ya hemos mencionado, el par estereoscópico debe estar compuesto por dos imágenes que reproduzcan en las retinas las mismas claves de profundidad que la escena tridimensional que se pretende recrear. En principio, bastaría con que estas imágenes simularan las claves de disparidad retinal, ya vimos como en los estereogramas de puntos aleatorios sólo hay claves de este tipo, sin embargo, la calidad de efecto estereoscópico aumenta si se aportan más claves de profundidad. En este sentido, las claves pictóricas como la perspectiva y los efectos de iluminación juegan un papel muy importante.

7.3.1. Los dibujos estereoscópicos

Los primeros pares estereoscópicos fueron encargados por Wheatstone a un dibujante. Se trataba de dibujos en perspectiva cónica de formas geométricas sencillas, que reproducían las claves de disparidad y perspectiva (Fig. 7.4). Wheatstone quiso que estos dibujos fueran lineales, omitiendo deliberadamente los efectos de iluminación con el fin de que quedara patente que el efecto de relieve no era causado por otra cosa que no fuera la disparidad de las imágenes.

Los dibujos tenían que realizarse en perspectiva cónica y los puntos de vista debían coincidir con la posición de los ojos en el estereoscopio, es decir, se habían de separar horizontalmente una distancia equivalente a la de los ojos (2.5 pulgadas ó 6.35 cm), mientras que los rayos principales de las perspectivas deberían converger con el mismo ángulo que en el estereoscopio.

Sin embargo aquí se produce una incongruencia entre lo que Wheatstone dice y lo que se hace en los dibujos, puesto que se puede deducir que los rayos principales en los pares estereoscópicos que presenta Wheatstone son paralelos y no convergentes como él plantea. Esto lo podemos observar claramente si apreciamos como en todos los pares mostrados en la Fig. 7.4, las caras frontales al plano del cuadro, conservan siempre su verdadera proporción, lo que denota que los rayos principales de ambas perspectivas son paralelos. Al no saber las dimensiones reales de las figuras representadas no podemos determinar la posición del plano de cuadro, pero parece lógico pensar que el dibujante hubiera situado los planos del cuadro a la misma distancia que hay entre los paneles del estereoscopio y el observador.

Esto resulta muy interesante puesto que Wheatstone debía ser consciente de este detalle en el que no quiso entrar por no complicar aún más sus razonamientos, pero con ello se demuestra que el método de obtener el par mediante ejes paralelos es adecuado y que el efecto de convergencia ocular se consigue al deslizar lateralmente los paneles en el estereoscopio. Más adelante entraremos en el dilema de converger o no los ejes, tema que hoy en día sigue suscitando cierta polémica.

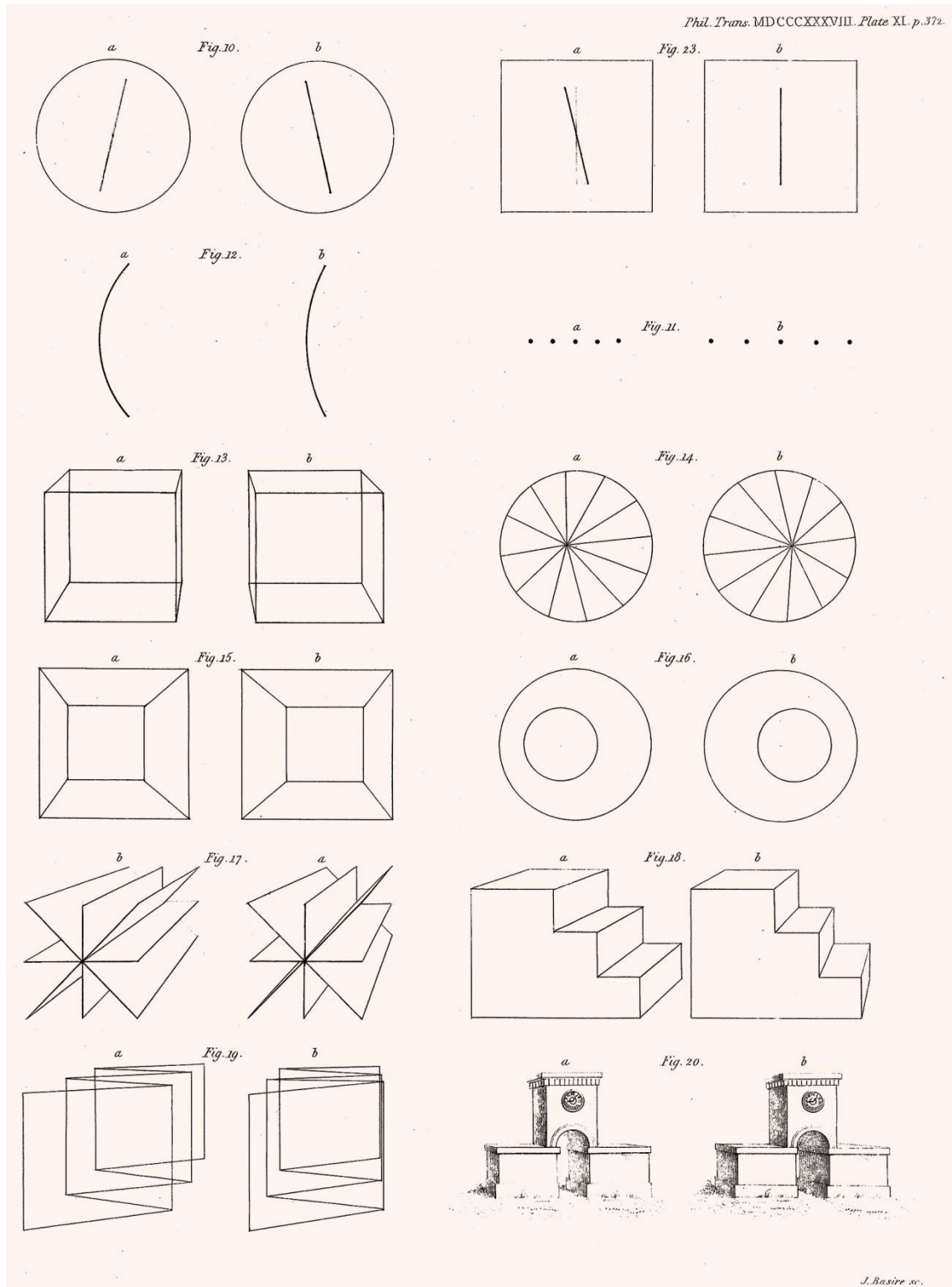


Fig. 7.4. Primeros dibujos estereoscópicos (Wheatstone, 1838)

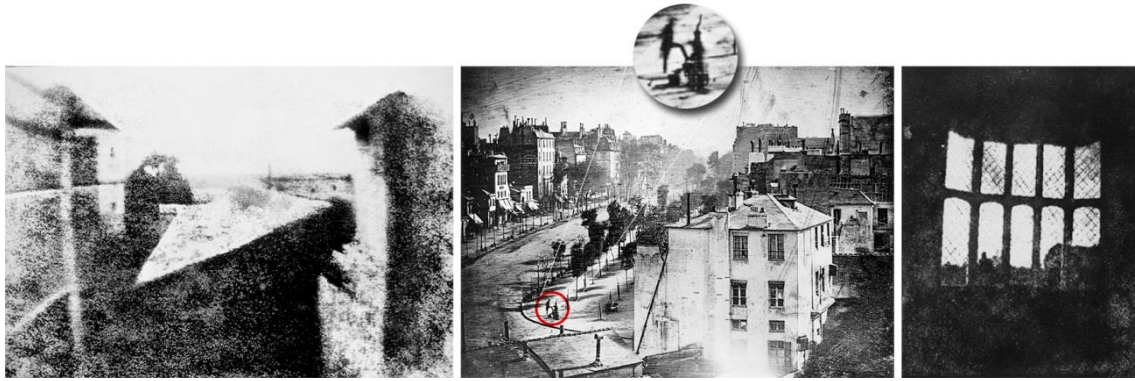


Fig. 7.5. Joseph Nicéphore Niépce, 1826, Vista desde la ventana en Le Gras, Heliografía (izda.)⁶
 Louis Daguerre, 1838, Boulevard du Temple, París, Daguerrotipo (centro)⁷
 William Henry Fox Talbot, 1835, Vista de una celosía, Lacock, Wiltshire (dcha.)⁸

7.3.2. La invención de la fotografía y su aplicación a la estereoscopia

Los estudios acerca de la fotografía realizados por Nicéphore Niepce y perfeccionados por Louis Daguerre, que habían estado fraguándose al mismo tiempo que los de Wheatstone, son desvelados oficialmente el 19 de agosto de 1839 en la Academia de las Ciencias de París. El Estado francés compra la patente y regala la fotografía a la humanidad, por lo que la práctica de la fotografía queda liberada en todo el mundo, excepto en Gran Bretaña, donde Daguerre había patentado previamente su invento.

La fotografía se convierte desde un primer momento en un medio idóneo para generar pares estereoscópicos. En 1852, Wheatstone publica la segunda parte de su artículo y en ella relata cómo el mismísimo Fox Talbot, padre del proceso fotográfico denominado Calotipo o Talbotipo, y el fotógrafo Henry Collen, le habían aportado calotipos estereoscópicos de edificios, estatuas e incluso retratos de personas. Hippolyte Fizeau y Antoine Claudet le proporcionaron los primeros daguerrotipos realizados para el estereoscopio, alguno de los cuales fue ya mostrado en la introducción histórica. Wheatstone debió proporcionar a estos fotógrafos algunas directrices técnicas para la obtención del par, como las que incluye en su segundo artículo que analizaremos más adelante.

El estereoscopio refractor de Wheatstone es muy versátil, desde un punto de vista experimental y científico, pero es poco práctico por sus dimensiones y ajustes para el público en general. Para que la estereoscopia empezara a llegar a las masas fue necesario un nuevo modelo de estereoscopio más ligero, sencillo y económico.

⁶ Primera fotografía del natural que se conserva. Tiempo de exposición 8 horas aproximadamente

⁷ Considerada como la primera fotografía en la que aparecen personas, aparece un niño abrigando el calzado de un caballero (Rice, 1999). Tiempo de exposición alrededor de 10 minutos

⁸ El Talbotipo o Calotipo, de Talbot, se convertiría en el antecesor de la película negativa fotográfica



Fig. 7.6. Antoine François Jean Claudet, 1851, *Lecciones de geografía*, Daguerrotipo estereoscópico



7.4. El estereoscopio de Brewster y Holmes. La popularización de la estereoscopia

Aparte del estereoscopio reflector, Wheatstone había diseñado conjuntamente un estereoscopio de lentes refractoras con el que había estado experimentando desde 1832, pero Sir David Brewster realiza un diseño mejorado de este estereoscopio que utilizaba lentes lenticulares en lugar de prismas. Aunque ambos son estereoscopios refractores, Brewster denominó al suyo estereoscopio lenticular para diferenciarlo claramente del de Wheatstone (Fig. 7.7).

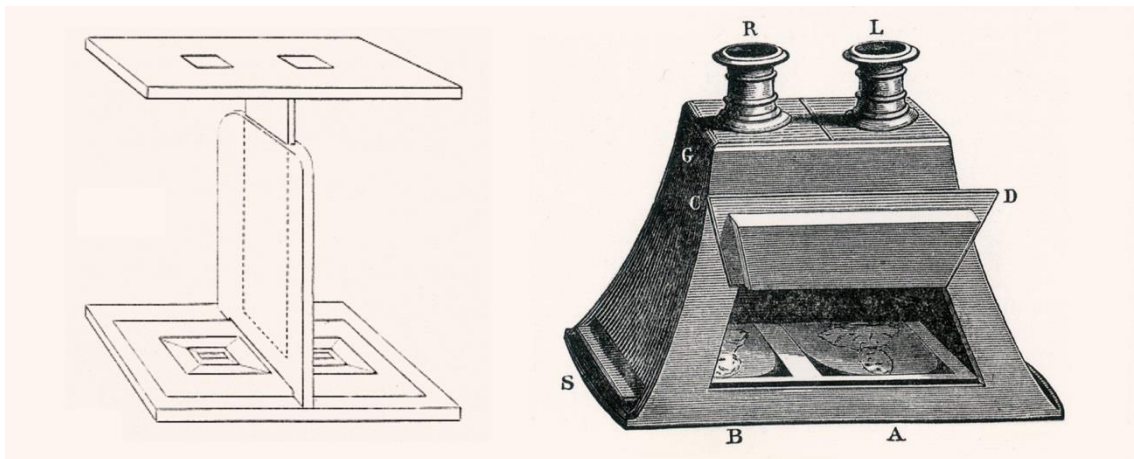


Fig. 7.7. Estereoscopio refractor de Wheatstone (Wheatstone, 1852) (Izda.). Estereoscopio lenticular de Brewster (Brewster, 1856) (dcha.)

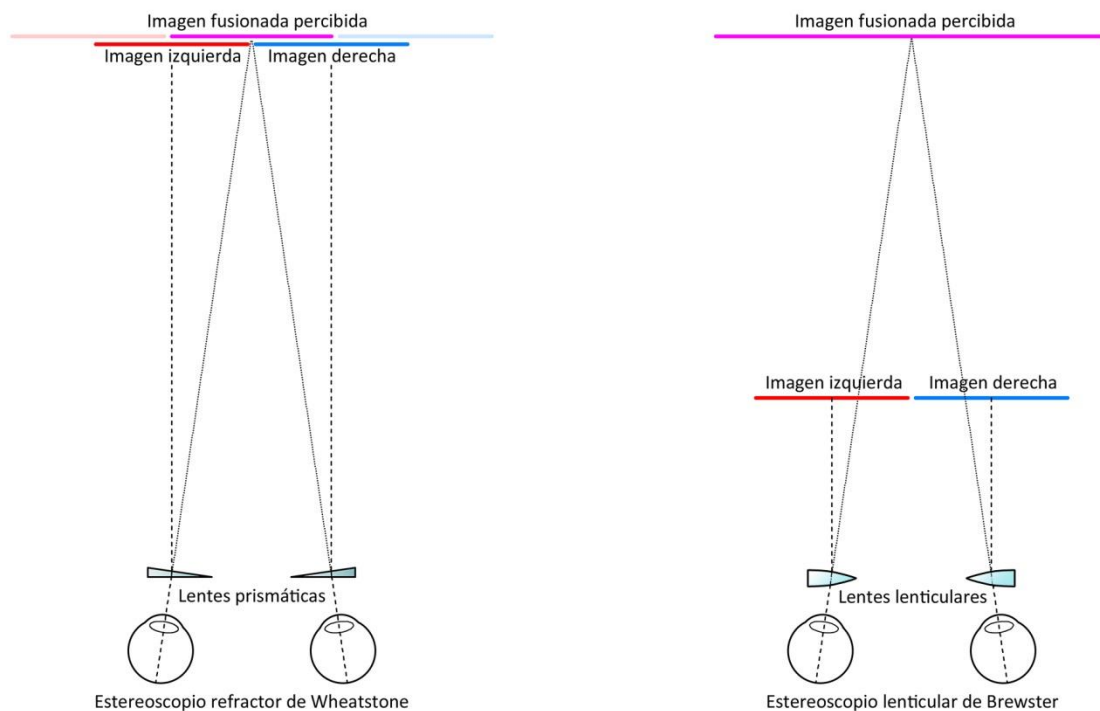


Fig. 7.8. Principio óptico de los estereoscopios refractores de Wheatstone y Brewster. Pedro Cabezos

La Fig. 7.8 describe los principios ópticos de ambos estereoscopios refractores. El de Wheatstone no amplifica el tamaño de las imágenes sino que únicamente produce el efecto de convergencia, para facilitar la fusión de las imágenes. La barrera intermedia sirve para ocultar a los ojos aquella imagen que no le corresponde, para evitar la formación de imágenes residuales a ambos lados de la imagen fusionada. El estereoscopio de Brewster amplifica las imágenes y produce la convergencia al mismo tiempo, lo que permite reducir también su longitud, ya que las imágenes pueden situarse muy próximas a los ojos.

David Brewster presentó en 1849 su prototipo de estereoscopio ante la *British Association* de Londres y la de Birmingham, que había sido fabricado por Andrew Ross (Gernsheim, 1988:62). También envió otros ejemplares, fabricados por el óptico George Loudon (Brewster, 1856:28-29), a miembros de la nobleza de Londres y otras ciudades, pero no logró que los ópticos londinenses se interesaran por su fabricación en serie. Por este motivo viajó a Francia y lo mostró al abate Moigno, persona muy relevante en el entorno cultural parisino, editor de la revista científica *Cosmos*, quien fascinado por la invención de Brewster le puso en contacto con los fabricantes de instrumentos de óptica franceses Dubosc y Soleil, quienes desde un primer momento apreciaron las posibilidades comerciales del aparato e iniciaron su fabricación en serie.



Fig. 7.9 Grabado de un estereoscopio tipo Brewster (Drouin, 1894). Fotografía de estereoscopio tipo Brewster ca. 1860

El estereoscopio fue presentado en la exposición universal de Londres de 1851, posiblemente acompañado de pares estereoscópicos compuestos por dibujos geométricos y también por daguerrotipos estereoscópicos que podrían haber sido realizados por el propio Dubosc o también realizados por encargo de éste al fotógrafo Claude-Marie Ferrier, quien acabaría especializándose en fotografía estereoscópica.



Fig. 7.10. Retrato de Sir David Brewster junto a su estereoscopio, ca. 1860, Calotipo estereoscópico publicado por la *London Stereoscopic Company*. Adaptado de Wing (1996)



JAN. 24, 1852.]

THE ILLUSTRATED LONDON NEWS.

77

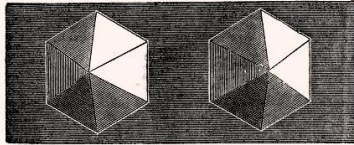
THE STEREOSCOPE, PSEUDOSCOPE, AND SOLID DAGUERREOTYPES.

The present day fortunately so abounds in invention, that, no matter how unexpected or curious a discovery may be, it scarce excites any wonder. Tell people that you can brew lightning in a little crock, and send it for hundreds of miles over land and under sea, they don't quite believe you until they have had a message between London and Paris answered; and then they take the whole matter quietly for granted as a thing of course, and go home and think no more about it. Announce that an engraving showing every detail of an interior of the Exhibition was engraved from a picture taken in ten ticks of a watch, people smile and look incredulous; but let them stay, watch in hand, and count the seconds whilst the daguerrotype camera window is open, then show them the picture, and let them on the spot look from it to the reality until they have recognised every minutest particular, they will begin to speculate how cheap should be the picture so instantaneously produced; and with the fact before them, and no cabalistic flourishes or witchcraft dings in the matter, all wonder ceases. True, where discovery cannot so plainly produce its proof, ignorance and presumption, incapacity and unbelief, still find refuge enough for boastful sneers against labourers in the hidden mines of fact and truth. We have not yet reached the period when all men shall be content to bear announced discoveries however strange with patience, or else

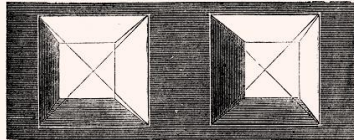


BUSTS, SHEWING THE TRIFLING DIFFERENCE IN PERSPECTIVE NECESSARY TO PRODUCE SOLIDITY.

In Germany the subject excited still more interest; it was at once eagerly taken up. The new light thrown upon the subject of double vision engaged the most able physiologists and metaphysicians—Bruecke, Volkman, Morer, Fourtural; and in Geneva, H. Prevost wrote upon the subject. In the commencement of 1839, the photographic art, upon which Niepce, Talbot, and Daguerre had long been at work, was announced; and Mr. Talbot and Mr. Collen, in the same year, at Mr. Wheatstone's request, prepared photographs of full-sized statues, buildings, and portraits, for the Stereoscope. Mr. Wheatstone's diagrams were proof that small drawings may be made to represent under the stereoscope the complete effect of reality. Two miniatures might be painted, each with one eye, if the artist could attain sufficient accuracy, which, seen by the stereoscope, would be seen as one, and round as life. But these were only illustrations of an important addition to science. A new step was gained in explanation of the phenomenon of sight. It was clear that the inner eye (if we may use the phrase) was furnished with two outer eyes, not merely for the uniformity of the face, nor to puzzle philosophers, but to present an instantaneous perfect vision of the form and position of objects. The one eye, in fact, seeing round one side, the other eye round the other side, and the inner eye having thus brought before it in one and in full solidity the whole object. The form of the Stereoscope, as originally produced by Professor Wheatstone, and which he called the reflecting Stereoscope, is shown in our Engraving



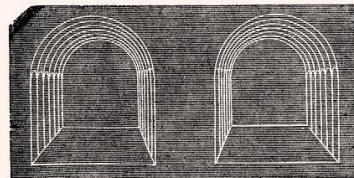
HEXAGONAL PYRAMID.



FRUSTUM OF SQUARE PYRAMID.



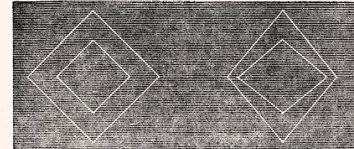
FRUSTUM OF CONE.



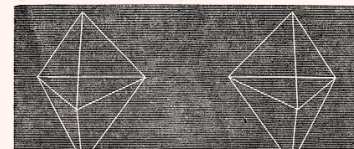
IRON TRELLIS-WORK.



HEXAGONAL PRISM OF EMERALD FROM PERU.

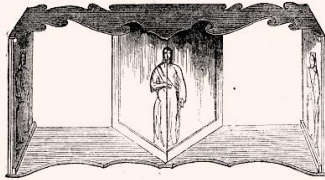


TWO INTERSECTING PLANES.



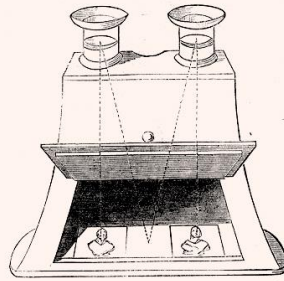
DOUBLE TETRAHEDRON, THE SIDES BEING EQUILATERAL TRIANGLES.

shall lend their help to working out the truth, or grinding down, atom by atom, the falsehood or fallacy; but we have at all events passed the age when the cloven-foot of some evil spirit was looked for side by side with every step of progress that human intelligence attained. Time was, when it would have gone hard with any one who showed pictures of men and scenes that neither pencil-brush nor hand had touched; and if, in defence, it had been asserted that the sun itself had traced them, the tortures of the rack would have been had in requisition to force the inventor to confess himself a wizard, and to tell his terms of compact with the devil; and, even in our own time, though we have passed



REFLECTING STEREOSCOPE.

from the demonism, there is a lingering tendency to set down those who go exploring beyond the bounds of knowledge as madmen. Almost any one can find instances, but we are content to mention one which has connexion with our present subject. At the close of a lecture by M. Dumas, the well-known French chemist, a lady came to him in the lecture-room; she had a question of great moment to ask him. "Did he think it possible that the pictures seen in a camera could be caught and made permanent?" she was anxious to know what he, a man of science, thought on the subject. Her husband had been seized by the idea that he could fix these pictures; day and night he was haunted by the thought; she feared he might be mad. But if a philosopher like M. Dumas thought there was any probability in the notion, it would give her the belief that her husband might still be in his senses. Dumas assured her that, though he saw no way to fix the pictures, enough was known to prevent him from saying it was impossible and to make it matter worthy of enquiry. The lady's husband was Daguerre, the painter;



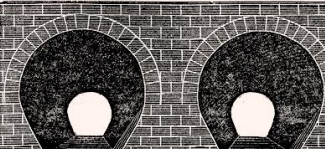
REFRACTING STEREOSCOPE.

and some ten years after this conversation with Dumas, he had solved his problem and taught the world how to make the sun itself fix as pictures everything it shone upon; and this discovery has now enabled us more completely to solve, not merely to the understanding, but to the actual sight of every one, the problem so long the puzzle of philosophers—the use of our two eyes, and how it comes that seeing with two eyes we still see but one of each object. The discovery, however, does more than clear up the scientific difficulty, it opens up a new field of entertainment and instruction, to which our Engravings will serve to introduce our readers. But first a word as to the discovery itself.

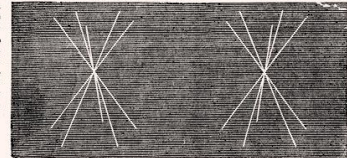
FIRST NOTICE OF THE STEREOSCOPE.

On the 21st of June, 1838, Professor Wheatstone read a paper at the Royal Society "on some previously unobserved phenomena of binocular vision" (sight with two eyes); in the course of which, he described an instrument invented by himself, by which two perspective diagrams of the same solid were seen at one view as completely solid as the object itself.

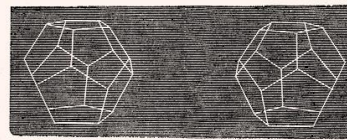
In 1839 Mr. Wheatstone brought his discovery before the British Association, at Newcastle, where it gave rise to a discussion of great interest, in which Sir D. Brewster and Whewell took part, and Sir John Herschel characterised the discovery "as one of the most curious and beautiful for its simplicity in the entire range of experimental optics."



RAILWAY TUNNEL.



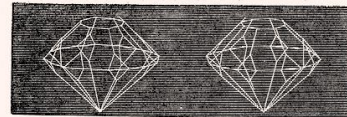
FIVE DIAGONALS OF THE REGULAR DODECAHEDRON.



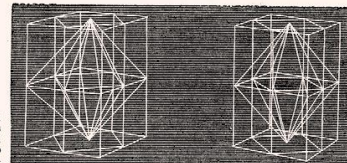
THE REGULAR DODECAHEDRON.



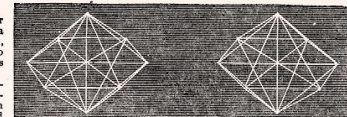
THE REGULAR TETRAHEDRON—THE FORM OF CRYSTALS OF COPPER, NICKEL, GOLD, ALUM, COMMON SALT, ARSENIUS ACID, FLUOR SPAR AND IRON PYrites.



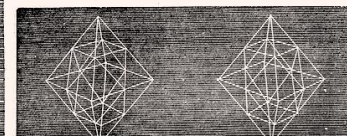
A CUT AMETHYST.



SQUARE PRISMS AND OCTAHEDRONS WITH SQUARE BASES.—CRYSTALS OF FERROCYANIDE OF POTASSIUM, BICHLORIDE OF MERCURY, IODOCRASE AND ANATASE.



BIPYRAMIDAL DODECAHEDRON.—NATURAL CRYSTAL OF AMETHYST.



DISSSECTION OF A CRYSTAL.

Fig. 7.11. Nota de prensa en el London News del 25 de enero de 1852, con ilustraciones del estereoscopio reflector y el refractor, además de numerosos pares geométricos

La temática de estas fotografías solía ser la de objetos inanimados como estatuas o naturalezas muertas (Fernández, 2004:30).

La Reina Victoria quedó impresionada por el estereoscopio en su visita a la exposición, Dubosc, a petición de Brewster y gozoso por el éxito, fabricó un ejemplar de lujo para la soberana, que le sería entregado por Brewster, antes de que finalizara la exposición (Brewster, 1856:31).

Tal como afirma Fernández (2004:30), esta anécdota se hace eco entre la sociedad británica y francesa, despertando un interés inusitado por el estereoscopio. Aprovechando la altísima demanda, otros fabricantes de óptica comenzaron también su fabricación y durante los tres meses siguientes a la exposición se vendieron cerca de un cuarto de millón de unidades entre Londres y París. Dubosc patentó el aparato en febrero de 1852, pero su patente quedó anulada en diciembre de 1857 por demostrarse que la invención era de Brewster (Gernsheim, 1988:64).

Aunque el estereoscopio de Brewster fue sin duda un gran avance en la difusión de la estereoscopia, seguía siendo un aparato bastante caro que sólo estaba al alcance de la burguesía. Sin embargo, en 1861 el médico y poeta norteamericano Olliver Wendell Holmes diseñó un estereoscopio refractor abierto muy económico, con una visera para evitar iluminación parásita y un mango para sustentarlo (Fig. 7.12). El diseño de Holmes, perfeccionado y patentado en 1867 por Joseph L. Bates, se convirtió en el tipo de estereoscopio más popular haciendo prácticamente posible el slogan: “*Ningún hogar sin estereoscopio*”, que había acuñado la *London Stereoscopic Company* en sus comienzos allá por 1854. En Wing (1996) se muestra la enorme variedad de modelos que surgieron a raíz de estos primeros diseños, esta obra puede considerarse como la biblia de los estereoscopios.

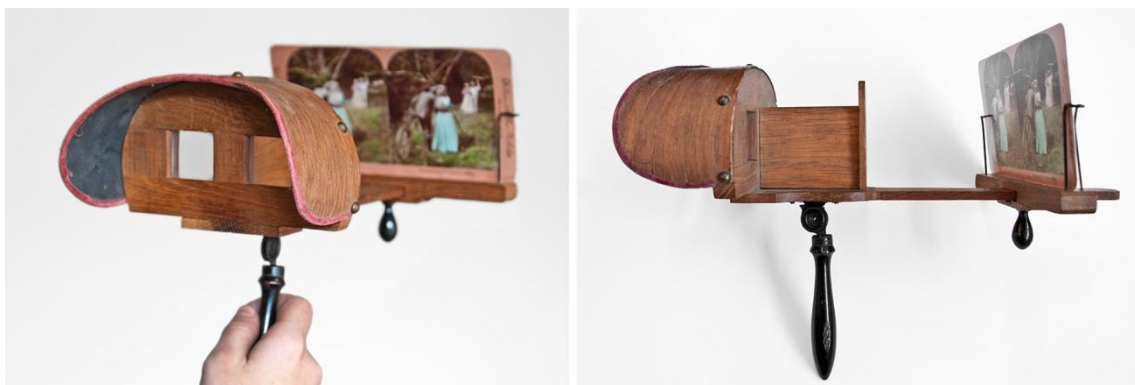


Fig. 7.12. Estereoscopio tipo Holmes-Bates, por cortesía de Pablo Navarro.

Con la popularización de la estereoscopia muchos fotógrafos empezaron a ofrecer a sus clientes retratos estereoscópicos y aparecen multitud de colecciones de fotografías estereoscópicas que se convirtieron en el medio de entretenimiento por

excelencia de la época, ya que permitían viajar, de manera figurada, a multitud de lugares remotos que se representaban en las fotografías.

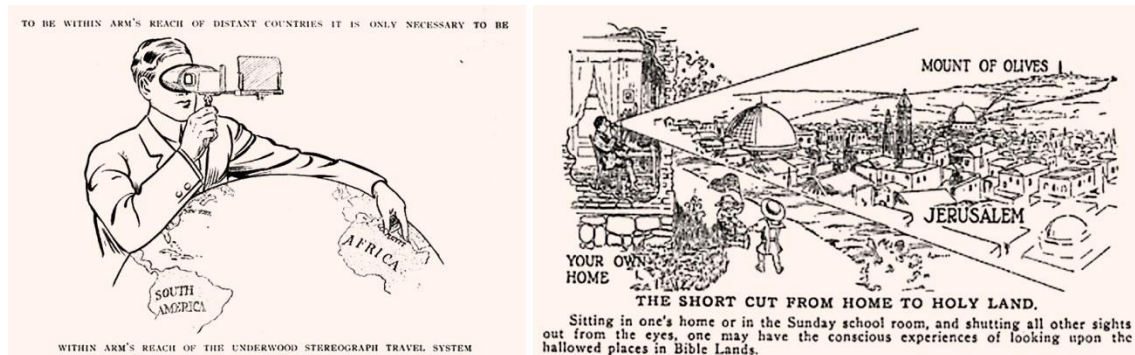


Fig. 7.13. Imágenes publicitarias de la editora de vistas estereoscópicas Underwood & Underwood para promocionar su *Stereograph Travel System*, ca. 1900.

Las editoras de colecciones estereoscópicas enviaron a sus fotógrafos por todo el mundo para fotografiar los principales monumentos de las ciudades, lo que hoy en día constituye un fondo gráfico de gran valor histórico; ejemplo de ello es el par estereoscópico de Toledo mostrado en la Fig. 7.14, realizado por Jean Laurent, uno de los grandes fotógrafos que trabajaron en España. En él puede verse el Alcázar, todavía en ruinas tras el incendio de 1810, además de la desaparecida Puerta de San Ildefonso de la Plaza de Armas del Puente de Alcántara, demolida en 1870.



Fig. 7.14. Jean Laurent, ca. 1860, *Entrada de Toledo*, colección *Vues, Musées et Costumes d'Espagne et du Portugal*, Par estereoscópico, Albúmina sobre cartulina, 8.7x17.8 cm.



7.5. Primeras consideraciones prácticas

Siempre se ha considerado que Wheatstone y Brewster fueron los científicos pioneros más relevantes en el campo de la estereoscopia, pero tras el profundo estudio de las publicaciones tempranas quisiera honrar la memoria y reivindicar la importancia de otros autores cuyas aportaciones han quedado en el olvido, como es el caso de Antoine Claudet. A continuación, veremos cómo las contribuciones de cada uno de los protagonistas van configurando las bases de la fotografía estereoscópica.

7.5.1. El segundo artículo de Wheatstone

Charles Wheatstone expone en la segunda parte de su artículo, publicado en 1852, algunas escuetas consideraciones prácticas acerca de la toma fotográfica del par estereoscópico, en las que propone el uso simultáneo de dos cámaras fotográficas, colocadas con un determinado ángulo de convergencia hacia el punto de interés (Fig. 7.15). Según Wheatstone, para que el efecto estereoscópico sea el adecuado, el ángulo de convergencia entre las cámaras deberá coincidir con el determinado por las condiciones de visionado en el estereoscopio. Para facilitar la obtención de los ángulos proporciona la tabla mostrada en la Fig. 7.16, que contiene los ángulos de convergencia en función de la distancia de observación en el estereoscopio.

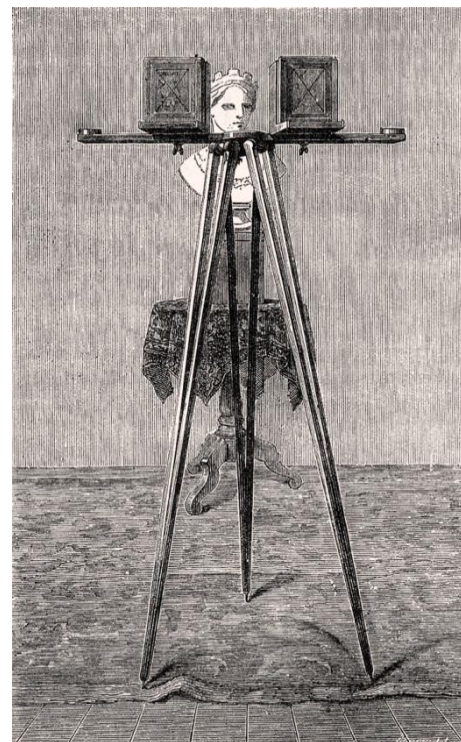


Fig. 7.15. Posición de las cámaras para la obtención del par estereoscópico. Los ejes ópticos convergen hacia el motivo principal. (Figuier, 1867)

El ángulo de convergencia es igual al ángulo del vértice de un triángulo isósceles, de base equivalente a la distancia interpupilar media (2.5 pulgadas), cuya altura es la distancia de observación en el estereoscopio.

Inclination of the optic axes	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
Distance in inches.....	71·5	35·7	23·8	17·8	13·2	11·8	10·1	8·8	7·8	7·0	6·4	5·8	5·4	5·0	4·6

Fig. 7.16. Tabla que señala el ángulo de convergencia entre los ejes ópticos de las cámaras según la distancia de observación en el estereoscopio. (Wheatstone, 1852)

Wheatstone pone un ejemplo para una distancia de observación en el estereoscopio de 8 pulgadas (unos 20 cm), habría que disponer las cámaras con un ángulo de

convergencia de aproximadamente 18° , siendo libre la distancia de las cámaras con respecto al sujeto; ello dependerá del encuadre que pretenda hacer el fotógrafo del sujeto (primer plano, medio, etc.).

Wheatstone afirma que los distintos pares que pudieran obtenerse con el mismo ángulo de convergencia, darían origen a la percepción en el estereoscopio de un modelo con el mismo efecto de relieve del modelo real (proporciones volumétricas correctas), situado a una distancia de 8 pulgadas y que lo único que cambiaría entre las distintas combinaciones sería el tamaño aparente del objeto, dicho de otro modo, el resultado perceptivo de combinaciones de pares realizados con el mismo ángulo de convergencia sería como tener delante de nosotros un modelo a escala del sujeto real, percibido a una distancia de 8 pulgadas, cuyo tamaño aparente dependerá de la distancia de las cámaras al modelo real fotografiado, es decir, más grande cuanto más cerca hubiera estado la cámara del sujeto.

La figura (Fig. 7.17) trata de ilustrar cómo el método propuesto por Wheatstone da pie a múltiples posiciones de la cámara, con un mismo ángulo de convergencia, y relaciona la percepción subjetiva del tamaño del objeto en relación a las diferentes posiciones de cámara.

Aunque Wheatstone no menciona nada al respecto, si la distancia entre cámaras fuera igual a la distancia interpupilar i (Posición 2 en la Fig. 7.17), entonces el tamaño aparente del objeto coincidiría con el del modelo real, esta situación es lo que se conoce actualmente como ortoestereoscopia.

Si la distancia entre cámaras fuera menor que la interpupilar (Posición 1 en la Fig. 7.17), se apreciaría un mayor tamaño aparente del objeto, hoy llamamos a esta situación hipoestereoscopia y se emplea cuando el objeto a fotografiar es de escaso tamaño.

Por el contrario, si la separación entre cámaras es mayor a la separación ocular media (Posición 3 en la Fig. 7.17), estaríamos frente a un caso de hiperestereoscopia, en el que el modelo se percibe de menor tamaño. Esta técnica se utiliza para disminuir el tamaño aparente de escenas lejanas, que serán percibidas como si se contemplara un modelo a escala reducida. Obsérvese que la separación entre cámaras nos hace percibir la escena tal como la vería un personaje de tamaño tal, que sus ojos coincidieran con la posición de las cámaras.

Wheatstone hace hincapié en que, para producir el mejor efecto estereoscópico, las fotografías que componen el par deben situarse en el estereoscopio en el punto de vista adecuado, entiéndase que lo que Wheatstone quiere decir aquí es que la distancia a la que habría que colocar los pares en el estereoscopio, con respecto a los ojos de observador, debería coincidir con la distancia focal del objetivo empleado, para

producir correctamente las imágenes retinianas. Wheatstone no era fotógrafo y puede que su manera de explicar los conceptos resultara confusa para quienes no tuvieran la preparación adecuada.

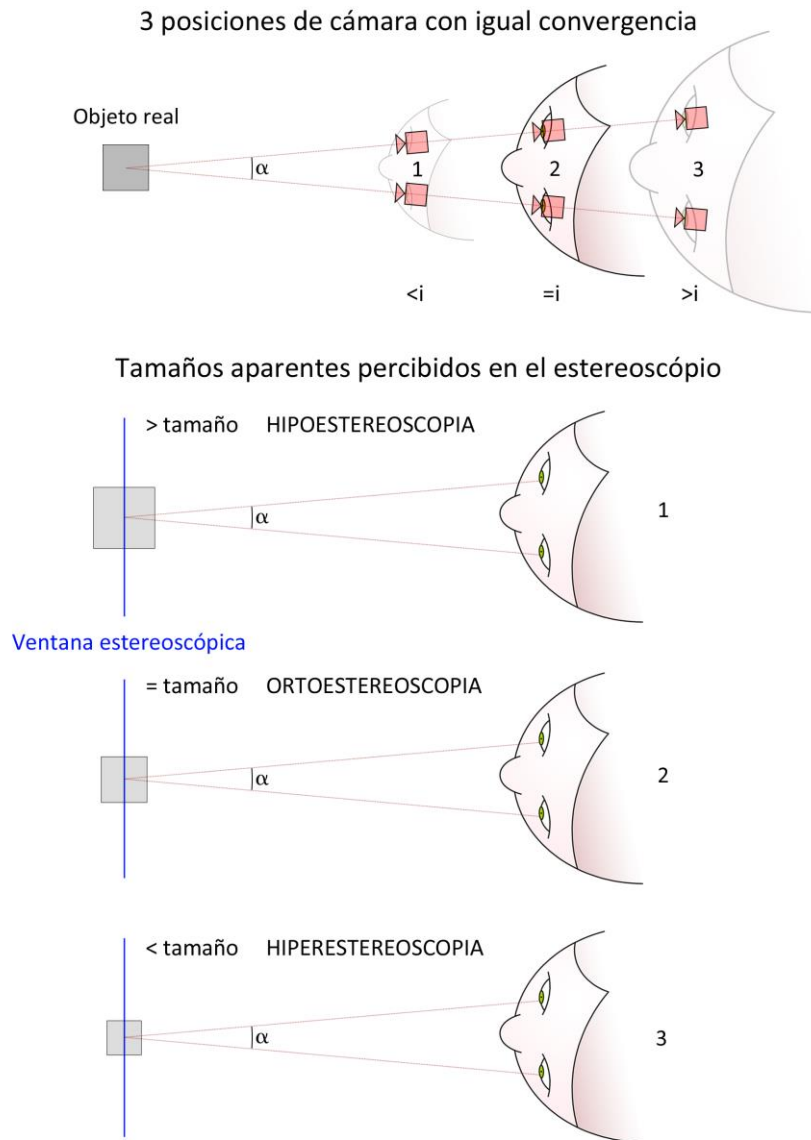


Fig. 7.17. Para un mismo valor de convergencia de los ejes ópticos con diversas posiciones de cámara, se producen diferentes percepciones del tamaño aparente del objeto fotografiado. Pedro Cabezas

Un aspecto muy importante de la segunda parte del artículo de Wheatstone es la modificación introducida en su estereoscopio reflector, que equipa con unos brazos articulados sobre los que van sujetos los soportes para los pares. Con ellos se puede variar la convergencia del par para que, con el ajuste correcto, los pares estereoscópicos queden ortogonales a los ejes visuales del sujeto, cosa que no ocurría en su primer modelo en donde vimos que el efecto de convergencia se conseguía mediante un movimiento transversal de los paneles, hacia adelante o hacia atrás.

Esta modificación no significa que el modelo anterior fuera imperfecto, todo lo contrario, el modelo anterior era óptimo para ver los dibujos estereoscópicos tal como habían sido dibujados, recordemos que los rayos principales de las perspectivas cónicas eran siempre paralelos y no convergentes. Sin embargo, en el caso de las fotografías tomadas con ejes ópticos convergentes, deberían disponerse ortogonales a los ejes visuales para simular correctamente la imagen retiniana, de lo contrario se produciría una distorsión de perspectiva en la imagen formada en la retina, de mayor o menor grado, dependiendo de la desviación de la orientación del par con respecto al ángulo de convergencia adecuado. Es lo que posteriormente se denominó efecto *Keystone*, al que nos referiremos más adelante.

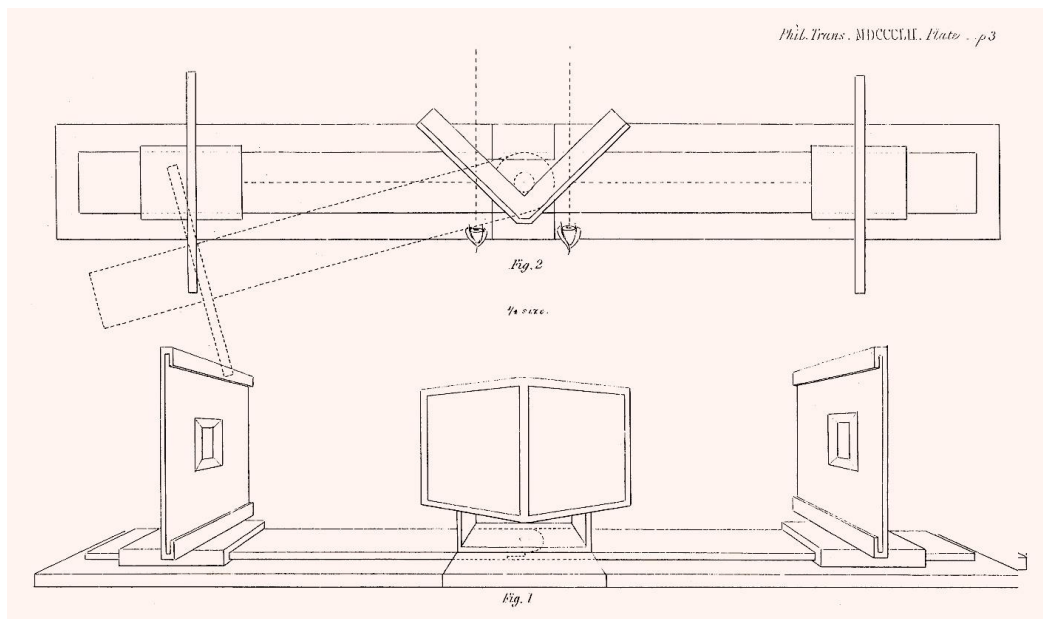


Fig. 7.18. Estereoscopio reflector de Wheatstone con brazos articulados (Wheatstone, 1852)

La multitud de variaciones de visualización del par que pueden lograrse realizando diversos ajustes del estereoscopio, conducen a Wheatstone a extraer algunas conclusiones del relieve observado con un mismo par, pero con distintos reglajes de convergencia y distancia con respecto al observador.

Tal como hemos comentado, un ajuste adecuado del estereoscopio supondría una coincidencia entre el ángulo de convergencia de las cámaras y el del estereoscopio, con los pares situados a una distancia equivalente a la distancia focal del objetivo empleado, pero ¿qué ocurre si se altera la convergencia? Wheatstone observa que al aumentar el ángulo de convergencia en el estereoscopio, con respecto al valor adecuado, forzamos a nuestros ojos a converger más y el objeto se percibe más pequeño. Por el contrario, si la convergencia está por debajo del valor óptimo, nuestros ojos convergen en menor medida y la sensación es que el objeto es de un tamaño mayor.

Otra posibilidad es mantener el ángulo de convergencia óptimo y alterar la distancia de los pares con respecto al observador. En este caso, si producimos un acercamiento de los pares hacia el observador el tamaño de la proyección retiniana aumentaría y por ello percibiríamos un objeto de mayor tamaño, mientras que al aumentar la distancia del par con respecto al observador ocurriría lo contrario y se percibiría un objeto de menor tamaño.

Hay multitud de variaciones de ajuste con las que nuestro cerebro lograría fusionar el par estereoscópico, pero sólo hay un ajuste perfecto en la que las proporciones volumétricas y los tamaños aparentes del objeto coinciden exactamente con los apreciados a simple vista.

El método de captura fotográfica propuesto por Wheatstone mantiene las proporciones volumétricas, pero no garantiza la percepción del tamaño real del modelo fotografiado, cosa que no preocupa a Wheatstone, cuyo planteamiento se centra en que el objeto se perciba a la misma distancia que la ventana estereoscópica, para no producir desajustes entre la distancia de acomodación de los ojos y la convergencia ocular, tema crucial que tendremos ocasión de analizar más adelante.

7.5.2. El libro de Sir David Brewster

Brewster compila en su obra *The stereoscope, its history, theory and construction*, publicada en 1856, sus aportaciones en el campo de la estereoscopia; parte de su contenido ya había sido publicado en artículos previos (Brewster, 1849) y (Brewster, 1851).

A diferencia de Wheatstone, Brewster defiende que la separación entre objetivos debe ser igual a la separación natural entre los ojos y por ello aboga por el uso de la cámara binocular de su invención. Este planteamiento se denomina hoy en día ortoestereoscopia y con ello se pretende no alterar la apreciación de los tamaños reales. Brewster realiza también un análisis acerca de la distancia ideal a la que fotografiar un sujeto para apreciar un relieve natural en el estereoscopio y concluye que la distancia idónea sería de seis pies (1,82 m).

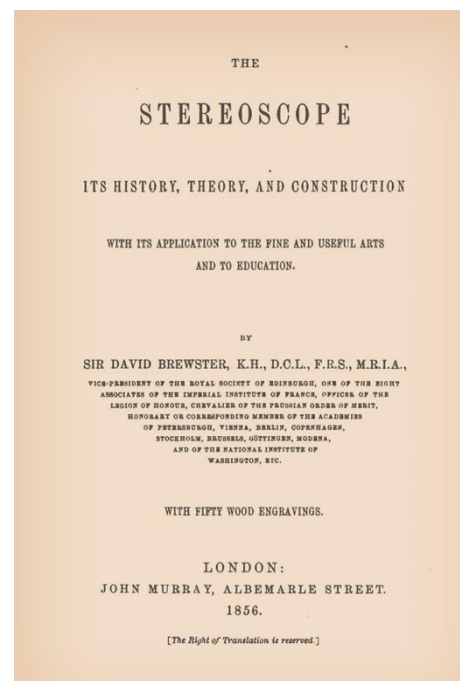


Fig. 7.19. Portada del libro de Brewster *The Stereoscope, its history, theory and construction*, 1856

7.5.2.1. La cámara binocular

Brewster ya había realizado en 1849 una sucinta descripción de una cámara con dos objetivos, separados una distancia equivalente a la interpupilar, que incorpora también en su libro.

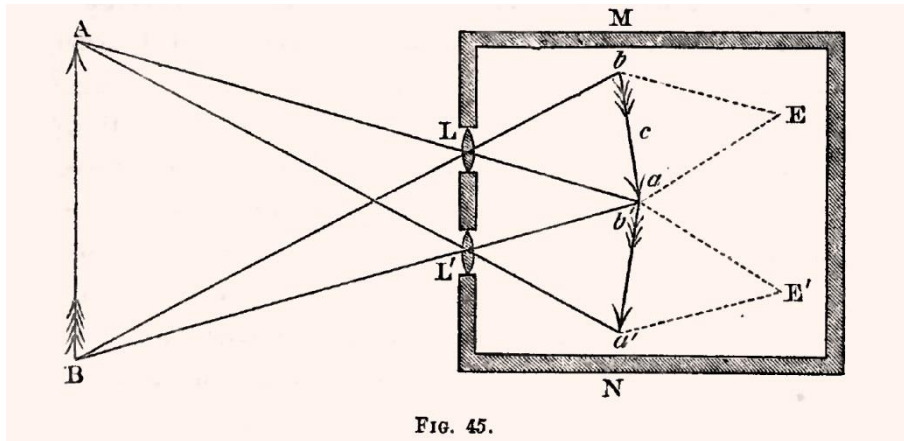


Fig. 7.20 Esquema de la cámara binocular (Brewster, 1856:146)

En 1853 el Francés Alexandre Marie Quinet realiza la que posiblemente fuera la primera cámara estereoscópica, que denominó Quinetoscopio, nombre poco acertado por su incoherencia, ya que debía referirse a un instrumento para ver (*scope*) y no para capturar imágenes, lo que le valió una reprimenda al respecto por parte de Brewster (Brewster, 1856:146).

John Benjamin Dancer también fabrica, entre 1853 y 1856, otra de las primeras cámaras estereoscópicas (Fig. 7.21), que comienzan a fabricarse a pequeña escala. De esta manera van apareciendo diversos modelos con sus correspondientes patentes.



Fig. 7.21. Cámara estereoscópica de John Benjamin Dancer fabricada entre 1853 y 1856

A finales del XIX las cámaras estereoscópicas comienzan a producirse en masa con modelos que se hicieron muy populares como el modelo Verascope de Jules Richard, fabricado a partir de 1893, o como la Stereo Kodak nº 2 fabricada a partir de 1901, a la que seguiría la popular Stereo Brownie nº 2 de 1905 junto con multitud de otros modelos de los que Kodak había comprado sus patentes.



Fig. 7.22. Cámara Verascope de Jules Richard fabricada a partir de 1893 (izda.). Kodak Stereo Brownie nº 2 de 1905 (dcha.)

En las cámaras estereoscópicas, surgidas a raíz de la descripción de Brewster, los rayos ópticos de ambos objetivos permanecen siempre paralelos, por tanto, no hay posibilidad de producir una convergencia entre ellos, sin embargo, Brewster ofrece una tabla de ángulos de convergencia con la que orientar las cámaras convencionales en relación a la distancia al modelo retratado (Fig. 7.23).

CHAP. VIII. RULE FOR BINOCULAR PICTURES. 149

D = Distance of Camera from the Sitter.	A = Angle formed by the two directions of the Camera.
36 inches, 3 feet, . . .	. . . 3° 59'
42, . . .	. . . 3 25
48, 4 feet, . . .	. . . 2 59
54, . . .	. . . 2 39
60, 5 feet, . . .	. . . 2 23
72, 6 feet, . . .	. . . 1 59
84, 7 feet, . . .	. . . 1 42
96, 8 feet, . . .	. . . 1 30
108, 9 feet, . . .	. . . 1 20
120, 10 feet, . . .	. . . 1 12

Fig. 7.23. Fragmento de la tabla de convergencias entre cámaras. (Brewster,1856:149)

Ya se comentó en la introducción histórica el sentimiento de rivalidad de Brewster hacia Wheatstone y en su libro no pierde la ocasión de criticar su método para emplazar las cámaras, diciendo al respecto:

“Mr. Wheatstone ha proporcionado unas reglas muy diferentes. ¡Él considera que el ángulo no depende de la distancia del sujeto a la cámara, sino de la distancia de la imagen binocular dispuesta en el estereoscopio con relación a los ojos del observador! En concordancia con la regla que he demostrado, el ángulo de convergencia para una distancia de seis pies es de 1° 59’, mientras que para un estereoscopio de cualquier clase, con el par situado a seis pulgadas de distancia del observador, ¡Mr Wheatstone establece 23° 32’! Como esta diferencia es un escándalo para la ciencia, deberemos esforzarnos por dar luz a este tema y será interesante comprobar cómo ha sido abordado este problema por los fotógrafos profesionales.”

(Brewster, 1856:149) (fragmento traducido)

El afán de Brewster por descalificar a Wheatstone le lleva a omitir, en este punto, las razones por las que los planteamientos de Wheatstone también resultan correctos.

En realidad Brewster sabe, tan bien como Wheatstone, que existen numerosas posiciones de cámara y convergencias bajo las que se consigue recrear el efecto estereoscópico y que cada una produce en el espectador una percepción distinta del tamaño aparente de los objetos, pero Brewster es totalmente contrario a ello y lo considera una aberración de la naturaleza. Sin embargo no hay que olvidar que el método propuesto por Wheatstone no produce efectos de exageración o disminución de relieve, salvo que se alteren los parámetros de convergencia en el estereoscopio, sino que únicamente producen un escalado de la escena.

En relación con los fotógrafos profesionales, Brewster cita una declaración, recogida en la revista francesa Cosmos del experimentado fotógrafo Antoine Claudet, en la que expresa:

“No puede haber ninguna regla para ajustar el ángulo de convergencia de las cámaras oscuras, es una cuestión de gusto y de ilusión artística”

(Claudet, 1852:658) (fragmento traducido)

A lo que Brewster objeta:

“Ningún asunto científico puede ser una cuestión de gusto, ni la ilusión puede ser artística, lo que supondría una tergiversación de la naturaleza”

(Brewster, 1856:147) (fragmento traducido)

Lo cierto es que Brewster saca deliberadamente de contexto las palabras de Claudet, dando a entender que éste no utilizaba una norma concreta por no entender los principios científicos que rigen la estereoscopia, pero nada más lejos de la realidad. Si uno acude a la fuente original, comprobará que en este mismo artículo se anunciaba el libro que Claudet tenía preparado, llamado *Du stéréoscope et des ses applications à la photographie* (Claudet, 1853), que sería publicado tres años antes del libro de Brewster, convirtiéndose así en el primer libro dedicado a la estereoscopia, al que Brewster hace caso omiso.

Posiblemente el comentario realizado por Brewster haya conducido a muchos investigadores a ignorar esta obra, pero Claudet, de un talento innato para la fotografía y una mente muy despierta, realiza interesantes aportaciones prácticas y técnicas que vale la pena considerar. Sirva el siguiente apartado para sacar del olvido y reivindicar las aportaciones realizadas por Antoine Claudet en el campo de la estereoscopia.

7.5.3. El libro de Antoine Claudet

Claudet había colaborado con Wheatstone en sus primeras pruebas con fotografías y según Wade (1983:36) también había colaborado con Brewster en el diseño de un objetivo, por lo que debía conocer de primera mano los enunciados teóricos de Wheatstone y Brewster.

Gracias a su profesión pudo realizar numerosas pruebas, lo que le permitió analizar la problemática de la aplicación práctica y extraer sus propias conclusiones que recogió en 1853 en su libro.

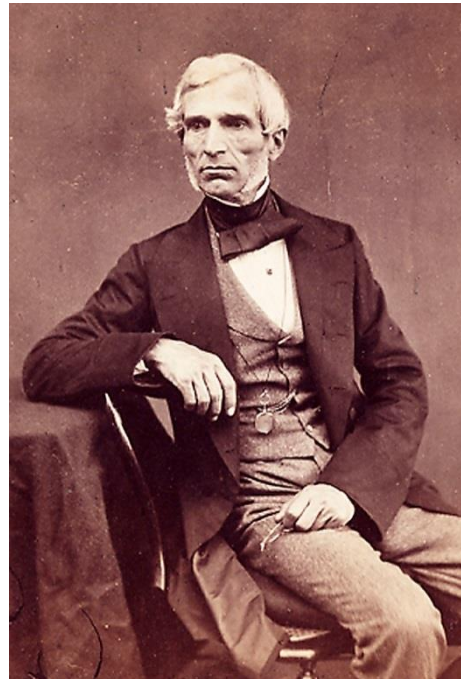


Fig. 7.24. Antoine Claudet (1797-1867)

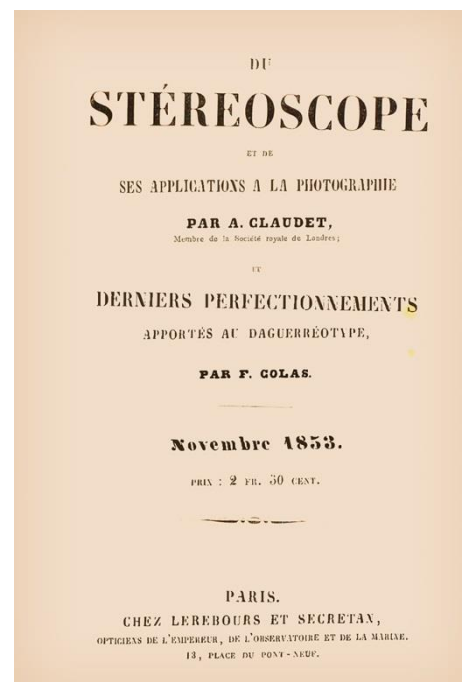


Fig. 7.25. Portada del libro de Antoine Claudet *Du Stéréoscope et des ses applications à la photographie*

Claudet se da cuenta de que parámetros como la distancia focal del objetivo y el tamaño de la placa o soporte sensible, condicionan la percepción de las distancias aparentes, por ello aclara que las reglas expuestas por Wheatstone y Brewster no pueden ser aplicadas de forma general y que es necesario prestar especial atención a parámetros como la distancia focal del objetivo y el tamaño de la muestra sobre el estereoscopio que tanto Wheatstone como Brewster no habían dejado del todo claro.

Claudet concilia las recomendaciones de Wheatstone y las de Brewster y deja que el gusto estético del fotógrafo, según las características de la escena, sea quien decida si altera o no los tamaños aparentes de la escena y dice al respecto:

“Toda la teoría del ángulo binocular o de la separación de los objetivos para la producción de las imágenes estereoscópicas para el estereoscopio, depende de la dimensión de las placas fotográficas utilizadas y de la distancia a la que queramos examinar el modelo reducido con el fin de obtener mayor o menor efecto estereoscópico. Tal como hemos dicho, no puede existir ninguna regla para fijar el ángulo binocular de las cámaras oscuras, es una cuestión de gusto y de ilusión artística.”

(Claudet, 1853:32) (Fragmento traducido)

En consonancia con lo expuesto por Claudet, en el rodaje de las películas 3D actuales existe la figura del Director de Fotografía Estereoscópica o estereógrafo, que controla los parámetros que permiten recrear una percepción determinada de la escena, como explica Mendiburu (2009).

Claudet también está de acuerdo con realizar un planteamiento ortoestereoscópico, tal como defiende Brewster, ya que es deseable respetar los tamaños reales de las figuras, pero opina que cuando se aplica este planteamiento a paisajes lejanos y no hay objetos en primer término, se produce una percepción de relieve escasa o nula debido a la escasa disparidad retiniana que originan las imágenes, por lo que, en estas circunstancias, conviene aumentar la distancia entre cámaras. (Claudet, 1853:16-17)

Cuando se trata de mantener los tamaños reales, caso ortoestereoscópico, Brewster sólo aconseja el uso de lentes de escaso diámetro ($\frac{1}{4}$ de pulgada), con el fin de conseguir imágenes nítidas y con poca distorsión, pero no deja claro, desde un punto de vista práctico, el tema de las distancias focales y asume que la cámara binocular debe tener la misma distancia focal que el estereoscopio.

Claudet es consciente de que para conseguir un relieve y tamaño aparente real no basta con separar las cámaras la distancia interpupilar y para explicarlo pone el ejemplo de lo que ocurre al mirar a través de unos gemelos para teatro, que amplifican la imagen de los objetos lejanos sobre la retina, sin embargo, el ángulo binocular determinado por la separación de los ojos y la distancia real a los objetos amplificados

resulta pequeño en comparación con el que se produce al contemplar objetos cercanos. Siendo que, a menor ángulo binocular, menor disparidad retinal se produce, por lo que con los gemelos se obtendrá una menor sensación de relieve.

Esta es la razón por la que algunos prismáticos llevan un juego de espejos, similar al de un periscopio, para aumentar la distancia base de observación y así paliar el efecto de pérdida de relieve que éstos producen. Por contra, cuando se observa por el extremo opuesto de los gemelos, se produce una reducción de la imagen y, si miramos un objeto cercano con ellos, se producirá el efecto contrario, es decir, se acrecentará el efecto de relieve.

Las lentes de una cámara se comportan de modo análogo a los gemelos, si observamos a través del visor de una cámara réflex con un objetivo de focal larga o teleobjetivo, se producirá una ampliación de la imagen, mientras que si utilizamos un objetivo de focal corta o gran angular, se producirá una reducción. Sólo cuando se utiliza un objetivo de una distancia focal equivalente a la de nuestro ojo, denominado objetivo "normal", la imagen retiniana que se produce al mirar a través del visor de la cámara coincide con la que se produce al mirar al natural.

Este problema de distorsión del relieve causado por el uso de distintos objetivos sólo se producirá si la distancia de observación es fija, como ocurre en el estereoscopio diseñado por Brewster, sin embargo, si usamos un estereoscopio reflector como el de Wheatstone, donde la distancia de observación es ajustable, bastaría con hacer coincidir la distancia de observación del par con la distancia focal de la cámara, para conseguir una percepción adecuada de las distancias aparentes; sería algo equivalente a observar una perspectiva cónica desde el punto de vista desde donde se ha obtenido, caso en el que dejan de percibirse las aberraciones marginales, tal como ya se comentó en el capítulo dedicado a las anamorfosis.

El estereoscopio de Brewster, aun con sus limitaciones, resulta más práctico para un uso destinado al público en general, por lo que si se utilizan lentes de distancia focal equivalentes a su distancia de observación, podremos conseguir una representación ortoestereoscópica, pero también podríamos conseguir esta situación, aunque hayamos utilizado lentes de otras distancias focales, si se aplica un escalado a las imágenes inverso al factor de ampliación o reducción producido por el objetivo empleado.

No obstante, hemos de tener en cuenta que realizar el escalado de una imagen actualmente es algo muy sencillo, pero en aquél momento era impensable; las fotografías o pruebas al daguerrotipo eran positivos únicos, no reproducibles, salvo que se fotografiaran a su vez; tenían el tamaño de la placa de cobre bañada en plata sobre la que se había conseguido revelar y fijar la imagen tras exponerla en el interior de la cámara oscura, con la particularidad de que la imagen quedaba invertida

lateralmente, fruto de la doble inversión de la luz producida en el interior de la cámara oscura. Esto no afecta a la apreciación del relieve, pero la escena se muestra simétrica en el estereoscopio de Brewster y correctamente en el estereoscopio reflector de Wheatstone, ya que el reflejo de las imágenes en los espejos deshace la inversión lateral.

En aquel momento empezaba a extenderse la incipiente técnica de placa de vidrio al colodión húmedo, descrita en 1851 por Frederick Scott Archer, que actuaba como negativo a través del que se podían realizar copias en papel o en otra placa de vidrio por contacto directo, lo que resolvía la inversión lateral en la copia o positivo, pero seguía sin haber posibilidad de ampliación o reducción. El uso de la ampliadora fotográfica no se haría extensivo hasta que la casa Eastman Kodak inventara el negativo de celuloide a finales del s. XIX.

Cualquier par estereoscópico cuyo tamaño sea inadecuado con respecto a la distancia de observación, provocará una percepción de relieve incorrecta, produciéndose un efecto de relieve disminuido, en el caso de que el tamaño del par sea mayor que el corresponde, o un efecto de relieve exagerado en caso contrario. Por este motivo, con los medios de los que disponemos actualmente debemos procurar que esto no suceda y escalar la imagen correctamente, pero en el caso de que la ampliación del sujeto sea necesaria, por no poder situarnos físicamente lo suficientemente cerca, Claudet ofrece una manera de compensar la disminución del relieve que produciría el uso del teleobjetivo, aplicando un factor mediante el que ampliar la separación entre cámaras, consistente en el cociente entre la distancia focal del objetivo empleado y la distancia focal del objetivo "normal" en relación a la distancia de observación. Con la separación así obtenida obtendríamos una percepción del relieve lo más cercana posible al caso ortoestereoscópico, pero no absolutamente perfecta.

En la Fig. 7.26 se ha realizado un esquema para aclarar el planteamiento de Claudet, en él se han representado tres posibles casos, el número 1 se corresponde con el caso ortoestereoscópico, en el que la obtención del par estereoscópico se ha realizado con objetivos de 50 mm, asumiendo que esta distancia focal es la adecuada para las condiciones de visionado en el estereoscopio, siendo la separación entre objetivos equivalente a la interpupilar. En este caso el par obtenido produce en el estereoscopio un efecto de relieve natural y sin distorsiones.

El caso número 2 se corresponde con una captura del par haciendo uso de objetivos del doble de la distancia focal adecuada (100 mm). Para que el sujeto tenga en el fotograma un tamaño similar al caso anterior, la cámara se habrá de retirar del sujeto, concretamente el doble de la distancia, pero si cometemos el error de colocar las cámaras separadas con una distancia equivalente a la interpupilar, el par así obtenido producirá una merma del efecto de relieve, por lo que el objeto parecerá aplanado.

Ya hemos visto que para paliar este efecto Claudet propone separar las cámaras en proporción a la distancia focal utilizada. Como las distancias focales entre el caso ortoestereoscópico y el propuesto están en relación 1 a 2, la separación entre cámaras habrá de estar en la misma relación, por tanto, la separación deberá ser el doble de la interpupilar, lo que equivale a disponer las cámaras sobre las mismas líneas de convergencia hacia el sujeto que origina el caso ortoestereoscópico (caso 1), tal como ejemplifica el caso 3, cuyo par evoca un efecto de relieve que se asemeja todo lo posible al caso ortoestereoscópico, pero con alguna ligera distorsión volumétrica del modelo representado que puede llegar a pasar inadvertida.

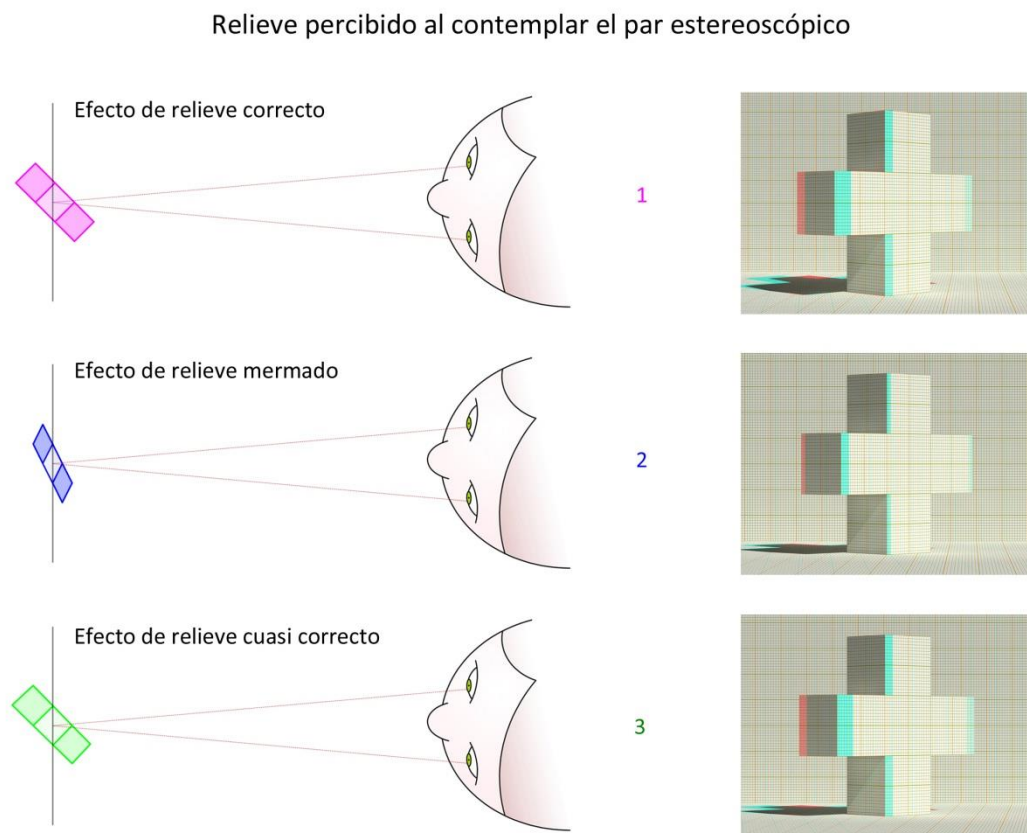
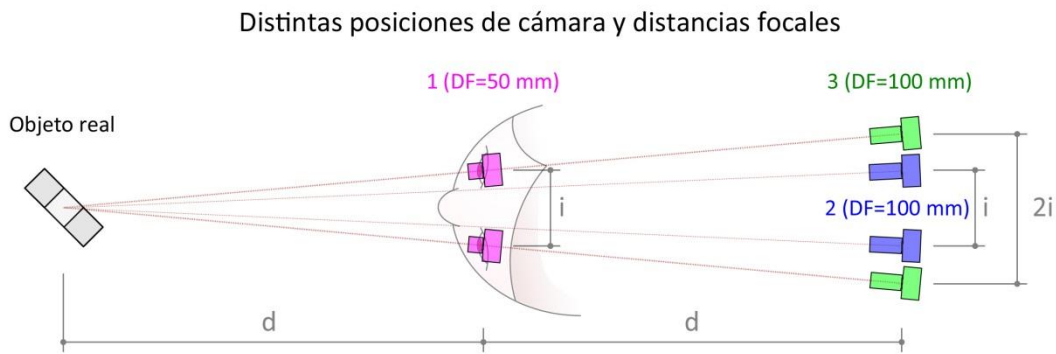


Fig. 7.26. La distancia focal condiciona la apreciación del relieve. Pedro Cabezos



Para estudiar las consideraciones que Claudet expone de manera verbal y representar correctamente los volúmenes que deben percibirse al contemplar cada uno de los pares, se han dibujado tridimensionalmente las figuras resultantes fruto de la intersección de los haces de rayos que emanan desde la posición de los ojos del observador y pasan por los vértices de las imágenes que componen el par, situadas sobre la ventana estereoscópica (Fig. 7.27).

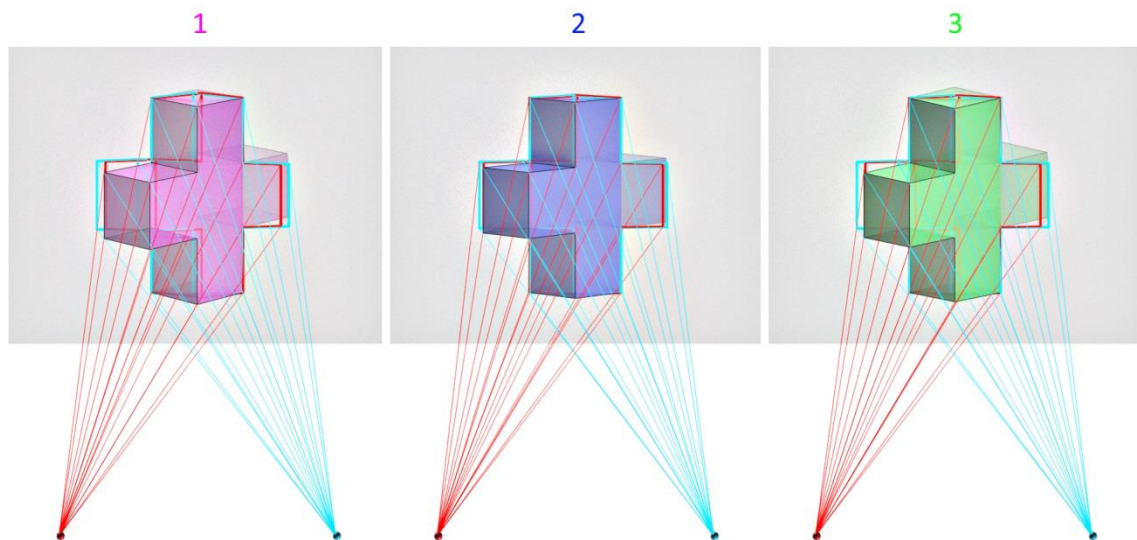


Fig. 7.27. Restitución del volumen percibido al observar el par estereoscópico por intersección de los rayos provenientes de la posición de los ojos. Pedro Cabezos

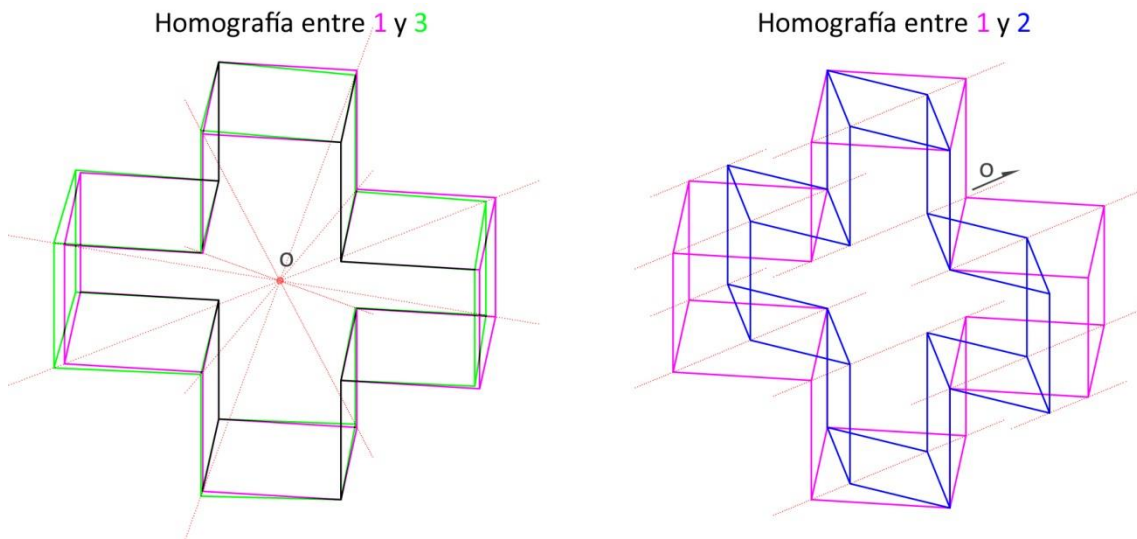


Fig. 7.28. Relaciones homográficas entre las figuras restituidas. Pedro Cabezos

Al margen de las consideraciones de Claudet, merece la pena destacar que tras dibujar y comparar los distintos cuerpos que se obtienen, uno puede observar ciertas relaciones geométricas entre ellos, resultando que al unir los vértices homólogos de dos de los modelos restituidos se forma un haz que confluye en el centro de una homografía (Fig. 7.28). Se puede comprobar que este centro coincide también con la

intersección de las rectas que contienen los puntos de vista, correspondientes a un mismo ojo, desde los que fueron obtenidos los pares estereoscópicos que originan ambos modelos.

El centro de homografía puede resultar un punto impropio, como en el caso de analizar la relación homográfica entre el modelo restituído del caso 1 y el del caso 2, en donde la relación obedece a un cambio de escala en la dirección ortogonal a la ventana estereoscópica de valor $\frac{1}{2}$ (Fig. 7.28, derecha).

Retornando a las consideraciones realizadas por Claudet, cabe destacar también que éste no es tan estricto como Wheatstone al definir el ángulo de convergencia entre las cámaras, pues no piensa sólo en el caso de un objeto aislado del resto de la escena, sino más bien en una escena paisajística más amplia en la que los ojos pueden converger hacia cualquier punto de interés, diciendo al respecto:

“Visto que la cuestión de los ángulos binoculares en las cámaras oscuras no puede ser resuelta de una manera absoluta [...] La única ley que puedo formular es esta: «El ángulo binocular no deberá ser jamás mayor que el subtendido por una base de dos pulgadas y media cuando se miran los objetos [en el estereoscopio] a la distancia más próxima que permite abrazar toda la escena»”

(Claudet, 1853:17) (Fragmento traducido)

Con esto viene a decir que el máximo ángulo de convergencia sería el que viene dado por el ajuste en las condiciones de visualización en el estereoscopio que permite contemplar los pares estereoscópicos ajustados al campo visual del observador, lo que sería prácticamente equivalente al ángulo de convergencia planteado por Wheatstone.

Vimos que el planteamiento de Wheatstone producía que el objeto hacia el que se converge con las cámaras se perciba centrado en la ventana estereoscópica, por lo que disminuir este ángulo, producirá que el objeto se perciba por detrás de la ventana estereoscópica, más retirado, cuanto menor sea la convergencia entre cámaras. Lo que, tal como propone Claudet, también resulta lícito. Por otro lado con estos planteamientos no podría darse el caso de que el objeto sobresalga de la pantalla, el típico efecto “*out of the screen*”, del que tanto se abusó, en las primeras películas estereoscópicas, lo que significa que el máximo ángulo de convergencia estipulado por Claudet puede llegar a transgredirse, pero con precaución pues, tal como veremos más adelante, ello puede causar fatiga visual o incluso diplopía.



Fig. 7.29. Antoine Claudet e hijo en su estudio fotográfico, 1853. Daguerrotipo estereoscópico.



La Fig. 7.29. muestra una de las pruebas que Claudet hacía en su estudio, en donde aparece junto a su hijo. En ella puede verse como sitúa en la escena diversos objetos, que le ayuden a percibir el efecto de relieve, el extraño objeto situado sobre la mesita es un focímetro (*focimètre*), aparato ideado por Claudet, compuesto por varias aspas numeradas que se sitúan a distintas profundidades, para evaluar la distancia real del enfoque. Puede apreciarse cómo el focímetro sirve también como ayuda para identificar si se percibe la profundidad de los distintos planos que definen las aspas. Es loable la meticulosidad de Claudet que coloca una placa perfectamente rotulada (parte inferior izquierda) probablemente para identificar la separación entre cámaras y la distancia a la que se ha realizado la toma, en cuyo caso, esta toma habría sido realizada a una distancia de 22 pies y con una separación entre cámaras de 8 pulgadas, tal como puede leerse en la placa.

Otro aporte práctico de Claudet fue el *stéréoscopéomètre*, que consiste en un diagrama de doble entrada, que puede dibujarse sobre un cartón y con la ayuda de un cordel puede introducirse el ángulo binocular y la distancia al sujeto, para obtener la separación entre cámaras, o bien, la distancia del sujeto y la separación entre cámaras, para obtener el ángulo de convergencia.

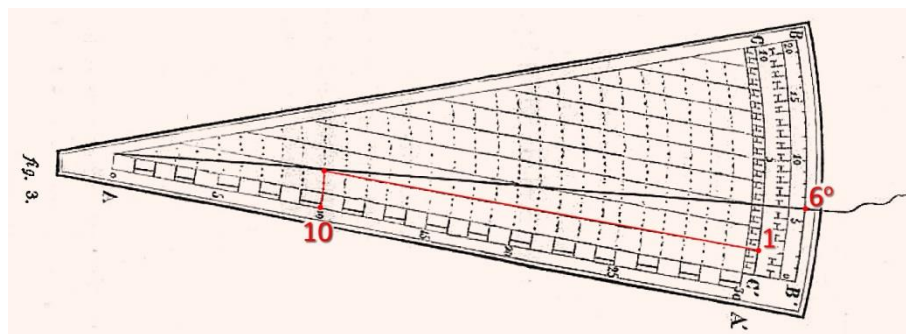


Fig. 7.30. Le stéréoscopéomètre (Claudet, 1853:29)

En el segmento A-A' se define la distancia entre cámara y sujeto, en él se marcan 30 unidades que se corresponden con 30 pies, mientras que el arco B-B' abarca un ángulo de 20° y se gradúa en cuartos de grado. El arco C-C' se gradúa en cuartos de pies con las mismas unidades que el segmento A-A'. El cordel permite la doble entrada. En la Fig. 7.30. la posición del cordel puede relacionarse con multitud de entradas, una de ellas podría ser la introducción de un ángulo binocular de 6° y una distancia de 10 pies, con lo que se obtendría una distancia entre cámaras de 1 pie.

Como colofón a sus investigaciones, Claudet diseñó su propia cámara estereoscópica (Fig. 7.31), que denominó cámara oscura binocular múltiple, con la que era posible tomar 4 pares estereoscópicos sin tener que cambiar la placa, bastaba con girar la placa un cuarto de vuelta. En ella se podía regular la separación entre objetivos y el ángulo binocular mediante su soporte articulado. Esta cámara figuraba en el catálogo

de instrumentos del óptico Noel Lerebours (1853) y se vendía por un precio de 170 francos.

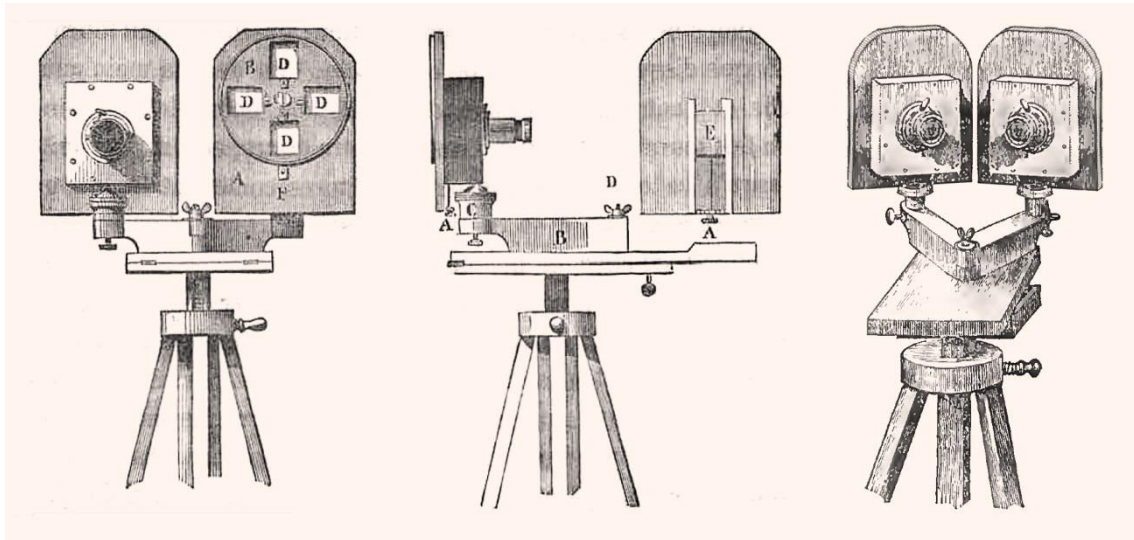


Fig. 7.31. Cámara oscura binocular múltiple de Claudet. La imagen izquierda muestra el alzado de ambas cámaras, una de ellas sin la óptica montada para ver el sistema giratorio de la placa. En la imagen central se muestra la parte sustitutoria del disco (A), con el vidrio esmerilado (E), que permitía orientar y encuadrar la imagen. Adaptado de (Claudet, 1853:23) y (Claudet, 1852:70)

Lo cierto es que lo expuesto por estos tres pioneros cubre, casi por completo, las bases teóricas que nos permiten dominar los principios de la estereoscopia y llevarlos a la práctica. La tabla siguiente sintetiza y compara las consideraciones más relevantes de cada uno de los autores para poder tener una visión global de ellas.

	Wheatstone	Brewster	Claudet
Planteamiento estereoscópico	Abierto a la Hipo/Hiper/Orto estereoscopia	Férreo planteamiento Ortoestereoscópico	Abierto a la Hipo/Hiper/Orto estereoscopia
Convergencia entre cámaras	Mismo ángulo de convergencia que el definido en el estereoscopio	Mismo ángulo de convergencia que el definido por los ojos y el sujeto al natural	Convergencia libre, hasta el máximo que definen las condiciones de visualización
Separación entre cámaras	La necesaria para respetar el ángulo de convergencia definido en el estereoscopio	Igual a la distancia interpupilar	Separación en función del efecto hiperestéreo y de la distancia focal para compensar el relieve
Otras observaciones	Desajustes de convergencia y distancia en el estereoscopio alteran el relieve	Recomienda situar el sujeto a una distancia de 6 pies (1.83 m) para destacar su relieve	Deja claro que la distancia focal condiciona la percepción del relieve

Fig. 7.32. Consideraciones clave realizadas por Wheatstone, Brewster y Claudet

7.6. Publicaciones posteriores

A estas primeras obras les han sucedido multitud de manuales de fotografía y monografías, prácticamente todas ellas pertenecientes a autores extranjeros. La mayoría de las obras a las que he podido acceder redundan en los mismos principios y suelen estar destinadas a un público con poca predisposición ante cuestiones teóricas, sobre todo las más recientes, que proporcionan una receta de uso práctico que ofrece resultados inmediatos, sin profundizar en las cuestiones de base, lo que no satisface al lector inquieto que quiere comprender bien el fenómeno estereoscópico.

Este fue uno de los motivos por los que me pareció necesario estudiar los orígenes de la estereoscopia y conocer de primera mano los primeros escritos y publicaciones, para sacar a la luz la procedencia de cada uno de los principios básicos de la estereoscopia.

Entre las obras tempranas consultadas cabe destacar *Monographie du stéréoscope et des épreuves stéréoscopiques*, de Henri de la Blanchère (1862) y *Le Stéréoscope et la photographie stéréoscopique* de Félix Drouin (1894), excelente monografía que sintetiza las consideraciones teóricas realizadas hasta su fecha de publicación con multitud de ilustraciones que describen diversos sistemas de reproducción y visionado que constituyen el germen de los que se desarrollarán durante el siglo XX.

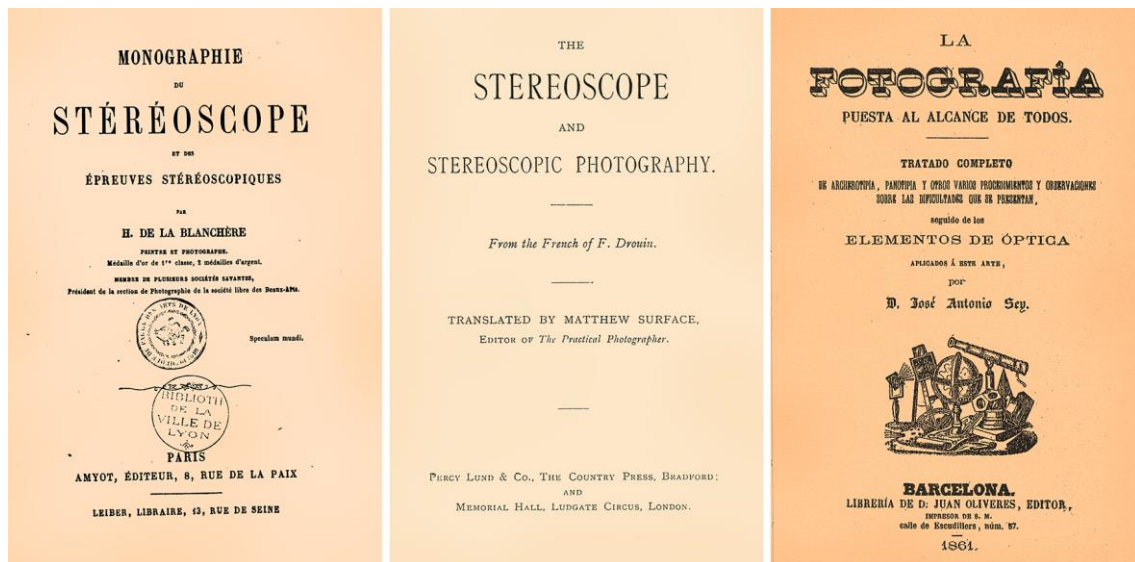


Fig. 7.33. Portadas de la Monografía de Henri de la Blanchère (1862), traducción inglesa de la obra de Félix Drouin (1894) y *La Fotografía puesta al alcance de todos* de D. José Antonio Sey (1861)

El primer libro español en el que se mencionan algunas consideraciones en la toma estereoscópica es *La fotografía al alcance de todos* de José Antonio Sey (1861). En su capítulo XXV, denominado *De las pruebas estereoscópicas*, el autor aporta unas sencillas y escuetas orientaciones que por su interés y su capacidad de síntesis me ha parecido conveniente citar íntegramente:

“Como el estereoscopio se ha generalizado tanto, de modo que todo el mundo tiene noticia de él, suprimiremos su descripción, pasando a explicar el modo de obtener las pruebas estereoscópicas.

Para producir una imagen de esta especie es indispensable hacer dos copias del mismo objeto, en un mismo tiempo y de dos puntos de vista diferentes.

Con respecto á los retratos es preciso observar que la primera copia ha de ser de los tres cuartos y la segunda de frente, como si dijéramos; el modelo debe pasar por delante de dos aparatos separados el uno del otro de 10 á 30 centímetros. Este modo de operar es el que siguen muchos fotógrafos y parece bastante racional.

Estas pruebas pueden obtenerse ya por medio de una sola cámara oscura provista de dos objetivos iguales; ya con dos cámaras oscuras y en último caso con una sola, tirando ambas pruebas por separado con la regla que sigue:

Distancia que ha de mediar de una otra cámara oscura.

Por un modelo colocado á 3 á 4 metros del objetivo..... 15 á 20 centim.

á 5 á 6..... 20 á 30 “

y así sucesivamente.

En cuanto al paisaje, como la distancia es ilimitada y los primeros planos se hallan a algunos centenares de metros, se han de colocar, á lo menos, á unos 7 á 10 metros una de otra.

Conviene tener presente que es dispensable trazar dos perpendiculares en el cristal deslustrado haciéndolas coincidir con las de la nariz y la de los ojos en el retrato, á fin de que allí sea la línea común de las dos imágenes y el punto culminante del relieve.

Debe tenerse cuidado de que estas líneas estén á la distancia de 6 á 7 centímetros una de otra, distancia igual á la separación regular de los ojos ó intervalo que debe existir entre las dos imágenes en el estereoscopio.

Si no se observasen rigurosamente estos principios, la vista se fatigaría al contemplar las imágenes estereoscópicas, y muchas veces se percibirían dos imágenes distintas.

Cuando una prueba está bien hecha y los oculares del estereoscopio se hallan á la distancia que requiere la vista del observador, la imagen se presenta con un relieve sorprendente y con una completa ilusión.”

Sey (1861:65-67)

Este breve fragmento está lleno de aportaciones históricas que no tienen desperdicio, por un lado las semánticas, con palabras “pruebas” que era como se hacía referencia

inicialmente a la copia en papel de la imagen fotográfica o al propio daguerrotipo. Esta acepción sigue vigente en el diccionario de la RAE, pero prácticamente está en desuso. También llama la atención el término “*estereóscopo*”, referido a lo que actualmente denominamos estereoscopio.

Conviene aclarar que cuando el autor se refiere a que una de las tomas del retrato ha de ser del lado de los tres cuartos, se refiere a una denominación de la composición fotográfica que se ha venido utilizando para indicar una posición oblicua de la cámara con respecto al sujeto de aproximadamente 45° con respecto a la posición frontal, aunque, en este caso particular, el ángulo sería mucho menor, puesto que la separación de cámaras propuesta entre la posición frontal y la toma de tres cuartos es reducida.

De sumo interés es la descripción de lo que el autor considera una práctica habitual en los retratistas de la época, de ella se desprende que aquellos profesionales pioneros se decantaban por la técnica hiperestereoscópica, tanto en los retratos como en los paisajes, con el fin de ensalzar el efecto de relieve, si bien, también se hace mención de la cámara de objetivo doble o binocular, con la que la toma produciría un efecto ortoestereoscópico, siempre que la distancia focal de la cámara, coincidiera con la del estereoscopio.

Otro aspecto muy importante es cómo resuelven la localización del punto de convergencia, marcando una cruz sobre el cristal esmerilado que servía de visor para realizar la composición de la fotografía e iba montado en el fondo de la cámara. Sobre este vidrio se formaba una tenue imagen, doblemente invertida, que debía ser contemplada en la oscuridad total, para ello se utilizaba la capa negra que impedía la entrada de luz en la parte trasera de la cámara y evitaba también posibles veladuras, cuando el fotógrafo sustituía el cristal esmerilado por la placa fotográfica para efectuar la exposición de la toma.

El fotógrafo debería marcar la cruz realizando una línea horizontal y otra vertical en la misma posición en los vidrios de ambas cámaras y ajustar la dirección de éstas para que el centro de la cruz quedara situado en punto medio entre los ojos del sujeto. Más tarde comenta que la separación horizontal entre estos dos puntos debe estar entre 6 y 7 cm, que es la distancia interpupilar, pero conviene aclarar que con esto no se refiere a la separación de las cámaras sino a la separación de las copias, una vez positivadas y dispuestas para ser vistas en un estereoscopio convencional como pudiera ser el refractor de Brewster.

El autor se refiere al punto de convergencia como el punto culminante del relieve, pues éste se percibirá sobre la ventana estereoscópica, mientras que el resto de puntos parecerán estar por detrás de ella, debido a que en un retrato de primer plano no suele haber objetos por delante del rostro del sujeto.

Por último me sorprendió la temprana alusión a un tema tan actual como la fatiga visual, pues no es hasta bien entrado el siglo XX, cuando con el desarrollo del cine estereoscópico empieza a plantearse el problema de la fatiga visual, en el que se han venido centrando muchas investigaciones recientes en el campo de la estereoscopia.

Tendríamos que esperar hasta 2011 para encontrar una monografía sobre la técnica de la fotografía estereoscópica escrita por un español (Navarro, 2011).

Tal como se desprende de éstas tempranas publicaciones se puede observar que la regla utilizada por los primeros fotógrafos parece depender de la distancia al sujeto, de hecho, una norma que se ha universalizado en la realización de tomas estereoscópicas es la que propone separar las cámaras $1/30$ de la distancia entre la cámara y el objeto más próximo a ella. No he podido identificar claramente el origen de esta sencilla y efectiva norma pero puedo formular una hipótesis al respecto. Si recordamos, Brewster recomienda situar al sujeto a una distancia de 6 pies (72 pulgadas ó 1.82 m) para poder apreciar correctamente su relieve. Si calculamos la relación entre esta distancia y la distancia interpupilar media (2.5 pulgadas) resulta un valor de 28.8, que redondeando nos da el valor de 30. Posiblemente esta haya sido la razón que da origen a esta particular regla, es decir, el famoso treintavo de la distancia busca producir un efecto de escalado de la escena, en consonancia con los principios de Wheatstone, pero con la intención de que el sujeto más próximo aparente estar situado a la distancia recomendada por Brewster.

Mendiburu (2009) y Navarro (2011), plantean una ligera variante de esta regla que consiste en separar las cámaras el 3% de la distancia al objeto más próximo a la cámara lo que producirá prácticamente los mismos resultados que la regla del treintavo, al ser la diferencia entre los factores mínima.

A pesar de que estas reglas pueden ofrecer buenos resultados, conviene adquirir un mayor control de los parámetros que entran en juego con el fin de alcanzar la excelencia del control estereoscópico y asegurar una experiencia de visionado confortable, sin fatiga visual ni otras molestias derivadas de una sobrecarga del sistema visual.

Con la aparición del cine estereoscópico, en el primer cuarto del siglo XX, se desencadenó un interés por mejorar los medios de visionado y por estudiar las causas de la fatiga visual o astenopia, con el fin de neutralizar los efectos negativos que podía llegar a sufrir el espectador tras un visionado prolongado. Hoy en día este sigue siendo el caballo de batalla de muchas de las investigaciones en el campo estereoscópico.

En el próximo capítulo nos adentraremos en el tema del confort visual e identificaremos algunos problemas intrínsecos de la estereoscopia, pero no quisiera terminar este capítulo sin definir uno de los conceptos clave de la estereoscopia: el

paralaje, surgido a partir del desarrollo de aplicaciones técnicas como la fotogrametría, cuyo control resultará ser crucial para asegurar una buena experiencia de visionado.

7.7. El paralaje y sus tipos

Hemos visto que la finalidad de la estereoscopia es reproducir, mediante un estereopar, las mismas imágenes retinianas que produciría la escena tridimensional. Las imágenes son disimilares para producir la misma disparidad retinal que la escena real y, si las comparamos, podemos observar que sus puntos homólogos se separan horizontalmente una determinada distancia denominada paralaje.

Hay muchas maneras de medir el paralaje en función de la posición relativa entre las imágenes que componen el par, pero nos referiremos únicamente al denominado paralaje sobre pantalla (*on screen parallax*), que se refiere a la separación existente entre puntos homólogos del par, cuando las imágenes se encuentran listas para su visualización sobre el soporte que define la ventana estereoscópica, ya sea una pantalla o un medio impreso.

Una manera sencilla de apreciar el paralaje consiste en contemplar un par estereoscópico realizado en anaglifo, sin utilizar las gafas de filtro de color. Con ello podemos constatar que la variación del paralaje entre los distintos puntos homólogos está directamente relacionada con la profundidad a la que éstos se perciben.

Observemos la Fig. 7.34, sin utilizar las gafas de filtro, y analicemos los tres tipos de paralaje que podemos encontrar. Si centramos nuestra atención sobre el punto **a**, podemos apreciar la separación horizontal existente entre el punto correspondiente al ojo derecho y el correspondiente al izquierdo. Puede verse como el punto correspondiente al ojo derecho queda del lado izquierdo de la imagen y viceversa. Cuando se produce este cruzamiento, el paralaje se denomina negativo y los rayos visuales que pasan por el punto convergen por delante de la ventana estereoscópica y el punto se percibe por delante de ella.

Si nos fijamos en los puntos **b** y **d**, podemos observar que el paralaje es nulo, por tanto, los rayos visuales convergen sobre el plano que define la ventana estereoscópica y precisamente ahí es donde se perciben.

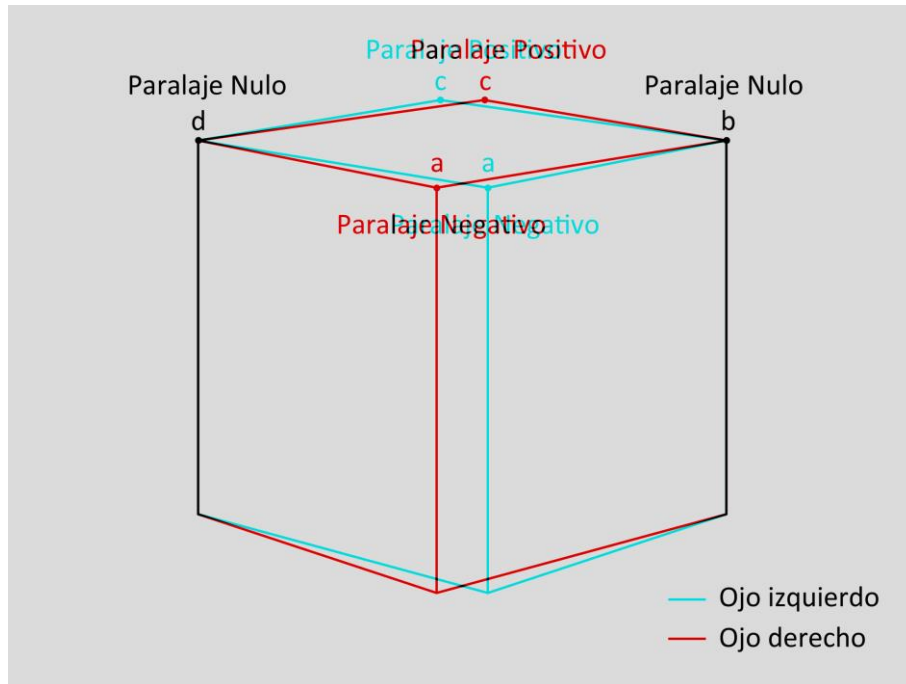


Fig. 7.34. Tipos de paralaje. Pedro Cabezos

El último tipo de paralaje se aprecia en el punto **c**, cuyos puntos homólogos quedan del mismo lado que el ojo al que le corresponden. En este caso el paralaje se denomina positivo y los rayos visuales se cortan por detrás de la ventana estereoscópica, por lo que el objeto se percibe tras ella. Si utilizamos ahora las gafas de filtro deberíamos comprobar que la sensación de profundidad es la que se acaba de describir.

La Fig. 7.35 representa cómo la intersección de los rayos visuales que pasan por los puntos homólogos nos produce el efecto de profundidad del punto en relación a la ventana estereoscópica.

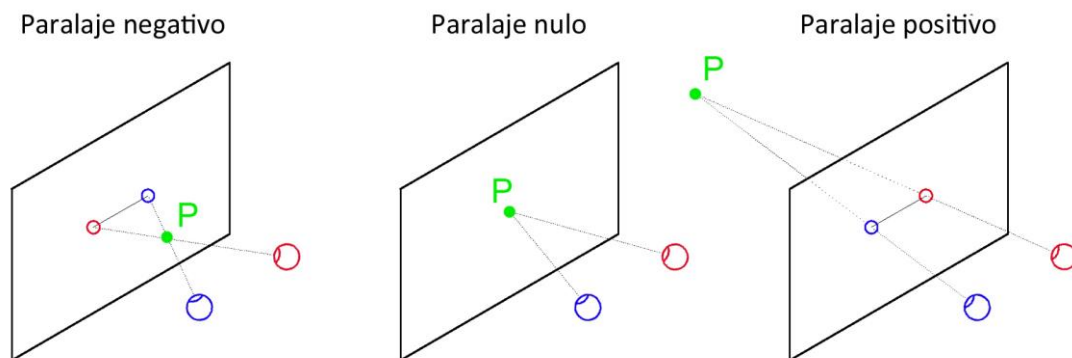


Fig. 7.35. Tipos de paralaje y percepción de la profundidad. Pedro Cabezos

En el capítulo de la percepción del relieve vimos los tipos de disparidad retinal, cruzada y no cruzada, en realidad, el paralaje negativo produce una disparidad cruzada en la retina, mientras que el paralaje positivo produce disparidad no cruzada.

Los puntos con paralaje nulo caen sobre puntos correspondientes de las retinas y se perciben sobre el horóptero que podemos asociar con la ventana estereoscópica.

Algunos autores se refieren al paralaje como disparidad, pero creo que es más claro utilizar el término paralaje para referirse a las diferencias entre las imágenes que componen el par, causantes de la disparidad retinal.

Como veremos en el próximo capítulo, el control del paralaje es fundamental para garantizar el confort visual; se ha demostrado que los excesos de paralaje son una de las causas principales de la fatiga visual e incluso pueden llegar a causar diplopia (Yeh et al.,1990).

8. EL CONFORT VISUAL

El estudio del confort visual en estereoscopia es algo relativamente reciente, desarrollado principalmente para paliar los efectos de astenopia y fatiga visual causados por efecto de una sesión prolongada de material estereoscópico como puede ocurrir en las proyecciones de cine. Todavía hay muy pocos libros que traten este tema; Mendiburu (2009) es un ejemplo excelente, se trata de un libro muy descriptivo, orientado principalmente al campo cinematográfico, que ha tenido mucho eco en el mundo de la estereoscopia. A partir de esta obra han surgido otras como Zu (2012) o Dufaux (2013), pero la mayoría de la información acerca del confort visual se encuentra en artículos científicos recientes en los que se describen los estudios de multitud de investigadores, preocupados por determinar las causas de la fatiga visual y la manera de definir unos parámetros que garanticen el confort visual.

8.1. Principales causas de incomodidad y fatiga visual

8.1.1. Excesos de paralaje

Casi todas las investigaciones coinciden en señalar que los excesos de paralaje son uno de los principales motivos de la fatiga e incomodidad visual.

Cuando recorremos con la mirada un par estereoscópico, las diferencias de paralaje inducen a nuestros ojos a converger en un determinado punto del espacio, por esta razón no debería haber paralajes que produzcan ángulos de vergencia por encima de los límites impuestos por nuestro sistema oculomotor.

Por un lado, se debería evitar un paralaje positivo excesivo que produjera divergencia de los rayos visuales porque, aunque puede llegar a tolerarse una ligera divergencia, en la mayoría de casos esto causaría molestias visuales o imposibilitaría la fusión. Para salvar esta limitación bastaría con limitar el paralaje positivo a un valor equivalente a la distancia interpupilar media, unos 65 mm.

Por otro lado, tampoco deberíamos forzar en exceso la convergencia ocular, lo ideal sería no llegar valores de paralaje negativo que obligaran a los ojos a converger por debajo de una distancia de observación confortable, que podemos considerar de 25 cm.

Aparte de las limitaciones de vergencia, tenemos que considerar otras limitaciones, todavía más estrictas, como los límites fusionales que imponen las zonas de Panum en la retina. Recordemos que, tal como se vio en el capítulo de sistema visual, las retinas disponen de una zona asociada con cada punto de la retina contraria, de forma que los puntos que caen dentro de esa zona, son susceptibles de fusionarse con el punto de la otra retina mediante el proceso mental de la estereopsis. Por tanto, el tamaño de las zonas de Panum supone un límite para la fusión que debe ser respetado.

Ya vimos como la medición, tanto de las zonas como de los espacios de Panum, ha sido siempre un tema controvertido por la dificultad que conlleva su medición y por las numerosas variables que entran en juego, lo que provoca una gran dispersión en los resultados, por este motivo muchos investigadores han buscado otras maneras de abordar los límites de paralaje y determinar el confort visual como veremos a continuación.

8.1.2. El conflicto entre acomodación y vergencia

Este es un problema inherente a la estereoscopia que consiste en un desajuste entre la distancia de acomodación o distancia a la que enfocan nuestros ojos y la distancia de vergencia o distancia a la que convergen nuestros ojos.

En la visión natural ambas distancias coinciden, sin embargo, cuando se visiona contenido estereoscópico las imágenes que forman el par se disponen sobre el plano de visualización, ya sea pantalla o un medio impreso, que define la ventana estereoscópica. Nuestros ojos tienden a enfocar a este plano, mientras que las diferencias de paralaje obligan a nuestros ojos a converger, tanto por delante, como por detrás de la ventana estereoscópica. Este desajuste entre distancia de acomodación y vergencia es algo que no se produce de manera natural en nuestro sistema visual y según la magnitud del desajuste puede causar desde fatiga visual a visión borrosa y diplopía. Según Lambooj et al. (2009), si el desajuste es elevado los procesos mentales que establecen la relación natural entre acomodación y vergencia arrastran al cristalino a enfocar fuera de la ventana estereoscópica, por lo que se produce visión borrosa antes de llegar a la diplopía.

El conflicto entre acomodación y vergencia es un problema que también se produce cuando se utilizan lentes correctoras de la visión, como las de presbicia o vista cansada. Donders (1864) fue el primero en medir lo que se ha denominado la Zona de Visión Binocular Nítida (*Zone of Clear Single Binocular Visión*), ZVBN en adelante, definida como el conjunto de distancias de vergencias, para cada distancia de enfoque, dentro de las que el observador mantiene la fusión binocular. Percival (1892) y Sheard (1934) definieron una zona de confort, relacionada con la ZVBN y sus estudios han sido tomados como referencia en investigaciones como las de Emoto et al. (2005) y Hoffman et al. (2008), para solucionar el problema del confort estereoscópico. Sin embargo, para Lambooj et al. (2009), esto no tiene demasiado sentido puesto que la medición de la ZVBN se realiza produciendo un desajuste entre acomodación y vergencia mediante prismas ópticos, lo que difiere perceptualmente del problema que se presenta en la estereoscopia, por ello se plantea la necesidad de establecer la zona de confort visual mediante estímulos estereoscópicos presentados al natural.

8.1.3. Los defectos accidentales de la toma

Si la toma estereoscópica se realiza con dos cámaras independientes pueden producirse algunos defectos accidentales, como alturas de toma diferentes o ligeras rotaciones por una nivelación incorrecta, que de no corregirse, podría ocasionar una distribución de paralajes incoherente, pudiendo llegar a producirse paralajes con componente vertical que, aunque nuestro cerebro puede asimilarlos (recordemos que las zonas de Panum son elípticas con eje mayor horizontal), serían susceptibles de producir fatiga visual.

8.1.4. El efecto Keystone

Al ver los criterios establecidos por los pioneros de la estereoscopia nos hemos referido con frecuencia al caso de dos cámaras convergentes hacia el sujeto. Si los pares obtenidos bajo tales circunstancias son observados en un estereoscopio de brazos articulados, como el modificado por Wheatstone, esto no causaría ningún problema porque los brazos se ajustarían con el mismo ángulo de convergencia que el de las cámaras y el par quedaría perfectamente orientado con respecto al espectador. Sin embargo, si las imágenes se disponen para ser visualizadas sobre un mismo plano, caso de una pantalla o medio impreso, se producirá un error de perspectiva puesto que las imágenes no se mostrarán ante los ojos como es debido, sino que se producirá una distorsión de perspectiva similar a la que causaría un proyector cuyo eje óptico no fuera perpendicular a la pantalla de proyección.

Esta distorsión es conocida como efecto *Keystone* (pieza clave de un arco) o también *Tombstone* (lápida), en alusión al efecto de distorsión trapezoidal que se produce en el contorno de la imagen.

Este efecto, aparte de producir una imagen retiniana ligeramente distorsionada, provoca componentes verticales en el paralaje, que se acusan más en las zonas perimetrales de la imagen (Fig. 8.1, izquierda).

Para evitar el efecto *keystone*, podemos optar por dos vías; la primera sería realizar una transformación proyectiva de las imágenes que configuran el par, para eliminar las distorsiones que se generan en la retina y lograr un paralaje horizontal. Esta transformación proyectiva recibe técnicamente el nombre de epipolarización del par y puede resolverse automáticamente a partir de algoritmos incorporados en el software de tratamiento de imágenes específico, que veremos posteriormente, o mediante otros algoritmos de homología como los que se describen en la Tesis Doctoral de José Luís Denia Ríos (Denia, 2011).

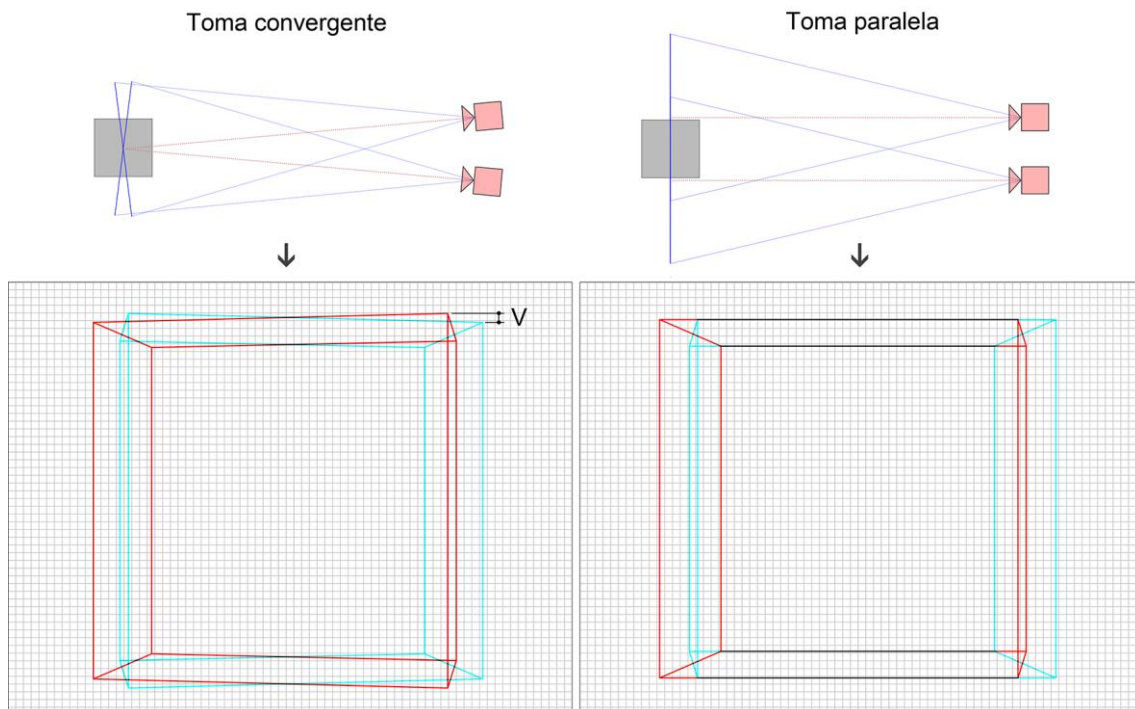


Fig. 8.1. El efecto *Keystone* lleva implícito componentes verticales en el paralaje. Pedro Cabezos

La otra vía, más aconsejable desde mi punto de vista, es optar por una configuración de cámaras en la que los ejes ópticos de los objetivos no son convergentes sino paralelos (Fig. 8.1, derecha), tal como ocurre en el caso de una cámaras estereoscópica. Para conseguir el paralaje adecuado, respecto al plano de visualización, bastará realizar una traslación horizontal entre las imágenes que componen el par, en relación con la distancia de observación, cuya magnitud será discutida posteriormente.

8.1.5. Las interferencias o Ghosting

En ocasiones, dependiendo del medio de visualización empleado, pueden ocasionarse interferencias entre las imágenes que forman el par, es decir, puede verse un rastro de la imagen que no le corresponde que aparece como una sombra o fantasma, de ahí que a este problema se le haya denominado *Ghosting* o también *Crosstalking*.

Este problema suele provocar cierta incomodidad y puede llegar a dificultar la fusión. Es un fenómeno independiente de las condiciones de toma, porque obedece a una carencia o defecto del propio método de visualización. Más adelante veremos que el método de visualización mediante anaglifos tiene este problema, sobre todo cuando se imprimen, por lo que he analizado este problema en profundidad y he desarrollado un método de optimización para eliminar el efecto *Ghosting* en la impresión de anaglifos, que será expuesto más adelante.

8.1.6. El parpadeo o Flickering

Este problema también es inherente al medio de visualización, concretamente a los métodos de barrera activa que de manera sincronizada con la pantalla y con una frecuencia muy alta, eclipsan por un breve espacio de tiempo y de modo alterno la visión de uno de los ojos para mostrar al otro la imagen del par correspondiente. Esta alternancia puede traer consigo un efecto de parpadeo si las frecuencias están por debajo de la que es capaz de detectar el ojo, lo que resulta muy molesto y puede producir fatiga visual. Por fortuna, con el perfeccionamiento de los medios actuales este problema se ha erradicado.

8.1.7. La rivalidad retiniana

La rivalidad retiniana surge cuando el cerebro recibe de las retinas dos estímulos que difieren por completo o también cuando las diferencias se dan en algunos aspectos de los estímulos como pudiera ser la intensidad luminosa o el color. Ante estas diferencias el cerebro trata de buscar correspondencias que le lleven a fusionar los estímulos, pero, cuando no las encuentra, se produce una rivalidad por predominar el uno sobre el otro. Nuestra mente no produce una mezcla al 50%, sino que suele generar una extraña combinación en la que los estímulos se muestran separados por zonas del campo visual, repartidos sin una ley concreta que puede variar en el tiempo, como la disposición que muestra la Fig. 8.2. También podría predominar totalmente uno de los estímulos y producirse una alternancia en el tiempo entre ambos (Ramachandran et al., 2012)

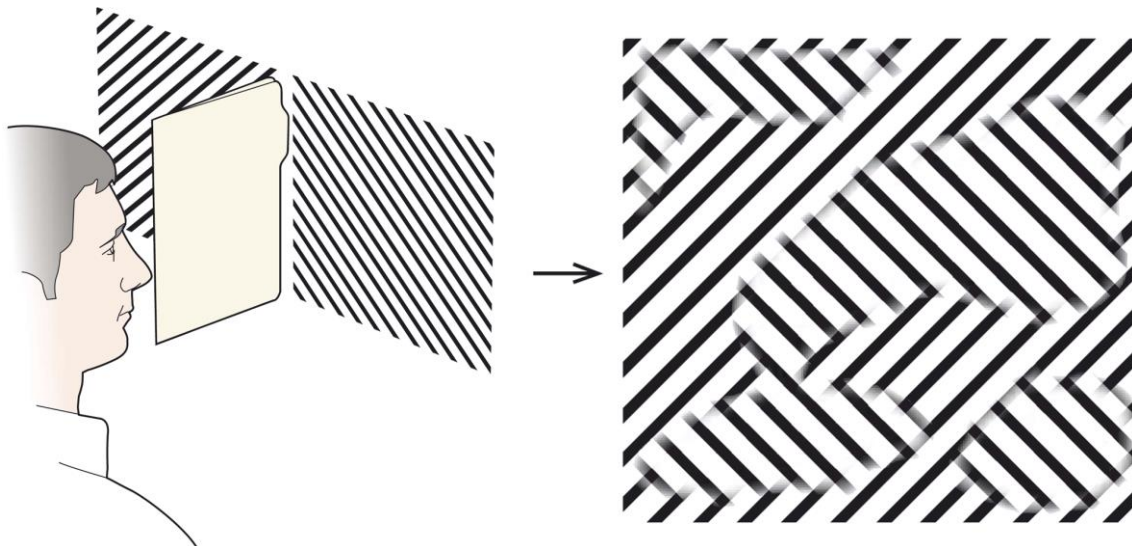


Fig. 8.2. Rivalidad retiniana. El espectador jamás verá una retícula sino una agrupación por zonas o una dominancia fija o alternada en el tiempo de los patrones. Adaptado de Ramachandran et al. (2012)

En la práctica de la estereoscopia son frecuentes los casos de rivalidad retiniana producidos por diferencias de exposición acusadas entre las tomas, lo que debe

evitarse. También pueden darse problemas de rivalidad retiniana en el método de los anaglifos cuando hay objetos en la escena de un color coincidente al de las gafas de filtrado, pues la información de este objeto pasa sólo a uno de los ojos, sin embargo, esto puede solucionarse, tal como veremos, aplicando algoritmos de optimización del color como el desarrollado por Dubois (2001).

8.1.8. Las discrepancias de profundidad de campo

El ojo produce, al igual que una cámara fotográfica, una profundidad de campo determinada por la distancia focal del ojo, el tamaño de la pupila y la distancia de acomodación, tal como ya vimos en el capítulo de la percepción del relieve.

Gracias al efecto de la profundidad de campo se desenfocan las zonas alejadas del punto de acomodación, lo que actúa como un sistema que permite al cerebro prescindir de la información que queda desenfocada y por tanto de la visión dioplóica de aquellos puntos que quedan fuera de los límites fusionales.

No ocurre lo mismo cuando se pone ante los ojos del observador un par estereoscópico con exceso de profundidad de campo, ya que se aumenta la probabilidad de producir incomodidades visuales e incluso diplopia, si la escena es muy profunda.

Simular la profundidad de campo natural del ojo, facilitará la fusión, aunque tiene el inconveniente de limitar la atención del observador a una zona determinada de la imagen y puede resultar algo técnicamente complicado y engorroso cuando se utilizan cámaras convencionales. Cuando el par se genera de manera sintética a partir de una escena tridimensional, diseñada con programas de CAD, la simulación de la profundidad de campo es algo más sencilla puesto que en las cámaras virtuales se puede elegir libremente cualquier distancia focal y diafragma.

8.1.9. Las incongruencias perceptivas. Violación de la ventana estéreo

Cuando tenemos objetos con paralaje negativo, éstos se perciben por delante de la ventana estereoscópica y se debe procurar que el contorno de estos objetos no llegue a interferir con los bordes laterales de la ventana estereoscópica pues, como ésta se percibe por detrás de ellos, el hecho que la ventana pudiera ocultarlos parcialmente daría pie a una incongruencia perceptiva conocida como violación de la ventana estereoscópica, en la que se contradicen dos claves de profundidad; la clave monocular de oclusión, producida por el marco de la ventana estereoscópica con respecto al objeto, resulta incompatible con la clave de disparidad binocular que le sitúa por delante de la ventana.

En la Fig. 8.3, izquierda, se muestra un caso de violación de la ventana estereoscópica; pese a que el paralaje del objeto es negativo, la clave de oclusión es

tan fuerte que el objeto tiende a percibirse detrás de ésta. Puede llegar a producirse cierta incomodidad, al mirar hacia el margen izquierdo de la imagen, a causa del efecto de rivalidad retiniana que lleva asociado esta situación.

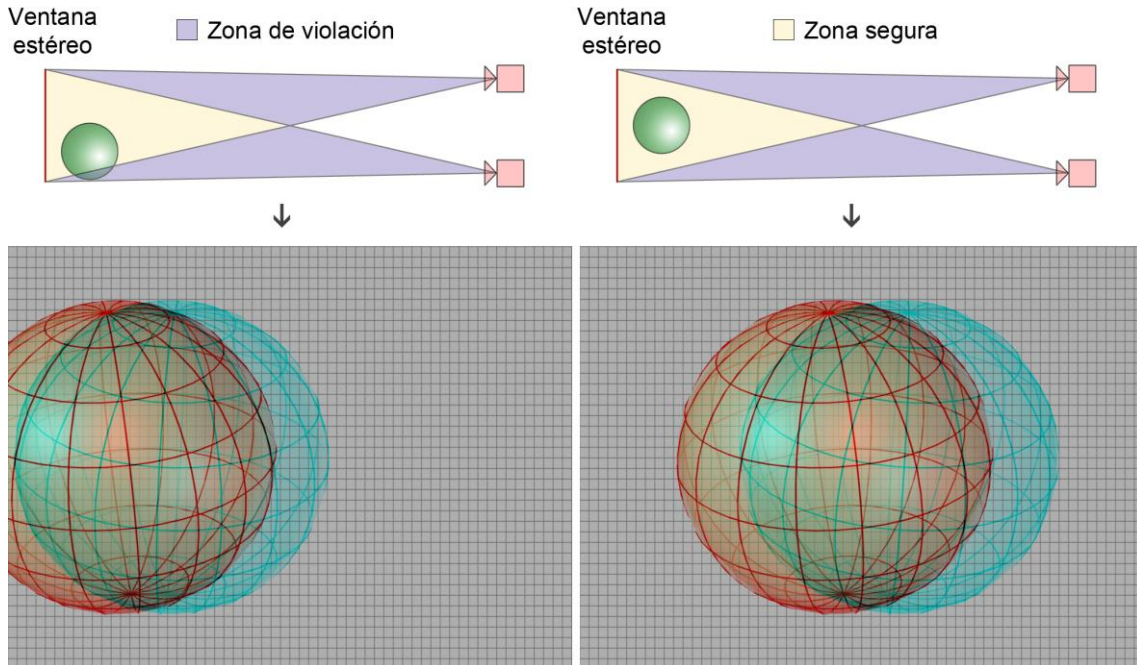


Fig. 8.3. Violación de la ventana estereoscópica (izda.). Encuadre correcto (dcha.). Pedro Cabezos



En la parte derecha se ha realizado un encuadre adecuado y el objeto sobresale de la ventana estereoscópica sin causar mayor problema. Tal como señala Mendiburu (2009), la violación de la ventana estereoscópica es uno de los errores que mayor incomodidad visual produce, por detrás de otros como la separación inadecuada entre cámaras o el uso de una convergencia inadecuada.

8.2. La zona de confort visual

Las investigaciones recientes más relevantes en el tema de confort visual son las de Hoffman et al. (2008), Lambooi et al. (2009), Shibata et al. (2011) y Wa et al. (2011), en ellas se trata de establecer las condiciones de confort visual a partir de las experiencias de visualización realizadas a un grupo de sujetos.

Las pruebas consisten en presentar a los observadores una variada serie de estímulos estereoscópicos, que son visualizados a distintas distancias de observación.

Con estos ensayos se analizan y valoran tanto las respuestas subjetivas (síntomas y grado de confort estimado en una escala de 1 a 5 a través de un cuestionario), así como las objetivas (signos fisiológicos medibles que delatan la fatiga visual del observador). Mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos se trata de delimitar los estímulos que quedan dentro de un margen de visión confortable y se

define la denominada Zona de Confort Visual (*Zone of Comfortable Viewing*), ZCV en adelante.

Actualmente no existe un consenso a la hora de describir la ZCV, sino que cada investigador la define en función de los parámetros que estima más oportunos. Por ello nos encontraremos con diferentes maneras de expresar la ZCV y considero que es necesario acometer un estudio para comprobar las diferencias entre las propuestas más relevantes.

Algunos investigadores como Hiruma et al. (1993), Yano et al. (2002) y Nojiri et al. (2003), sugieren que la ZCV puede delimitarse restringiendo la profundidad de campo de la escena y expresan sus límites en dioptrías (D), no para expresar el poder refractivo de una lente, como en optometría, sino como una manera de expresar la distancia como la inversa de la distancia de observación, de tal manera que una distancia de observación de 2 m, expresada en dioptrías, equivale a 0.5D. Estos autores proponen delimitar la profundidad de campo a unos límites entre $\pm 0.2D$ y $\pm 0.3D$, así para una distancia de observación de 3 m (0.33D), si optamos por un rango de $\pm 0.2D$, el límite próximo de nitidez estaría en 0.53D (1.87 m) y el lejano en 0.13D (7.5 m).

Otra manera de establecer la ZCV, consiste en establecer límites para el paralaje con el fin de situarnos dentro de un margen confortable con respecto a los límites de fusión impuestos por las áreas de Panum y con el que se evitan también los problemas derivados del desajuste entre vergencia y acomodación. Investigadores como Yano et al. (2002), Speranza et al. (2006), Kuze et al. (2008) y Lambooi et al. (2009), proponen expresar los límites de paralaje en grados, para adecuarlo fácilmente a cualquier distancia de observación y coinciden en establecer un límite absoluto de paralaje de 1° , tanto para el paralaje positivo (p^+), como para el negativo (p^-), de modo que el límite de paralaje, definido por un ángulo de 1° , para una distancia de observación (d), equivale a la cuerda de un arco de radio d , que abarca un ángulo de un grado, por tanto, $p^+ = p^- = 2 \cdot d \cdot \tan \frac{1}{2}$

Shibata et al. (2011) expresan de cuatro maneras diferentes la ZCV, tal como se desprende de su estudio (Fig. 8.4). En función de la distancia de observación, se cuantifica:

- A – Los límites de vergencia ocular próximos y lejanos expresados en dioptrías
- B – Los límites de vergencia ocular próximos y lejanos expresados en metros
- C – Los límites de paralaje cercano (negativo) y lejano (positivo) expresados en metros
- D – Los límites de paralaje cercano (negativo) y lejano (positivo) expresados en grados

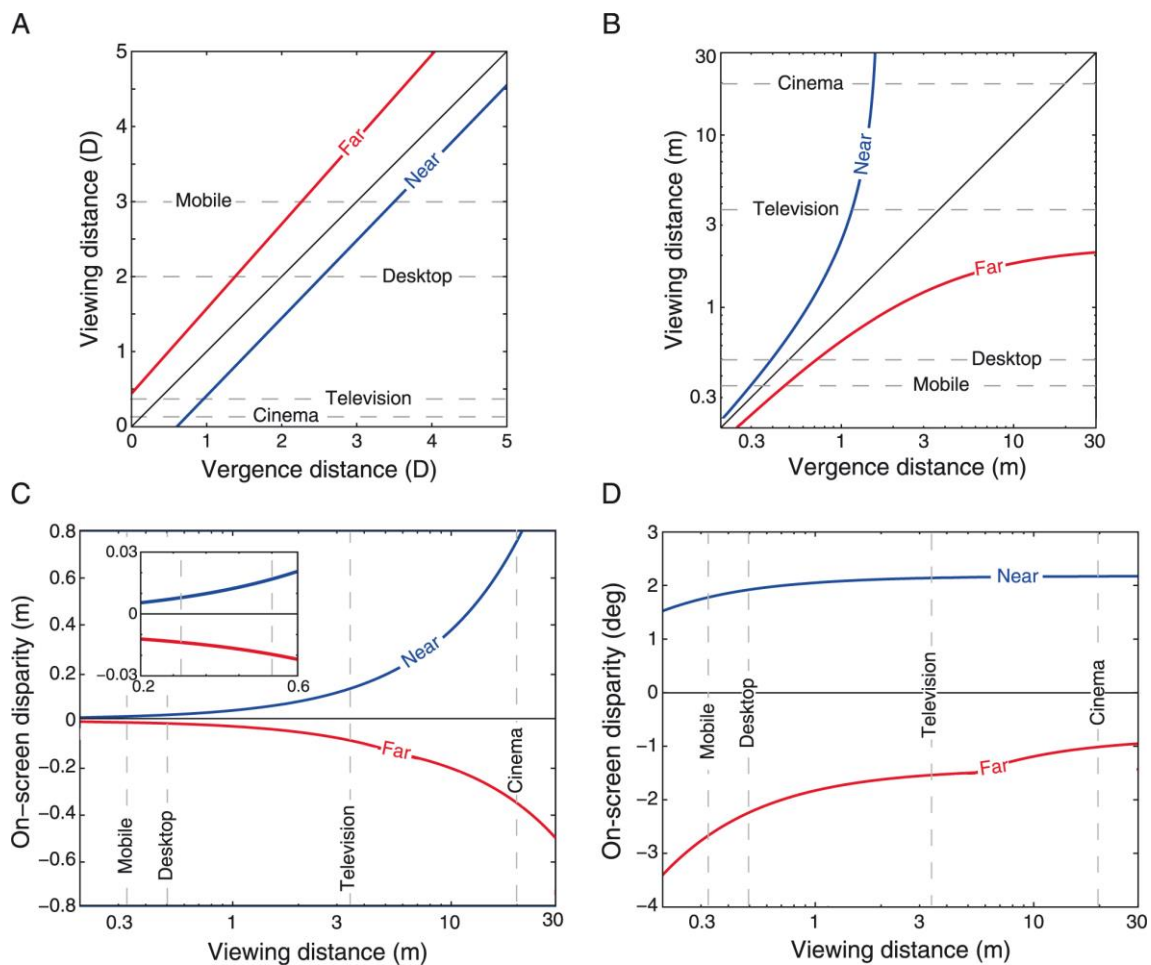


Fig. 8.4. Zona de Confort Visual expresada en función de varios parámetros. (Shibata et al. 2011)

Otros autores como Mendiburu (2009) expone los criterios adoptados por los cinematógrafos estereoscópicos de la vieja escuela, que gracias a su experiencia establecieron unos límites de paralaje confortables en base a un porcentaje del tamaño de la pantalla que estimaron del 1%, sin embargo, este porcentaje puede resultar muy restrictivo para un entorno de visualización más próximo que el del cine. Por ello Clark (2010) propone para estos casos un valor de paralaje absoluto del 3% del tamaño de la pantalla.

Para condiciones de visualización de salas de cine (pantalla de 9 metros y una distancia de observación óptima de unos 18 m), Mendiburu prefiere establecer la ZCV, en base a un valor de paralaje óptimo que denomina Paralaje Nativo (*Native Pixel Parallax*) que se corresponde con el número de píxeles en la pantalla de proyección que equivalen a la distancia interpupilar media. Mendiburu considera que este valor de paralaje resulta muy confortable para la mayoría de situaciones, pero pueden emplearse valores superiores (hasta cuatro veces el paralaje nativo, en paralaje negativo, y hasta el doble éste, en paralaje positivo), en ciertos momentos de la acción

y por breves periodos de tiempo con el fin de dinamizar las sensaciones de relieve y romper la monotonía.

Como puede verse, todas estas teorías acerca de la ZCV, definidos según los según los criterios de cada autor, nos ofrecen un abanico de posibilidades por el que podemos optar, pero, tal como señala Shibata et al. (2011), no parece muy lógico definir la ZCV de manera tajante mediante una delgada línea que separa la zona confortable de la que no lo es. Por ello los límites deben entenderse con una cierta holgura y señala que sería más acertado hablar de la Zona de Confort visual Continua ZCVC como la mostrada en la Fig. 8.5, donde las líneas blancas más gruesas representan los límites estrictos definidos en su estudio, dentro de los que debería encontrarse la zona más dulce del confort visual, cuyo máximo se situaría sobre la línea en la que distancia de vergencia y acomodación coinciden, la denominada línea de Donders, representada en rojo sobre el esquema.

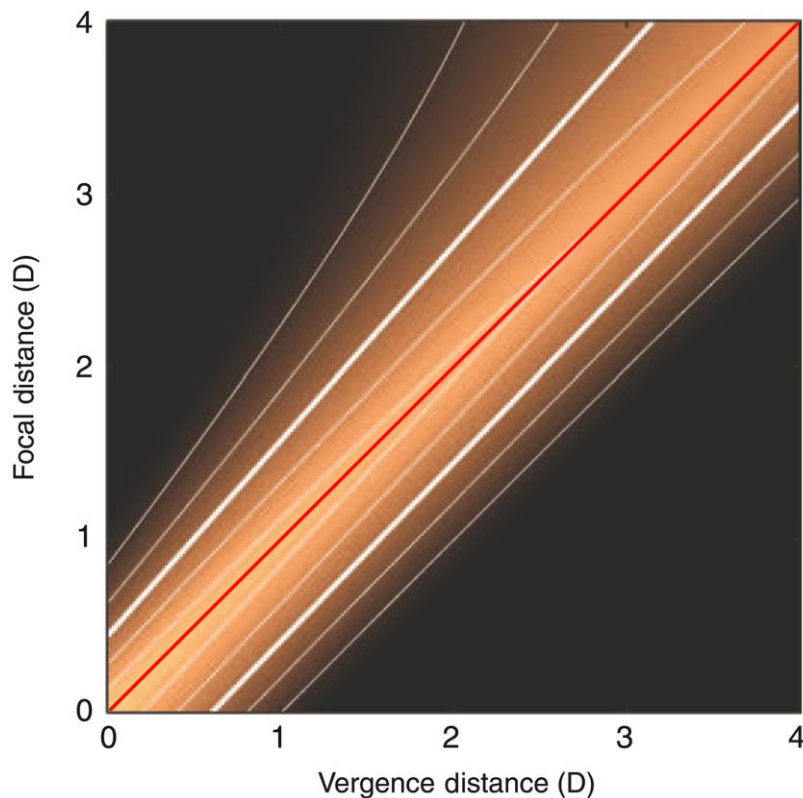


Fig. 8.5. Zona continua de confort visual. (Shibata et al., 2011)

Mendiburu (2009) también expresa esta idea con un diagrama (Fig. 8.6), que, en mi opinión, describe de manera muy acertada la ZCVC para unas determinadas condiciones de visualización. En él se utiliza un gradiente de tonos entre el blanco y negro para señalar gradualmente las zonas más confortables (color Claro) y las más incómodas (color oscuro). Sin embargo, he de advertir que en este esquema la idea del autor es la de transmitir el concepto y no la de representar exactamente la zona, ya que la banda más clara del gradiente debería situarse justo sobre la ventana

estereoscópica y no por detrás como aparece en el esquema, tampoco la distancia de observación y el tamaño de pantalla se corresponde con las condiciones de una sala de cine, pero esto mejora la lectura del esquema.

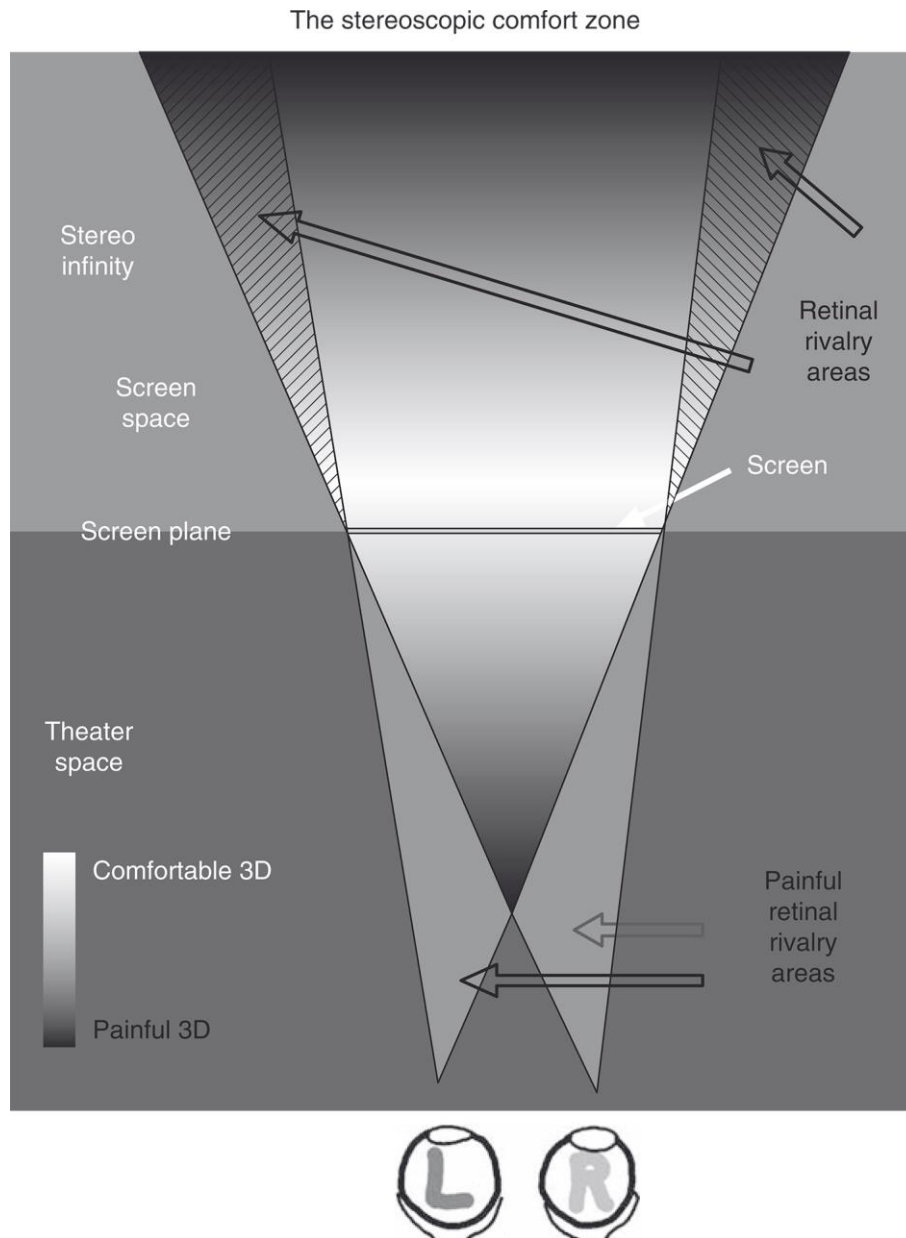


Fig. 8.6. La Zona de Confort Visual Continua. (Mendiburu, 2009)

Esta forma de definir la ZCV resulta muy interesante pues, si la consideramos desde el punto de vista de la captura, con ella podemos imaginarnos las posiciones extremas de los objetos próximos y lejanos que producen un paralaje compatible con el confort visual. Esto es lo que Mendiburu denomina *Depth Bracket*, a lo que podríamos referirnos como rango de profundidad confortable.

Para comparar las diferentes propuestas que han sido expuestas, se ha realizado un esquema gráfico (Fig. 8.7) que representa las distancias límites de vergencia ocular

para cada una de las distancias de visionado habituales (Lectura/Tablet, PC, TV y Cine). Se ha excluido la propuesta que propone acotar la profundidad de campo porque sus parámetros no son directamente comparables con las restricciones de paralaje impuestas en el resto de los casos.

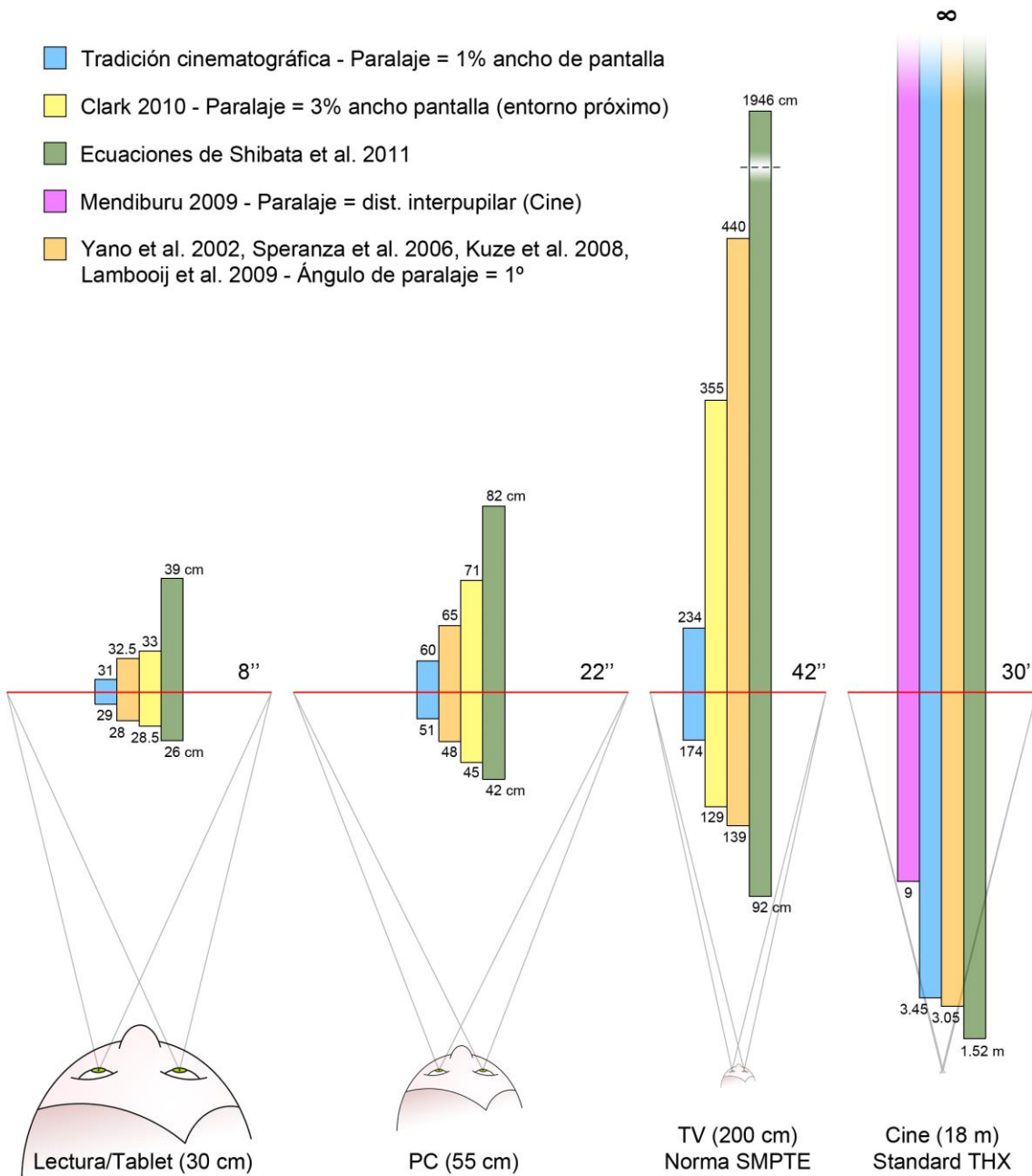


Fig. 8.7. Distancias de vergencia ocular extremas según los límites de confort establecidos por cada una de las propuestas estudiadas. Pedro Cabezos

La Fig. 8.7 pone de manifiesto una cierta heterogeneidad entre las propuestas y también que el margen de profundidad confortable es exiguo con distancias de observación próximas y se estira a medida que aumenta la distancia entre el observador y la pantalla.

Salta a la vista que algunos de los planteamientos son más adecuados a una determinada distancia de observación; la regla cinematográfica del 1% (azul) resulta muy restrictiva en entornos próximos, en comparación con el resto, mientras que la corrección realizada por Clark (2010) (amarillo), resulta más pareja con la limitación del ángulo de paralaje (anaranjado).

Sería interesante disponer de los medios adecuados para hacer un ensayo propio con un grupo de observadores numeroso a los que mostrar estímulos con el paralaje límite de cada una de la propuestas y poder evaluar con más objetividad su validez, lo que, sin duda, abriría una nueva línea de investigación para el futuro, pero si he de emitir un juicio, basado en mi experiencia, me atrevería a señalar que, en entornos de visualización próximos, me parece muy acertada la propuesta de Shibata et al. (Verde), mientras que limitar el paralaje angular a 1° (anaranjado) puede resultar algo conservador.

En el caso del cine, no puedo aportar una opinión basada en mi experimentación con material propio, ya que no he tenido acceso a pantallas tan grandes, por lo que mi experiencia es la de un espectador, que de vez en cuando se quita las gafas en el cine para evaluar el paralaje de la toma. En este sentido, los parámetros que se utilizan en el cine estereoscópico actual me resultan, en general, confortables, sobre todo, si uno se sitúa en la zona central de la sala, pues las posiciones próximas a la pantalla pueden resultar más molestas, ya que el observador obtiene una disparidad retinal mayor. También habría que evitar las posiciones descentradas que provocan distorsiones elevadas del relieve, tal como tendremos ocasión de comprobar más adelante. Los argumentos de Mendiburu (magenta) me parecen lógicos y acertados, además de estar avalados por su experiencia en el campo.

El estudio de la ZCV resulta de sumo interés, puesto que la usaremos como un condicionante en el cálculo de la separación entre cámaras en el momento de la toma, junto con los preceptos expresados por los padres de la estereoscopia.

El próximo capítulo recoge las conclusiones extraídas y propone un método para calcular los parámetros de la toma estereoscópica en función de las condiciones de visualización y nuestra voluntad como estereógrafos de recrear el relieve de una determinada manera.

9. LA TOMA ESTEREOSCÓPICA

En este capítulo se desarrolla una metodología personal para definir las condiciones de la toma estereoscópica que conjuga los diferentes enfoques y planteamientos estudiados previamente.

Esta metodología pretende ir mucho más allá de una simple norma, como la del treintavo de la distancia, o la de utilizar alguno de los programas de cálculo estereoscópico que actúan como una caja cerrada y ofrecen una solución única sin mencionar el criterio adoptado, cuando lo primero que debemos tener presente es que la solución no es única, sino que dependerá de la intención perceptiva que queramos transmitir al espectador.

La toma de decisiones que determina las condiciones de la toma estereoscópica empieza conociendo ciertos datos de partida, como los que se desprenden de las condiciones de visualización, que habrán de conjugarse con nuestra intención de representar la escena dentro de un volumen perceptivo que respete los límites de confort visual.

9.1. Las condiciones de visualización

De las condiciones de visualización se derivan ciertos parámetros fundamentales como la distancia de observación d , la distancia interpupilar media considerada i , el campo visual φ y el ángulo de convergencia ocular θ (Fig. 9.1).

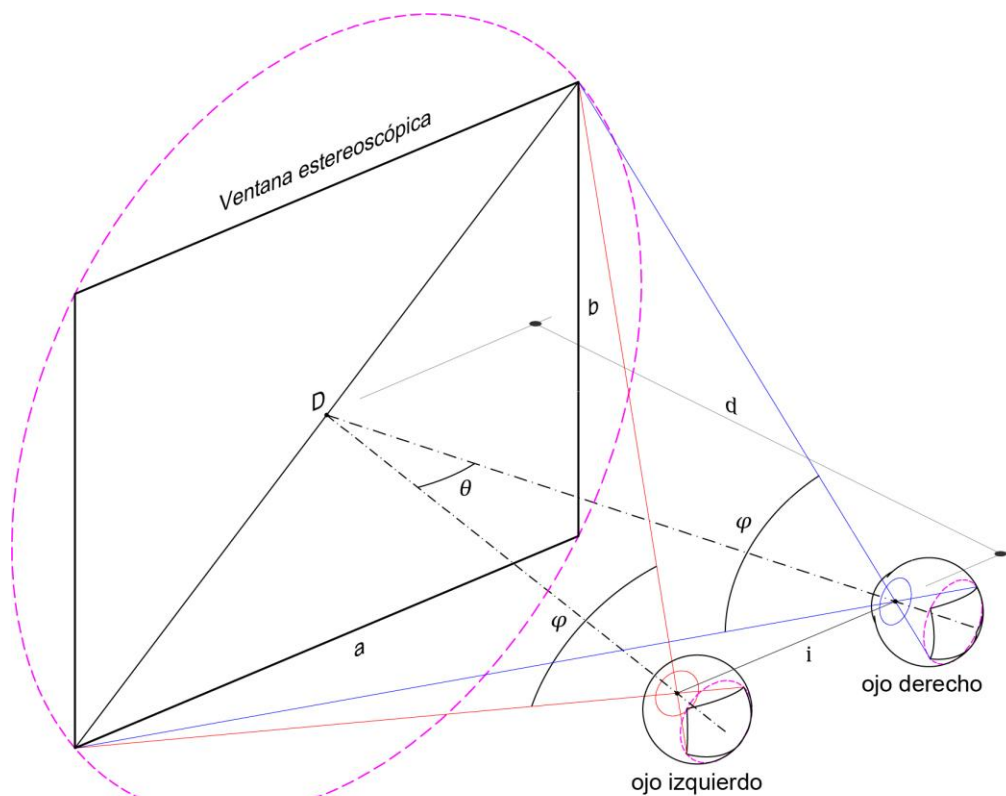


Fig. 9.1. Parámetros definidos por las condiciones de visualización. Pedro Cabezos

9.1.1. La distancia de observación

Prever la posición exacta del observador no siempre es algo sencillo, sobre todo en el caso del cine o la televisión, por lo que podemos acudir a estándares como el SMPTE, desarrollado por la Society of Motion Picture and Television Engineers, fundada en 1916, y el THX, creado por Lucasfilm en 1983. Estos estándares proporcionan una serie de pautas como la posición adecuada del espectador en relación a una pantalla de un determinado tamaño.

El estándar SMPTE acota los límites de proximidad y lejanía mediante el ángulo de visión horizontal con el que el observador contempla la pantalla y establece que la distancia de observación óptima, para una experiencia inmersiva, es aquella que proporciona un ángulo de visión horizontal de $43,4^\circ$. Las distancias máximas y mínimas son aquellas que producen un ángulo de 30° y $61,8^\circ$ respectivamente.

El estándar THX expresa también la posición del observador según el ángulo de visión horizontal y considera que el valor óptimo se corresponde con un ángulo de 36° , mientras que sitúa el límite lejano a una distancia correspondiente a un ángulo de 26° . Este estándar no marca un límite de proximidad como el SMPTE.

Bajo mi punto de vista, sería más práctico establecer las distancias de observación en relación al tamaño de la pantalla, por lo que en la Fig. 9.2 se muestra un esquema con las correspondencias referidas al ancho de la pantalla **A**.

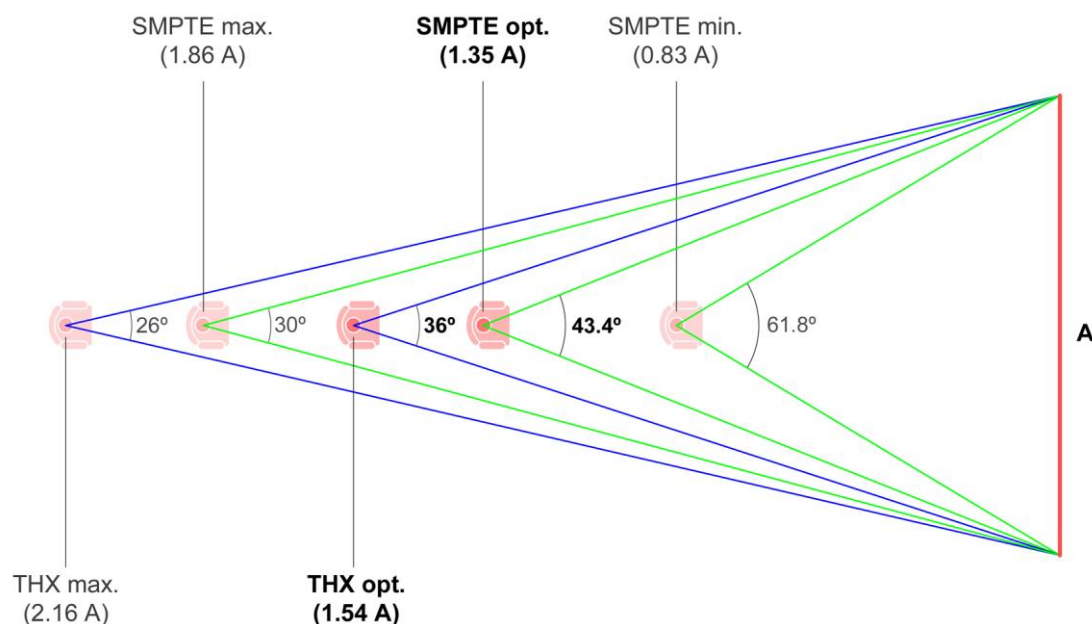


Fig. 9.2. Distancias de observación según los estándares THX y SMPTE y su correspondencia referida al ancho de la pantalla. Pedro Cabezos

En fotografía se ha considerado tradicionalmente que la distancia óptima para observar la copia impresa, también llamada distancia “normal” de observación, coincide aproximadamente con la diagonal de ésta.

Esto puede justificarse porque cuando contemplamos una fotografía o un cuadro tendemos a situarnos de forma que la imagen abarque una zona de visión óptima dentro de nuestro campo visual binocular, que nos permita recorrer con la mirada el objeto, mediante ligeros movimientos oculares y sin tener que mover la cabeza. Smardon et al. (1986) consideran que este margen de visión central abarca un ángulo de visión de entre 40 y 60°.

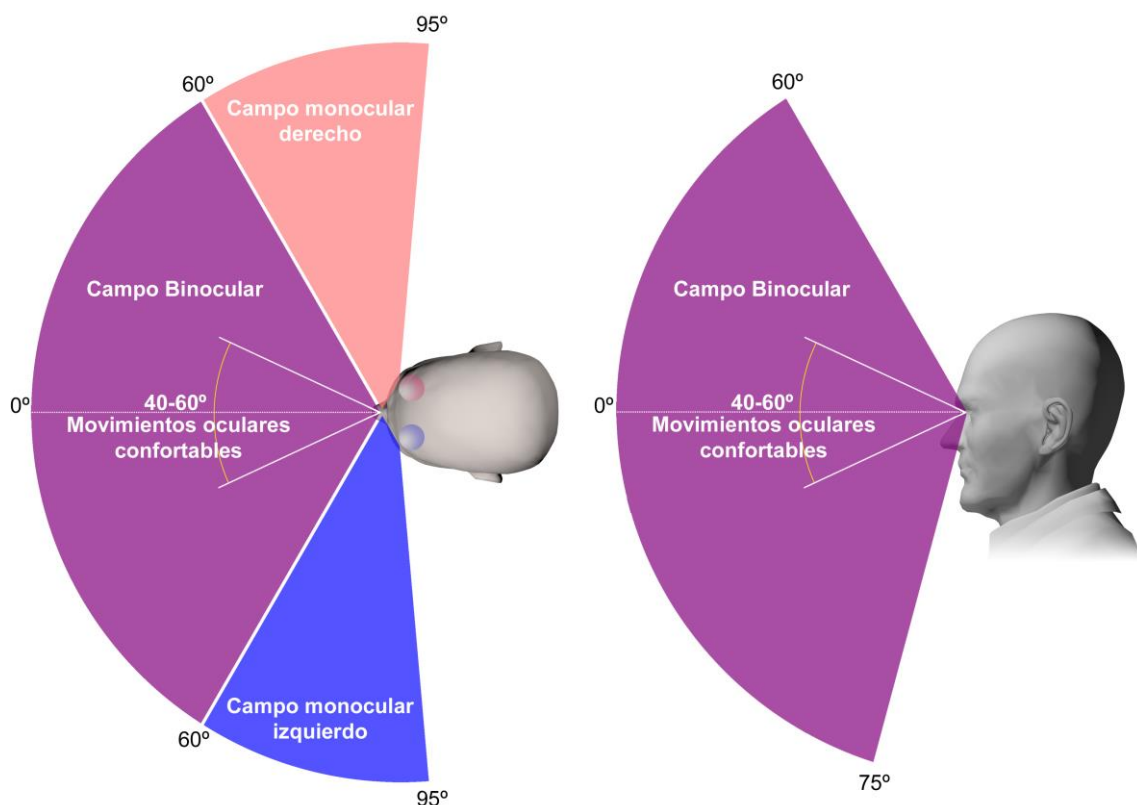


Fig. 9.3. Campo visual horizontal y vertical. Pedro Cabezos

Con una distancia de observación “normal”, el motivo queda dentro de un cono visual de aproximadamente 53°, dentro del margen confortable para la observación, de ahí que se denominen objetivos “normales” a aquellos cuya distancia focal proporciona un ángulo de visión equivalente al que se produce al contemplar la copia a una distancia de observación “normal”.

Al margen de la estereoscopia, cuando se contempla una fotografía, realizada con un objetivo “normal”, a una distancia de observación “normal”, las distancias aparentes se perciben correctamente, pues el observador se sitúa en la posición del punto de vista desde el que fue obtenida la fotografía.

La distancia focal de los objetivos que podemos considerar como “normales” dependerá del tamaño de la película o el sensor digital, pues ésta debe coincidir, aproximadamente, con la diagonal del soporte que capta la imagen. En el caso del formato tradicional de 35 mm (36x24 mm), la diagonal mide 43.3 mm, por tanto, un objetivo “normal”, para este formato, será aquel cuya distancia focal se aproxime a este valor. Tradicionalmente se ha considerado que un objetivo de 50 mm es el objetivo normal por excelencia, opinión derivada de la decisión de Oskar Barmak, creador de la primera cámara de 35 mm, la Leica I.

Tras la aparición de las cámaras digitales, se ha denominado sensores de cuadro completo o *full frame*, a aquellos que tienen el mismo tamaño que la película fotográfica tradicional de 35 mm, mientras que se han estandarizado otros sensores de tamaño más reducido que abarcan un menor ángulo de visión y han ocasionado el uso de los factores de multiplicación para calcular las equivalencias entre las distancias focales.

En el caso de la lectura, muchos optometristas consideran que la distancia de observación adecuada es la denominada distancia de Harmon modificada, que equivale a la distancia entre el codo y el nudillo o primera falange del dedo índice. Al tratarse de una medida antropométrica, es proporcional al tamaño del observador.

Aparte de las consideraciones acerca de la estimación de la distancias de observación, se debería advertir siempre al espectador de la distancia considerada con el fin de que éste tenga una percepción correcta del relieve y sin distorsiones derivadas de una incorrecta posición de observación, aunque en el caso de proyecciones con multitud de espectadores, sólo uno de ellos podrá situarse en la posición óptima de observación, por lo que se tratará de colocar al resto de espectadores en la posición más próxima a la adecuada.

9.1.2. La distancia interpupilar media

Ya vimos que desde un primer momento tanto Wheatstone como Brewster asumieron una distancia interpupilar media equivalente a 2.5 pulgadas, unos 6.35 cm, lo que ha sido corroborado como válido en estudios posteriores específicos como los de French (1921) y Dodgson (2004). Por comodidad se puede adoptar un valor de la distancia interpupilar media de 64 mm, ya que este redondeo resulta insignificante a efectos de precisión.

Las ligeras desviaciones particulares de cada espectador con respecto a la distancia media suele ser pequeña, excepto en el público infantil, cuya separación interpupilar es menor, lo que les llevará a percibir un relieve algo más pronunciado, pues la disparidad retinal producida por el paralaje es mayor.

9.1.3. El ángulo de visión

El ángulo de visión dependerá de la distancia de observación y del tamaño de la ventana estereoscópica. Conocer este ángulo nos permitirá elegir una lente adecuada para la toma.

Lo usual será emplear un objetivo que exceda ligeramente este campo de visión, por lo que posteriormente se deberá realizar un recorte de las imágenes obtenidas para adecuarlas exactamente al ángulo de visión definido por las condiciones de visualización, en aras de mantener una correcta percepción de las proporciones volumétricas y de las distancias aparentes. Si no se practicara este recorte aparecerían las distorsiones a las que hacía referencia Claudet; recordemos que usar lentes de mayor distancia focal disminuye el relieve de la escena, mientras que utilizar objetivos de menor distancia focal produce una exageración del efecto de relieve y, en ambos casos, una distorsión de las proporciones volumétricas de la escena.

El ángulo de visión φ , que se desprende de las condiciones de visualización, será el que abarca el cono visual que inscribe la ventana estereoscópica y se puede calcular de la siguiente manera:

$$\varphi = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2 \cdot d} \right)$$

Siendo:

φ , ángulo de apertura del campo visual

a , ancho de la ventana estereoscópica

b , alto de la ventana estereoscópica

d , distancia entre el observador y la ventana estereoscópica

9.1.4. La convergencia ocular

Este valor sólo será relevante si optamos por una configuración de toma con ejes convergentes. La convergencia ocular queda definida por la distancia de la ventana estereoscópica a los ojos y esta puede calcularse según la expresión:

$$\theta = 2 \cdot \arctan \left(\frac{i}{2 \cdot d} \right)$$

Siendo:

θ , ángulo de convergencia ocular

i , distancia interpupilar

d , distancia entre el observador y la ventana estereoscópica

9.2. El planteamiento estereoscópico

El planteamiento estereoscópico se refiere a la decisión de alterar o no la escala perceptiva de la escena, es decir, de optar por un planteamiento ortoestereoscópico, como el que defendía Brewster, en el que los objetos se perciben de igual tamaño que los reales, o bien, inclinarse por un planteamiento hipo/hiperestereoscópico, en el que nos tomamos la licencia de alterar el tamaño con el que se percibe la escena.

Recordemos que en el planteamiento ortoestereoscópico la separación entre cámaras es igual a la distancia interpupilar, en el hiperestereoscópico la distancia entre cámaras es mayor, mientras que en el hipoestereoscópico es menor.

Debemos tener presente que en los tres planteamientos las proporciones volumétricas se mantienen, por lo que las distorsiones o exageraciones del relieve no se pueden achacar a la elección de un planteamiento u otro, sino a una incorrecta posición del observador o una mala disposición de las imágenes que configuran el par, como veremos más adelante.

Parece lógico pensar que el planteamiento ortoestereoscópico sea la opción más recomendable si se quiere ser fiel al tamaño real, pero como debemos de compatibilizar la separación entre cámaras con las condiciones de confort puede que, bajo determinadas condiciones de visualización, nos veamos forzados a cambiar el planteamiento inicial en aras de mejorar el confort visual o de aprovechar mejor el margen de profundidad confortable disponible.

Personalmente creo que es lícito alterar el tamaño con el que se percibe la escena y representarla de forma análoga a un modelo a escala, de hecho, Mendiburu (2008) afirma que el planteamiento hiperestereoscópico es el que se utiliza con más frecuencia en el cine y señala que la misión del estereógrafo es conseguir ajustar la percepción volumétrica de la escena al margen de profundidad que ofrece la sala de cine, estableciendo una separación de cámaras óptima.

El caso del planteamiento hipoestereoscópico es algo bastante menos frecuente, pues con ello se logra aumentar el tamaño perceptivo de la escena, por lo que sólo resulta de aplicación cuando se fotografían objetos de escaso tamaño, como en la fotografía macroscópica o incluso microscópica.

9.3. El margen de profundidad confortable

Conocidas las condiciones de visualización, podemos establecer de antemano el margen de profundidad confortable en el que deberíamos enmarcar la percepción de la escena. Para ello deberemos calcular la distancia límite próxima y lejana, con respecto al observador, derivada de los límites de paralaje, positivo y negativo, establecidos por los diferentes autores descritos en el capítulo anterior.

La distancia límite próxima y la lejana, pueden deducirse de la semejanza de triángulos derivada de la Fig. 9.4.

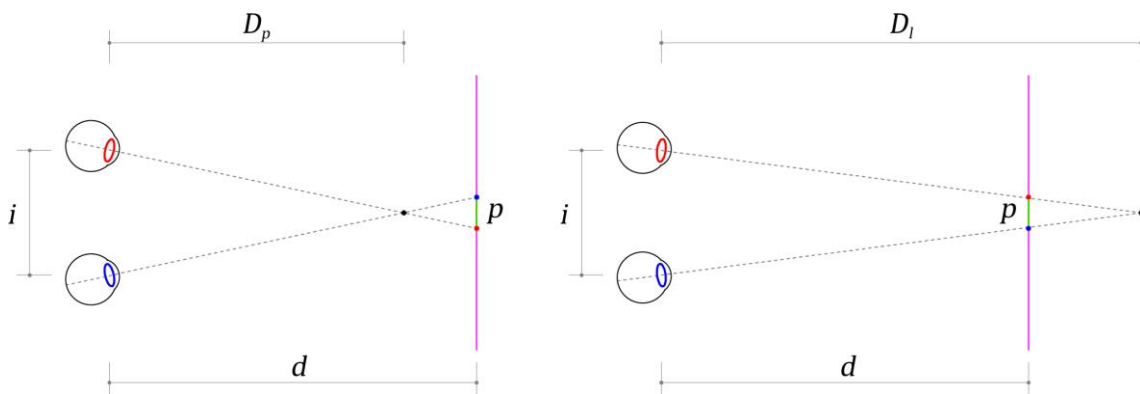


Fig. 9.4. Distancia límite próxima y lejana derivada de los límites de paralaje confortable. Pedro Cabezos

Operando y despejando se llega a las ecuaciones:

$$D_p = \frac{i \cdot d}{i + p^-}$$

Siendo:

- D_p , distancia límite próxima
- p^- , límite de paralaje negativo
- d , distancia de observación
- i , distancia interpupilar

$$D_l = \frac{i \cdot d}{i - p^+}$$

Siendo:

- D_l , distancia límite lejana
- p^+ , límite de paralaje positivo
- d , distancia de observación
- i , distancia interpupilar

Dadas estas ecuaciones, el cálculo de las distancias límites para cada una de las propuestas es sencillo, lo único que debemos obtener son los límites absolutos de paralaje que cada autor expresa en función de unos parámetros:

- En los casos derivados de la tradición cinematográfica, los límites de paralaje se definen como un porcentaje de pantalla, por tanto, $p^+ = p^- = \% a$, siendo a , la anchura de la pantalla. Recordemos que la regla expresada para proyecciones cinematográficas era la del 1%, mientras que para pantallas más pequeñas Clark (2010) proponía un valor del 3%.
- Yano et al. (2002), Speranza et al. (2006), Kuze et al. (2008) y Lambooij et al. (2009), coinciden en expresar el paralaje límite mediante el ángulo de paralaje α , de valor 1° , por tanto, los límites de paralaje, equivalen a la base de un triángulo isósceles, de ángulo del vértice α y altura d , cuyo valor se obtiene mediante la ecuación $p^+ = p^- = 2 \cdot d \cdot \tan(\alpha/2)$, siendo d , la distancia de observación.
- En las indicaciones ofrecidas por Mendiburu (2009), para las proyecciones cinematográficas, el límite de paralaje $p^+ = p^- = i$, siendo i , la distancia interpupilar. Pudiéndose llegar a picos de paralaje, durante cortos periodos de tiempo de valor $4i$, en paralaje negativo, y $2i$, en positivo.
- De las ecuaciones presentadas por Shibata et al. (2011), se desprende que el límite de paralaje negativo, expresado en metros, $p^- = (0.6048 \cdot d - 0.0338) \cdot i$, mientras que el paralaje positivo $p^+ = (0.3915 \cdot d + 0.1143) \cdot i$

Límites de paralaje confortable	
Tradición cinematográfica	$p^+ = p^- = \frac{a}{100}$
Clark (2010)	$p^+ = p^- = \frac{3 \cdot a}{100}$
Yano et al. (2002), Speranza et al. (2006), Kuze et al. (2008) y Lambooij et al. (2009)	$p^+ = p^- = 2 \cdot d \cdot \tan(\alpha/2)$
Mendiburu (2009)	$p^+ = p^- = i$ (valor óptimo general) $p^- = 4 \cdot i$ (máximo negativo) $p^+ = 2 \cdot i$ (máximo positivo)
Shibata et al. (2011)	$p^- = (0.6048 \cdot d - 0.0338) \cdot i$ (negativo) $p^+ = (0.3915 \cdot d + 0.1143) \cdot i$ (positivo)

Fig. 9.5. Valores límites de paralaje establecido por los diferentes autores estudiados

9.4. Las condiciones de campo

Una vez sobre el terreno, debemos determinar el punto de vista, ajustar la distancia focal y encuadrar la escena. Para poder determinar convenientemente la separación entre cámaras o distancia base, será necesario conocer las distancias entre la cámara y los puntos más próximos y lejanos que entran dentro del encuadre.

9.1.5. El encuadre

El encuadre en la fotografía estereoscópica se realiza de igual modo que en la toma fotográfica convencional, pero lo ideal es realizarlo desde la posición de “ojo cíclope” que, tal como su nombre sugiere, es la posición media entre las dos tomas que se realizarán más tarde.

En el encuadre influyen tanto la distancia focal como la proporción del formato del sensor o película, por lo que debemos procurar que la distancia focal ofrezca un ángulo de visión próximo al que habíamos establecido con las condiciones de visualización y que el sensor empleado tenga una relación de aspecto equiparable a la de la ventana estereoscópica.

9.1.6. La distancia Focal

Conviene obtener la imagen utilizando un objetivo cuya distancia focal nos proporcione un ángulo de visión algo mayor para tener cierto margen de maniobra para ajustar el paralaje adecuado entre las imágenes que componen el par y producir el recorte necesario para conseguir que la relación de aspecto y el ángulo de visión coincidan perfectamente con los que se derivan de las condiciones de visualización.

Los sensores de las cámaras fotográficas pueden tener una relación de aspecto 3:2 ó 4:3, pero para no tener que hacer distinciones entre uno u otro, consideramos para el cálculo el formato 4:3 lo que, a igualdad de anchura, nos proporciona un margen de seguridad adicional en la estimación de la distancia focal. El tamaño horizontal del sensor digital Sh , puede obtenerse de los datos técnicos de la cámara, o bien, conociendo el factor de multiplicación F de la cámara, en relación al formato de 35 mm (36x24 mm), siendo $Sh (mm) = 36/F$.

El cono visual, definido por la diagonal del sensor y el centro de perspectiva o punto nodal del objetivo, debe abarcar como mínimo el ángulo φ , derivado de las condiciones de visualización, por lo que puede calcularse la distancia focal máxima según la expresión:

$$f \leq \frac{5 \cdot Sh}{8 \cdot \tan \frac{\varphi}{2}}$$

Siendo:

f , distancia focal del objetivo (mm)

Sh , tamaño horizontal del sensor digital (mm)

φ , ángulo de apertura del campo visual

9.1.7. La distancia de campo próxima y lejana

Para los cálculos de la distancia base será necesario conocer la distancia de campo próxima D_{cp} , comprendida entre la cámara y el punto más cercano de la escena que queda dentro de la zona de encuadre, así como también será necesario determinar la distancia de campo lejana D_{cl} , comprendida entre la cámara y el objeto más lejano.

Para determinar estas distancias sería conveniente utilizar un medidor laser. En el caso de una escena en exteriores que se extiende hasta el infinito, podemos considerar que la distancia de campo lejana D_{cl} es de 200 m, pues más allá de esa distancia las diferencias de paralaje son tan pequeñas que quedan fuera de los límites de la agudeza visual.

9.1.8. La separación entre cámaras o distancia base

El parámetro clave de una buena toma estereoscópica es la separación entre cámaras o distancia base D_b , pues ello tiene a la vez varias repercusiones; por un lado ya vimos como esto puede producir un escalado de la escena (efecto hiper/hipo estereoscópico), mientras que, por otro lado, ello también condiciona la magnitud del paralaje y, en consecuencia, que la toma este dentro de los límites de confort visual, por tanto, debemos conjugar estos dos aspectos, intención volumétrica y confort visual.



Fig. 9.6. Trípode y rail con dos cámaras para disparo sincronizado (izda.) y con una sola cámara para disparo alterno (dcha). Pedro Cabezos

Es muy conveniente utilizar un trípode y dos cámaras sincronizadas montadas sobre un rail graduado para ajustar la separación adecuada (Fig. 9.6, izda.). Cuando se trata

de motivos estáticos, se puede emplear una sola cámara disparada de forma alterna en cada una de las posiciones (Fig. 9.6, dcha.).

En lo que respecta al cálculo de la distancia base, ya se ha comentado que la solución no es única, por lo que aquí se plantea es una metodología para comprobar que la escena se perciba dentro de los límites de confort y con la escala adecuada.

Cuando se opta por un planteamiento ortoestereoscópico, la distancia base equivale a la distancia interpupilar, por tanto, la escala entre la escena real y la representada es 1:1, por lo que, en este caso, bastaría comprobar que la profundidad de la escena real, queda comprendida dentro del margen de profundidad comfortable, es decir, se debería cumplir simultáneamente que:

$$D_{cp} \geq D_p$$

$$D_{cl} \leq D_l$$

Siendo:

D_{cp} , distancia de campo próxima

D_p , distancia límite próxima

D_{cl} , distancia de campo lejana

D_l , distancia límite lejana

En el planteamiento hipo/hiperestereoscópico, el tamaño de la escena percibida aumenta o disminuye en función del factor de escala equivalente al cociente entre la distancia interpupilar y la distancia base (i/D_b), por tanto, se debe procurar que la escena percibida quede comprendida dentro del margen de profundidad comfortable; para ello se debería cumplir simultáneamente que:

$$D_b \leq \frac{D_{cp}}{D_p} \cdot i$$

$$D_b \geq \frac{D_{cl}}{D_l} \cdot i$$

Siendo:

D_b , distancia base

D_{cp} , distancia de campo próxima

D_p , distancia límite próxima

D_{cl} , distancia de campo lejana

D_l , distancia límite lejana

i , distancia interpupilar

Cuando la distancia de observación es muy próxima, el margen de profundidad comfortable es bastante reducido y puede ocurrir que al escalar la escena ésta no

quede situada dentro del margen confortable y no sea posible obtener un valor de distancia base que satisfaga las dos condiciones previas.

Si esto sucede, habría que considerar una nueva composición de la escena para conseguir una mayor proporcionalidad entre las distancias de campo y las distancias límite, derivadas de las condiciones de visualización, lo que podríamos comprobar con la siguiente condición:

$$\frac{D_{cl}}{D_{cp}} \leq \frac{D_l}{D_p}$$

Siendo:

D_{cl} , distancia de campo lejana

D_{cp} , distancia de campo próxima

D_l , distancia límite lejana

D_p , distancia límite próxima

Si quisiéramos encontrar una solución que aproveche al máximo el margen de profundidad confortable, deberíamos lograr una proporcionalidad absoluta entre las distancias de campo y las distancias límites de confort, por tanto se debería cumplir:

$$\frac{D_{cl}}{D_{cp}} = \frac{D_l}{D_p}$$

la distancia base se calcularía según la expresión:

$$D_b = \frac{D_{cp}}{D_p} \cdot i$$

Cuando se obtiene el par de forma sintética, todo este razonamiento se simplifica extraordinariamente, pues bastará generar un escenario que reproduzca las condiciones de visualización, en el que se situarán las cámaras con una separación igual a la interpupilar y se colocarán dos planos de referencia para delimitar el margen de profundidad confortable, además de un rectángulo que defina la posición y tamaño de la ventana estereoscópica en relación a las cámaras.

Estos elementos nos servirán de referencia para ajustar el tamaño y posición de la escena tridimensional con respecto al margen de profundidad confortable. Para ello bastará realizar un escalado y desplazamiento de los objetos que componen la escena, de forma que éstos queden comprendidos dentro de los planos límite y no se produzcan violaciones de la ventana estereoscópica.

9.1.9. Converger o no los ejes ópticos

El converger o no los ejes ópticos de las cámaras sigue siendo un tema controvertido y cada método cuenta con sus partidarios y detractores, pero lo cierto es que si uno se detiene a pensar un poco en el aspecto geométrico, puede llegar a la conclusión de que se trata de dos maneras distintas de obtener un mismo resultado perceptivo, cada una con sus ventajas e inconvenientes.

En el método convergente se orientan las cámaras con el ángulo de convergencia derivado de las condiciones de visualización; la ventaja esencial de este método es que la posición relativa entre las imágenes del par se obtiene directamente sin necesidad de realizar ningún proceso adicional, basta con disponer las imágenes sobre la ventana estereoscópica, a la escala pertinente, haciéndolas coincidir por sus bordes. Sin embargo, vimos que la convergencia entre cámaras produce una distorsión de perspectiva denominada efecto *Keystone*, que puede solucionarse mediante una transformación proyectiva del par denominada epipolarización, lo que supondría un proceso de postproducción, pero dado que los efectos negativos del efecto *Keystone* pueden ser despreciables, si el ángulo de convergencia no es muy grande, es un método bastante empleado en las emisiones de video estereoscópico en directo, donde no hay tiempo para postproducción.

Algunos programas como *Stereo Photo Maker*, de libre distribución, pueden epipolarizar el par, de manera automática, apoyándose en algoritmos de reconocimiento de puntos homólogos, como los que usan los programas de cosido de imágenes o *stitching*. Con estos puntos el programa calcula las transformaciones proyectivas que deben aplicarse a las imágenes para que no haya componentes verticales en el paralaje, con lo que se corrigen a su vez los posibles giros accidentales que pudieran ocurrir si la nivelación fuera incorrecta o si se hubiera disparado sin trípode.

Existen muchas maneras de obtener transformaciones proyectivas de una imagen mediante programas de edición de imágenes, pero una opción muy precisa nos la proporciona el programa Hugin, también de libre distribución, del que tendremos ocasión de hablar más adelante, pues se trata de un programa diseñado para realizar el cosido de imágenes panorámicas que, indirectamente, nos ofrece otras muchas funcionalidades, como las transformaciones proyectivas y la corrección de la distorsión radial producida por las imperfecciones de la óptica. Este programa permite rotar la imagen, alrededor de su punto de vista, que el programa determina inicialmente mediante la información de distancia focal y tamaño del sensor, almacenada en los datos EXIF de la fotografía digital. Ello nos permite realizar la rectificación de perspectiva situando la imagen en el espacio en posición paralela al plano de la ventana estereoscópica, su posición se define introduciendo el ángulo horizontal, el

vertical y el de rotación alrededor de su eje visual. Si la fotografía está bien nivelada, bastaría con indicar únicamente el ángulo horizontal, cuyo valor se correspondería con el semiángulo de convergencia, en sentido horario, para la imagen derecha, y antihorario, para la izquierda. Otro inconveniente que conlleva este método de captura es que se debería utilizar un goniómetro de precisión bajo las cámaras para poder establecer el ángulo de convergencia con exactitud.

Para evitar las transformaciones proyectivas soy partidario de optar por una configuración de cámaras con los ejes ópticos paralelos, como en el caso normal de la fotogrametría, lo que simplifica considerablemente la toma, pues cuando se utiliza una única cámara que se desliza por un rail para efectuar ambas tomas, los ejes ópticos se mantienen paralelos, mientras que si se emplean dos cámaras, se puede calibrar de antemano la posición de ejes paralelos y realizar unas marcas de referencia en las bases de apoyo para indicar la posición idónea del cuerpo de la cámara, lo que nos servirá para cualquier distancia base.

Cuando se disponen las cámaras con sus ejes paralelos, se debe determinar la posición relativa entre imágenes óptima, para que el paralaje entre puntos se corresponda con las condiciones de visualización, pues de lo contrario podemos alterar la correcta proporción volumétrica de la escena, tal como veremos más adelante. Al superponer las dos imágenes del par, escaladas convenientemente en relación a la ventana estereoscópica y haciéndolas coincidir por sus bordes, resulta que los puntos situados en el infinito que pudieran aparecer en la escena tendrían paralaje nulo, cuando lo correcto sería que tuvieran paralaje positivo equivalente a la distancia interpupilar, por tanto, para conseguir el paralaje adecuado bastará con producir una translación de una de las imágenes con respecto a la otra de valor igual a la distancia interpupilar. Con ello se consigue reproducir el efecto convergente de las cámaras, pero sin producir las distorsiones de perspectiva.

Algo importante que debemos tener en cuenta es que para poder asumir esta translación las imágenes obtenidas deberán tener un margen más amplio del campo visual, por lo que se deberá emplear un objetivo de menor distancia focal que en el caso convergente, cuyo valor puede estimarse según la expresión:

$$f \leq \frac{Sh \cdot d}{a + i}$$

Siendo:

- f , distancia focal del objetivo (mm)
- Sh , tamaño horizontal del sensor digital (mm)
- d , distancia de observación (mm)
- a , ancho de la ventana estereoscópica (mm)
- i , distancia interpupilar (mm)

9.5. Procesos de Postproducción digital

Al margen de otros procesos de postproducción propios del método de reproducción y visionado utilizado, que se tratarán más adelante, aquí se exponen los procesos de postproducción que son independientes de ellos.

9.1.10. La translación del caso paralelo

Acabamos de ver que en la toma con ejes ópticos paralelos, es preciso realizar una translación horizontal entre las imágenes, que conviene expresar en píxeles, para ello deberemos conocer algún dato adicional como la resolución horizontal del sensor Rh .

En principio, debemos calcular el factor de escala E , que debe aplicarse a las imágenes para disponerlas convenientemente sobre la ventana estereoscópica, cuyo valor puede obtenerse de la siguiente relación:

$$E = \frac{d}{f}$$

Siendo:

- E , factor de escala
- d , distancia de observación (mm)
- f , distancia focal del objetivo (mm)

El valor de la translación horizontal Th , expresada en píxeles, puede calcularse de la siguiente manera:

$$Th = \frac{i \cdot Rh}{E \cdot Sh}$$

Siendo:

- Th , translación horizontal (px)
- Rh , resolución horizontal del sensor (px)
- Sh , tamaño horizontal del sensor digital (mm)
- i , distancia interpupilar (mm)
- E , factor de escala

9.1.11. El recorte final

Independientemente de que hayamos optado por un método de toma convergente o paralelo, conviene adaptar la imagen final al tamaño y relación de aspecto de la ventana estereoscópica. Se puede efectuar el recorte eliminando los píxeles que exceden del ángulo de visión definido por la ventana estereoscópica, de modo que la resolución horizontal final Rhf , puede calcularse según la expresión:

$$Rhf = \frac{Rh \cdot a \cdot f}{Sh \cdot d}$$

Siendo:

Rhf , resolución horizontal final (px)

Rh , resolución horizontal del sensor (px)

Sh , tamaño horizontal del sensor digital (mm)

a , ancho de la ventana estereoscópica (mm)

f , distancia focal del objetivo (mm)

d , distancia de observación (mm)

Conocida la resolución horizontal final, podremos determinar fácilmente la resolución vertical final Rvf , según la expresión:

$$Rvf = \frac{b}{a} \cdot Rhf$$

Siendo:

Rvf , resolución vertical final (px)

Rhf , resolución horizontal final (px)

a , ancho de la ventana estereoscópica

b , alto de la ventana estereoscópica

Una vez producido el recorte, la imagen abarca el campo visual apropiado y tiene la misma relación de aspecto de la ventana estereoscópica, por lo que únicamente falta asignarle el tamaño de impresión de la ventana estereoscópica, si se trata del medio impreso, o interpolarla a la resolución de salida del proyector o pantalla en el que deba reproducirse.

9.6. La ficha de datos y cálculos

A continuación, se aporta una ficha que resume los datos requeridos y las ecuaciones para el cálculo de los parámetros necesarios. A partir de ella se ha realizado una hoja de cálculo para facilitar las operaciones.

DATOS	
Condiciones de Visualización (mm)	Condiciones de campo (mm)
Distancia de observación $d =$	Distancia de campo próxima $D_{cp} =$
Distancia interpupilar media $i =$	Distancia de campo lejana $D_{cl} =$
Ancho ventana estereoscópica $a =$	Tam. horizontal del sensor $Sh =$
Alto ventana estereoscópica $b =$	Res. horizontal del sensor (px) $Rh =$
CÁLCULOS	
Ángulo de visión φ	$\varphi = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2 \cdot d} \right)$
Distancia focal del objetivo f	$f \leq \frac{5 \cdot Sh}{8 \cdot \tan \frac{\varphi}{2}} \quad f \leq \frac{Sh \cdot d}{a + i} \text{ (Toma paralela)}$
Distancia límite próxima D_p	$D_p = \frac{i \cdot d}{i + p^-}$
Distancia límite lejana D_l	$D_l = \frac{i \cdot d}{i - p^+}$
Distancia base D_b	$\frac{D_{cl}}{D_l} \cdot i \leq D_b \leq \frac{D_{cp}}{D_p} \cdot i$
Ángulo de convergencia θ (Toma convergente)	$\theta = 2 \cdot \arctan \left(\frac{i}{2 \cdot d} \right)$
Translación horizontal Th (Toma paralela)	$Th = \frac{i \cdot f \cdot Rh}{d \cdot Sh}$
Resolución horizontal final Rhf	$Rhf = \frac{Rh \cdot a \cdot f}{Sh \cdot d}$
Resolución vertical final Rvf	$Rvf = \frac{b}{a} \cdot Rhf$

Fig. 9.7. Ficha resumen de datos y operaciones. Pedro Cabezos

9.7. Ejemplo de aplicación

Para concluir este capítulo se expone, a modo de ejemplo, la resolución de un caso práctico cuyas condiciones de visualización se establecen de acorde con el formato del presente documento, es decir un texto impreso en formato A4 en el que la imagen ocupará un tamaño de 10x15 cm, luego éste será el tamaño de la ventana estereoscópica.

Para estimar la distancia de observación he considerado la distancia de Harmon modificada que, en el caso de un adulto, ronda los 35 cm y una distancia interpupilar media de 64 mm.

El material fotográfico empleado consta de una cámara réflex Sony Alpha 100, cuyo sensor tiene un tamaño horizontal de 23,6 mm y una resolución horizontal de 3872 px, sobre la que se monta un objetivo de distancia focal variable 18-70 mm.

Para no tener que realizar las transformaciones proyectivas necesarias para eliminar el efecto *Keystone*, se ha optado por el método de toma de ejes paralelos, aplicando las fórmulas que se aportan, referentes a la distancia focal, se obtiene que el objetivo debe tener una distancia focal menor o igual de 38,6 mm, por lo que se ha utilizado una distancia focal de 35 mm para realizar la toma.

La escena está compuesta por un conjunto de poliedros apoyados sobre una revista tras la que hay un armario que limita la profundidad de la escena, la cámara se posiciona de manera que la distancia de campo próxima es de 80 cm y la lejana de 100 cm.

DATOS			
Condiciones de Visualización (mm)		Condiciones de campo (mm)	
Distancia de observación	$d = 350$	Distancia de campo próxima	$D_{cp} = 800$
Distancia interpupilar media	$i = 64$	Distancia de campo lejana	$D_{cl} = 1000$
Ancho ventana estereoscópica	$a = 150$	Tam. horizontal del sensor	$Sh = 23,6$
Alto ventana estereoscópica	$b = 100$	Res. horizontal del sensor (px)	$Rh = 3872$

Fig. 9.8. Tabla resumen con los datos iniciales

Al tratarse de una distancia de observación muy próxima, se han considerado los límites de paralaje establecidos por Shibata et al. (2011), que como ya se dijo anteriormente, me parecen los más adecuados para las distancias de observación próximas.

Aplicando las ecuaciones que fueron expresadas en la Fig. 9.5:

$$p^- = (0.6048 \cdot d - 0.0338) \cdot i \text{ (límite de paralaje negativo)}$$

$$p^+ = (0.3915 \cdot d + 0.1143) \cdot i \text{ (límite de paralaje positivo)}$$

Para una distancia de observación $d = 350$ mm se obtienen unos valores límite de 11,38 mm, para el paralaje positivo, y de 16,08 mm, para el paralaje negativo. Con ello podemos calcular las distancias límites para las condiciones de visualización, mediante las ecuaciones expresadas en la Fig. 9.9:

$$D_p = \frac{i \cdot d}{i + p^-} \quad ; \quad D_l = \frac{i \cdot d}{i - p^+}$$

Con lo que se obtiene una distancia límite próxima $D_p = 29,7$ cm y una distancia límite lejana de $D_l = 42,5$ cm, quedando establecido así el margen de profundidad confortable de la escena.

Aplicando las ecuaciones que se han aportado referentes a la distancia base:

$$\frac{D_{cl}}{D_l} \cdot i \leq D_b \leq \frac{D_{cp}}{D_p} \cdot i$$

Se obtiene que D_b debe estar en el rango comprendido entre 15 y 18,3 cm; obsérvese que el margen de variación de la distancia base es pequeño debido a que, al ser la distancia de observación muy próxima, el margen de profundidad confortable es limitado. El rango obtenido no da pie a realizar un planteamiento ortoestereoscópico, por lo que se opta por un planteamiento hiperestereoscópico, adoptando un valor de $D_b = 16$ cm para la distancia base.

Al tratarse de una escena estática, las tomas se han realizado utilizando una única cámara montada sobre trípode y rail, en dos disparos alternos, a la separación establecida. Para que las imágenes tengan las mismas condiciones de luz y color, se ha bloqueado la exposición, el enfoque y el balance de blancos. Se ha seleccionado un diafragma f/8 para obtener una buena profundidad de campo sin favorecer el fenómeno de la difracción, del que hablaremos posteriormente.

Los valores para la translación y recorte finales se calculan mediante las ecuaciones expuestas en la Fig. 9.7:

$$Th = \frac{i \cdot f \cdot Rh}{d \cdot Sh}$$

$$Rh_f = \frac{Rh \cdot a \cdot f}{Sh \cdot d} \quad ; \quad Rv_f = \frac{b}{a} \cdot Rh_f$$

Para $f = 35 \text{ mm}$, $Rh = 3872 \text{ px}$, $d = 350 \text{ mm}$, $a = 150 \text{ mm}$ y $Sh = 23,6 \text{ mm}$, se obtiene un valor para la translación horizontal $Th = 1050 \text{ px}$ y una resolución para el recorte final $Rhf = 2461 \text{ px}$ y $Rvf = 1641 \text{ px}$.

CÁLCULOS	
Ángulo de visión φ	$\varphi = 28.8$
Distancia focal del objetivo f	$f \leq 36.6 \text{ mm}$ (se adopta 35 mm)
Distancia límite próxima D_p	$D_p = 279 \text{ mm}$
Distancia límite lejana D_l	$D_l = 425 \text{ mm}$
Distancia base D_b	$150 \text{ mm} \leq D_b \leq 183 \text{ mm}$
Translación horizontal Th (Toma paralela)	$Th = 1050 \text{ px}$
Resolución horizontal final Rhf	$Rhf = 2461 \text{ px}$
Resolución vertical final Rvf	$Rvf = 1641 \text{ px}$

Fig. 9.9. Ficha resumen de las operaciones

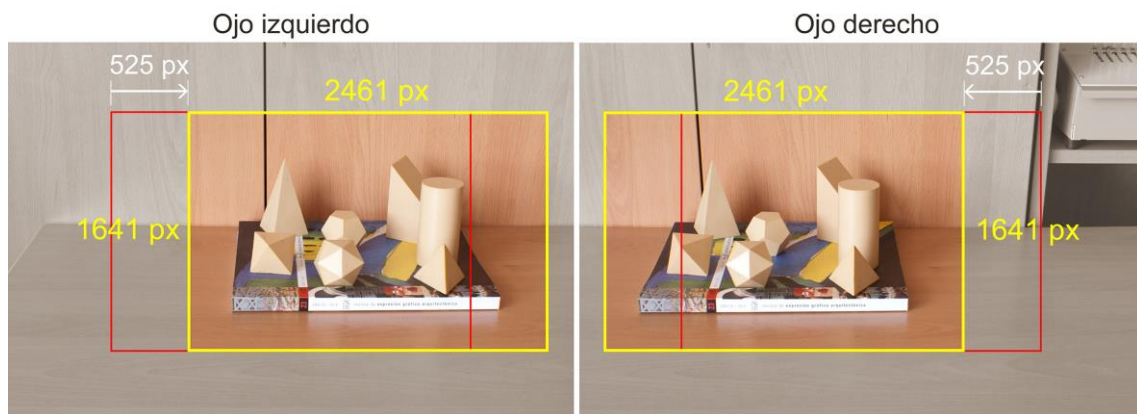


Fig. 9.10. Fotografías originales con áreas de recorte superpuestas. Pedro Cabezos

La Fig. 9.10 muestra las dos fotografías originales, sobre las que se han representado en amarillo las zonas de recorte que garantizan el campo visual apropiado y la translación horizontal necesaria para obtener el paralaje adecuado. El valor de la translación se ha repartido para aplicarlo por separado a cada una de las imágenes y en sentido contrario. Puede verse que el marco de color rojo señala la posición de la zona de recorte, antes de efectuar la translación, es decir, en la posición centrada con respecto a la imagen original. Una vez producido el recorte, se ha combinado el par para formar la imagen estereoscópica que se muestra a continuación.

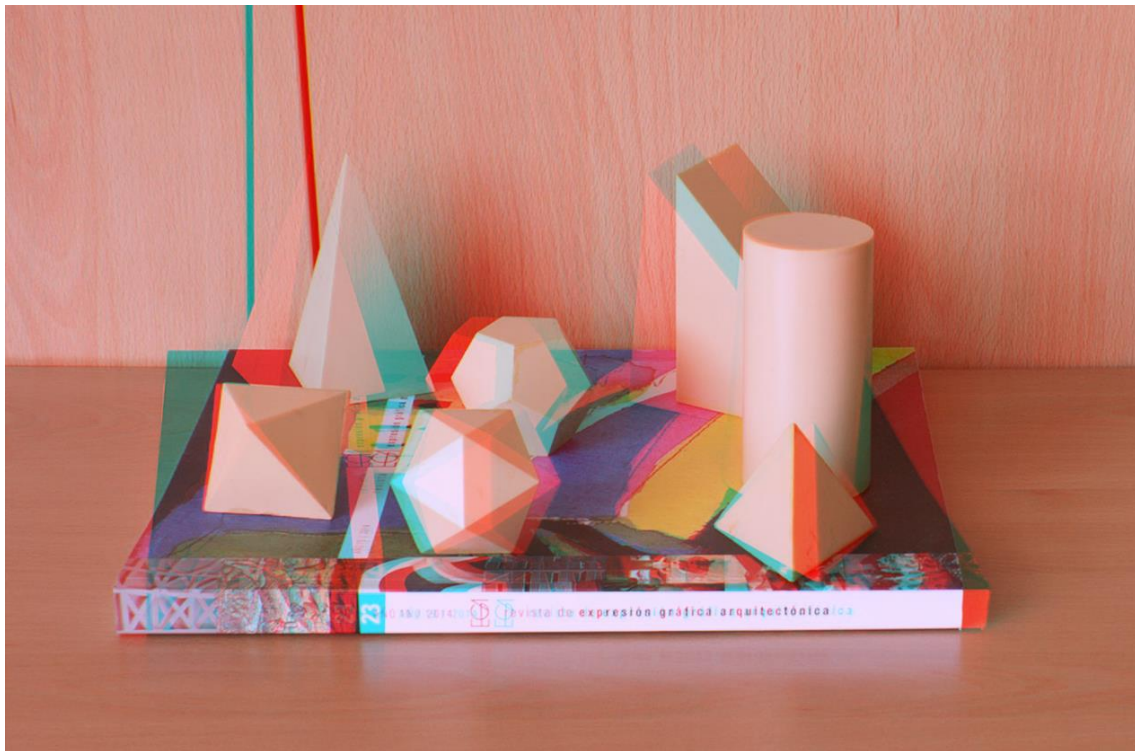


Fig. 9.11. Imagen estereoscópica tras la translación y el recorte. Pedro Cabezos

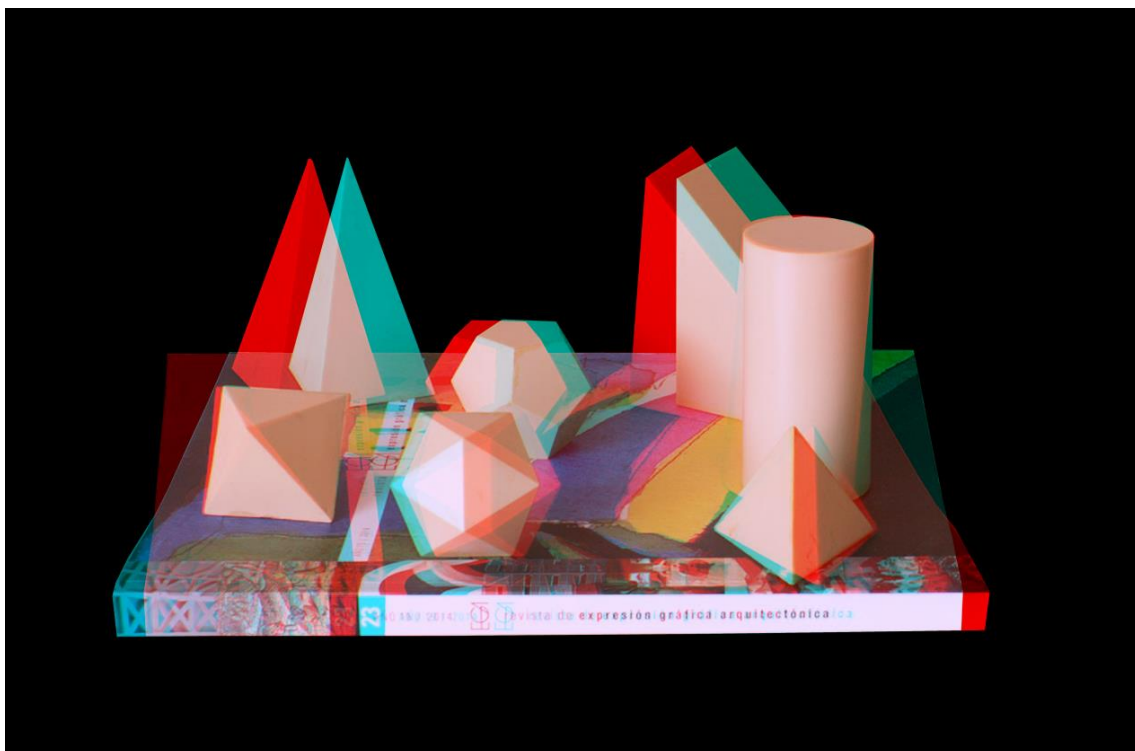


Fig. 9.12. Versión de la escena aislada de su entorno. Pedro Cabezos



En la Fig. 9.12 se muestra una versión en la que la escena se ha aislado de su entorno, para centrar la atención del espectador en el motivo principal.

La premisa que me ha llevado a desarrollar toda la metodología expuesta ha sido siempre el hecho de reproducir la escena real respetando sus proporciones volumétricas y conseguir una percepción del relieve natural y confortable, sin embargo, en el próximo capítulo veremos ciertos factores que podrían ocasionar una percepción volumétrica alterada, que deberemos tratar de evitar o corregir.

10. LAS DISTORSIONES VOLUMÉTRICAS

En la metodología expuesta en el capítulo anterior, se ha impuesto como condición esencial el mantener las relaciones exactas, para que las imágenes que se presentan ante los ojos del observador evoquen las mismas imágenes retinianas que provocaría la escena tridimensional y así mantener intactas sus proporciones volumétricas. A pesar de ello, el observador podría llegar a percibir la escena distorsionada por motivos ajenos a las condiciones de la toma.

Las distorsiones del relieve pueden ser originadas principalmente por tres causas: las aberraciones ópticas introducidas por el objetivo de la cámara, la disposición deficiente del par sobre la ventana estereoscópica o la posición incorrecta del observador en relación a la ventana estereoscópica. A continuación analizaremos cada uno de estos motivos para evitar así sus consecuencias.

10.1. Las aberraciones ópticas

Para producir una imagen retiniana libre de distorsiones, la fotografía debe equipararse con una proyección cónica para simular la propagación rectilínea de los rayos de luz hacia la retina, cosa que, en principio, no ocurre con las fotografías obtenidas con una cámara convencional, puesto que los objetivos fotográficos producen, en mayor o menor medida, distorsiones o aberraciones ópticas sobre la fotografía.

Los objetivos se componen de una serie de lentes que intentan compensar sus distorsiones unas con otras, pero únicamente consiguen minimizarlas, por ello se debe realizar una corrección de las aberraciones producidas por el equipo fotográfico, cuyos parámetros se deben determinar mediante el proceso de calibración del conjunto cámara-objetivo, que resulta crítico en la calidad de los resultados obtenidos. Las aberraciones más comunes de un objetivo son la distorsión radial, la tangencial, y las aberraciones cromáticas, pero, para el tema que nos ocupa, la distorsión radial es la que más nos debe preocupar.

Cabe destacar que, cada vez con más frecuencia, los fabricantes de cámaras digitales incorporan un software interno, con los parámetros de calibración de la lente, que aplica automáticamente la corrección a las imágenes, que salen libres de distorsiones. Un ejemplo de ello lo podemos encontrar en algunas cámaras como las del sistema 4/3 y teléfonos móviles de última generación. No obstante, este sistema puede resultar fácil de implementar en cámaras de objetivo fijo, pero en un sistema de ópticas intercambiables, como las cámaras réflex, parece complicada su aplicación, dada la cantidad de objetivos y combinaciones que se pueden conseguir.

10.1.1. La distorsión radial

Es un tipo de aberración que origina que las líneas rectas aparezcan como curvas en la fotografía, debido a la desalineación que sufren los rayos al atravesar las distintas lentes. Si las rectas en el espacio se proyectan como curvas cóncavas con respecto al centro de la fotografía, la distorsión radial se denomina distorsión de barril, mientras que, si las rectas se proyectan como curvas convexas con respecto al centro, se llama en este caso distorsión de cojín (Fig. 10.1).



Fig. 10.1. Distorsión de barril (izda.) y distorsión de cojín (dcha.). Pedro Cabezos

Si nuestro objetivo produce una notable distorsión radial, al presentar las imágenes ante los ojos del espectador, el modelo percibido quedará distorsionado en la misma medida, por ello es necesario eliminar de antemano este tipo de distorsión.

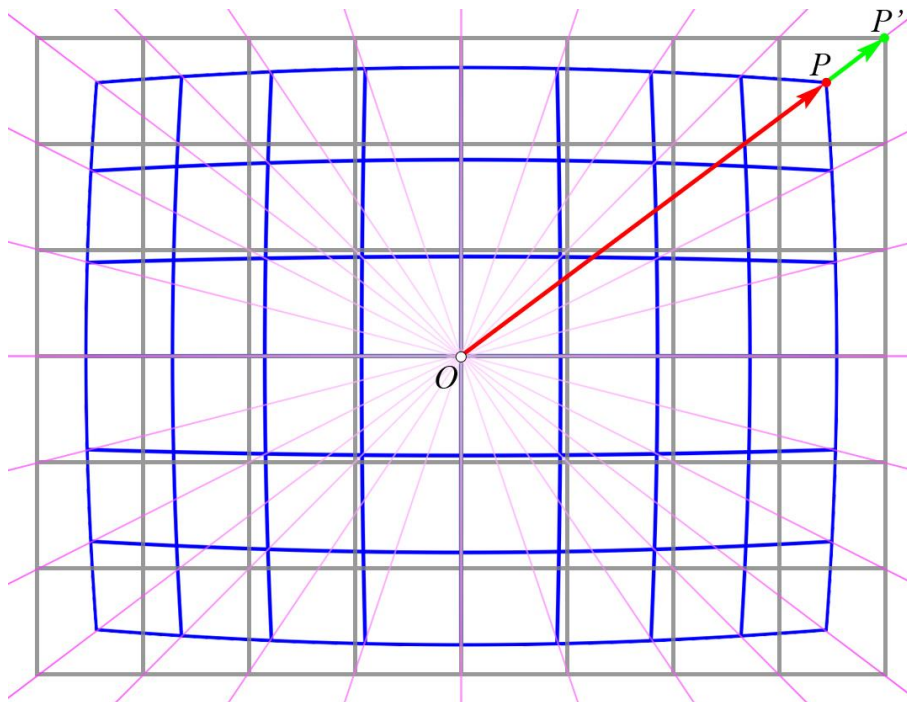


Fig. 10.2. Corrección de la distorsión radial. Pedro Cabezos

Existen varios algoritmos matemáticos para corregir este tipo de distorsión, pero el que utiliza el software que emplearemos obedece a la ecuación:

$$r_0 = a \cdot r_c^4 + b \cdot r_c^3 + c \cdot r_c^2 + d \cdot r_c$$

Siendo:

r_0 , distancia inicial entre un punto cualquiera P y el centro de distorsión O (vector \overrightarrow{OP} , en la Fig. 10.2)

r_c , distancia entre el punto corregido P' y el centro de distorsión O (vector $\overrightarrow{OP'}$, en la Fig. 10.2)

Los vectores \overrightarrow{OP} y $\overrightarrow{OP'}$ coinciden en dirección, por lo que el punto corregido P' sólo experimenta un acercamiento o alejamiento del origen, en la misma dirección del vector inicial tal como puede verse en la Fig. 10.2.

Los coeficientes del polinomio a, b, c son los parámetros a determinar, mientras que el coeficiente d , se calcula mediante la expresión: $d = 1 - a - b - c$, para preservar el tamaño original de la fotografía. El centro de distorsión O , no suele coincidir exactamente con el centro de la imagen, debido a que las tolerancias de fabricación producen descentramientos entre el sensor y el eje óptico.

10.1.2. La distorsión tangencial

Se debe a las imperfecciones en la construcción y posicionamiento del conjunto de lentes, lo que origina una desalineación de los centros de curvatura de las lentes con respecto al eje principal del objetivo. Esta distorsión provoca un descentramiento que tiene componente radial y tangencial, siendo esta última perpendicular al vector de posición del punto en cuestión. En las lentes modernas, el efecto de la distorsión tangencial es pequeño, comparado con el efecto de la distorsión radial, por lo que se puede despreciar.

10.1.3. Las aberraciones cromáticas

Las aberraciones cromáticas aparecen en forma de halos en zonas de alto contraste de color rojo, azul, verde, cyan, magenta o amarillo, debido a que el índice de refracción depende de la longitud de onda de la luz, provocando que la distancia focal varíe con las distintas longitudes de onda. Estas aberraciones no representan un problema para el tema que nos ocupa puesto que constituyen más un defecto estético que uno geométrico, no obstante, si llegaran a ser visibles, pueden corregirse fácilmente con algún programa de retoque de imagen como Gimp, de libre distribución.

10.2. Calibración de la cámara

Los parámetros necesarios para corregir la imagen se denominan parámetros intrínsecos de la cámara y para determinarlos se realiza un procedimiento denominado calibración. Existen aplicaciones de pago, destinadas a corregir automáticamente las distorsiones geométricas, que tienen una base de datos de parámetros de calibración para los objetivos y cámaras más comunes, ejemplo de ello son programas como PTLens, DxO Optics Pro y Photoshop, aunque puede ocurrir que no dispongan de los datos de calibración de nuestro modelo de cámara en particular. También podemos usar otros programas específicos para fotogrametría como Photomodeler, con el inconveniente del precio de la licencia.

Para evitar estos problemas se propone utilizar un método de calibración, basado en software libre, que nos permitirá corregir fácilmente las distorsiones radiales. El método consiste en obtener una fotografía con motivos rectilíneos e introducir una serie de puntos de referencia sobre ella para determinar los parámetros de calibración.

10.2.1. La fotografía de referencia

La calibración se realiza para una distancia focal concreta, por lo que si el objetivo es de distancia focal variable, deberíamos calibrar cada una de las distancias focales que vayamos a utilizar, sin embargo, no es aconsejable calibrar una distancia focal intermedia, puesto que no sería fácil conseguir ajustar, posteriormente, la misma posición de las lentes, por ello es más conveniente calibrar y utilizar únicamente las focales extremas o mejor aún, utilizar objetivos de distancia focal fija.

Para realizar la fotografía de referencia interesa tener una gran profundidad de campo, para conseguir así una mayor nitidez en la imagen. La profundidad de campo está íntimamente relacionada con la abertura del diafragma, cuanto más cerrado, mayor profundidad de campo; ello induce a la falsa creencia de que para conseguir una mayor nitidez en la imagen debemos cerrar al máximo el diafragma, pero esta afirmación es totalmente errónea puesto que hay que considerar también el efecto negativo de la difracción de la luz, que es mayor cuanto menor es el tamaño del diafragma. La difracción produce un efecto de pérdida de nitidez global en la fotografía como podemos apreciar en la Fig. 10.3. Lo ideal es encontrar una solución de compromiso entre profundidad de campo y pérdida de nitidez por difracción.

El tamaño del sensor de la cámara influye tanto en la profundidad de campo, como en los efectos de la difracción, por tanto no es aconsejable usar diafragmas mayores de $f/8$ en cámaras con sensores pequeños como las compactas, de $f/11$ en cámaras con sensor APS-C y de $f/16$ en sensores full frame.



Fig. 10.3. Efecto de la difracción. Recorte ampliado de fotografías realizadas con una cámara Réflex con sensor APS-C. Pedro Cabezos

Para la fotografía de referencia que será empleada en el proceso de calibración, se propone fotografiar un escenario de gran tamaño, como la fachada de un edificio que contenga multitud de aristas rectilíneas como las juntas de un aplacado o de un muro cortina. Conviene acercarse lo suficiente para que las aristas cubran el fotograma por completo.

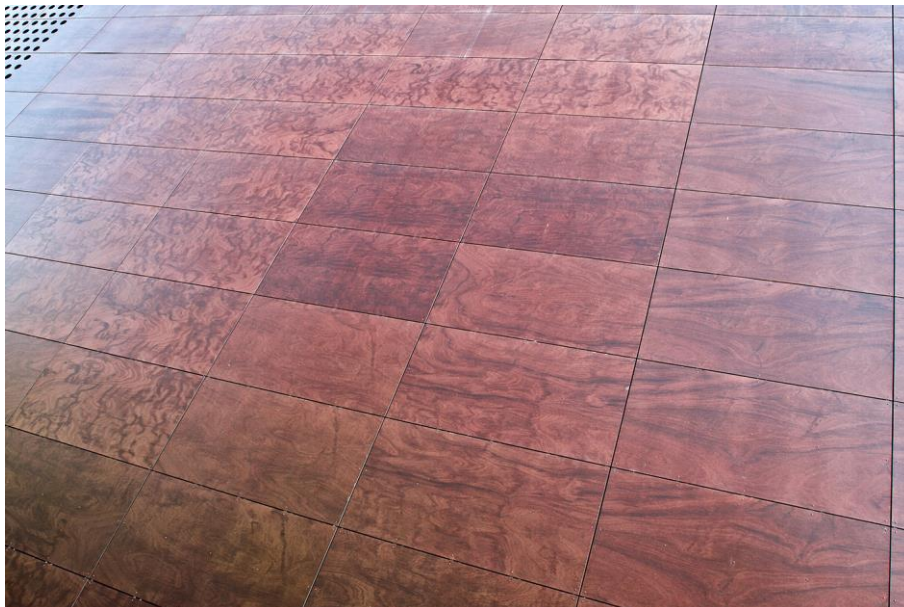


Fig. 10.4. Ejemplo de fotografía de referencia para la calibración. Pedro Cabezos

El proceso requiere introducir puntos pertenecientes a rectas del escenario de calibración, lo que puede provocar errores suplementarios, si la introducción es deficiente. Por otro lado, las desviaciones geométricas del escenario real también

pueden afectar a la calidad de la calibración, por este motivo conviene escoger edificios bien ejecutados, con líneas contrastadas y finas para identificar los puntos con precisión.

10.2.2. El proceso de calibrado

Para la calibración usaremos el programa Hugin, con licencia GPL, basado en unas utilidades de corrección de imagen llamadas Panorama Tools, desarrolladas por el profesor Helmut Dersch de la Universidad de ciencias aplicadas de Furtwangen (Alemania).

En primer lugar, se han de introducir puntos pertenecientes a rectas de la imagen de referencia (Fig. 10.4), con el fin de conseguir un conjunto de puntos por cada una de las rectas consideradas. Conviene dar más importancia a las rectas contenidas en las zonas perimetrales de la fotografía, por tener mayor distorsión, que las que atraviesan las zonas centrales de la fotografía. Posteriormente el algoritmo de optimización utiliza la posición de los puntos introducidos y calcula los coeficientes a, b y c del polinomio que corrige la distorsión radial.

Una vez hayamos ejecutado el programa Hugin, debemos cargar la imagen de referencia desde la pestaña “Imágenes”, mediante el botón [Añadir imágenes individuales...], después debemos acceder a la vista previa de la transformación pulsando [Ctrl+P], y, desde la lista desplegable “Proyección”, cambiaremos el tipo de proyección a “Rectilínea”. Pulsaremos el botón [Auto] y el botón [Ajustar] para optimizar el campo visual de la foto previsualizada, luego cerraremos la ventana de vista previa.

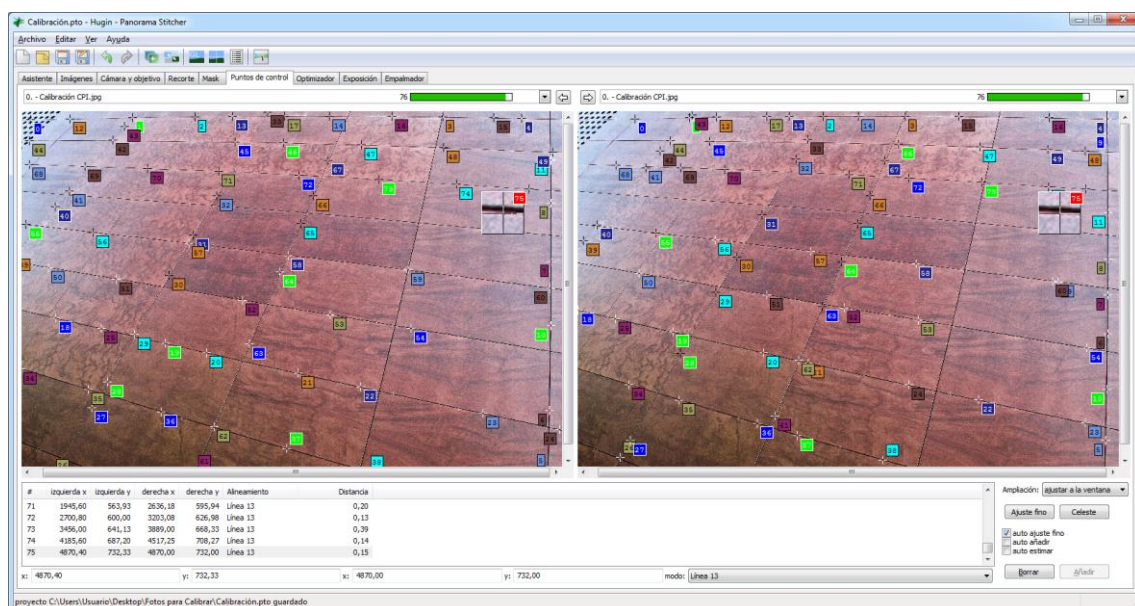


Fig. 10.5. Proceso de introducción de los puntos de referencia en Hugin. Pedro Cabezos

El proceso de introducción de puntos se realiza desde la pestaña “Puntos de control”, donde aparece la imagen duplicada. Debemos introducir parejas de puntos pertenecientes a cada una de las rectas, indicando un punto en la imagen derecha y otro en la izquierda y pulsando después el botón [Añadir].

Es muy importante indicar que la pareja pertenece a una recta determinada, mediante la lista desplegable “modo” en la que indicaremos “Añadir una línea nueva” para la primera pareja de puntos pertenecientes a una recta, tras lo que el programa asignará un número de línea que utilizaremos para el resto de puntos pertenecientes a la misma recta (Fig. 10.5).

Tras haber introducido todos los puntos, acudiremos a la pestaña “Optimizador” e indicaremos, en la lista desplegable “Optimizar”, “los siguientes parámetros personalizados”, a continuación, se han de marcar únicamente las casillas de verificación correspondientes a: distorsión (a), barril (b), distorsión (c), que constituyen los parámetros de la distorsión radial, que el programa calculará pulsando el botón [¡Optimizar ahora!].

El programa ofrece la información con la precisión de la calibración obtenida, mostrando las desviaciones medias, estándar y máxima en píxeles, para una calibración óptima deberíamos obtener resultados por debajo de un píxel. En caso de obtener desviaciones grandes, puede deberse a errores en la introducción de puntos, para detectarlos podemos analizar la tabla de puntos de control, pulsando la tecla [F3], y ver aquellos que hayan podido ocasionar el error.

Si acudimos a la vista previa, pulsando [Ctrl+P], veremos la imagen libre de distorsiones. Podemos guardar el perfil de calibración, en un archivo aparte, accediendo a la pestaña “Cámara y objetivo” y pulsando el botón [Guardar objetivo...]. Con ello se concluye el proceso de calibración y podremos posteriormente usar el perfil creado para corregir las distorsiones de cualquier otra fotografía que hayamos tomado con la misma cámara, objetivo y distancia focal.

Para corregir cualquier otra fotografía, abriremos un proyecto nuevo en Hugin y cargaremos la imagen, desde la pestaña “Imagen”, pulsando [Añadir imágenes individuales...]. Para cargar el perfil de calibración acudiremos a la pestaña “Cámara y objetivo” y seleccionando la fotografía cargada pulsaremos el botón [Cargando objetivo...] que nos permitirá localizar e introducir el archivo de calibración creado previamente.

Para obtener la imagen corregida se debe acceder a la pestaña “Empalmador” y pulsar [Calcular tamaño óptimo] para aprovechar al máximo la resolución de la imagen original, podemos elegir el formato del archivo de salida entre JPG, PNG y TIF, finalmente debemos pulsar [Empalmar], el programa preguntará la ruta dónde

almacenar el proyecto y la imagen de salida y, una vez concluido el proceso de cálculo, habremos obtenido una imagen libre de distorsiones.

10.3. La disposición deficiente del par

Ya hemos visto anteriormente que se debe tener muy en cuenta las condiciones de visualización, para reproducir correctamente el par sobre la ventana estereoscópica, por lo que cualquier error o deficiencia en este sentido causará una percepción distorsionada del relieve.

Estos errores pueden deberse fundamentalmente a dos causas, el escalado incorrecto de las imágenes, o bien, una disposición incorrecta entre las imágenes que produzca una alteración del paralaje adecuado.

10.3.1. La escala inadecuada

Puede ocurrir que un estereograma se reproduzca con un tamaño diferente al que inicialmente fue previsto, como por ejemplo, debido a un cambio del formato de impresión o cuando éste se proyecta o visualiza sobre una pantalla de distinto tamaño al que se había previsto.

Este desajuste de escala ocasiona una distorsión del tamaño aparente y de las proporciones volumétricas de la escena percibida, que se verán alteradas, en mayor o menor grado, dependiendo de la magnitud del cambio de escala.

Cuando esto sucede, se desvirtúan tanto el tamaño de las imágenes como el paralaje entre puntos homólogos, por lo que, si la escala aumenta, el espectador percibirá un objeto de mayor tamaño y distorsionado, ya que las proporciones volumétricas se ven alteradas de tal modo que los puntos con paralaje positivo ganan profundidad, mientras que aquellos con paralaje negativo la pierden.

En el caso de una reducción de escala, los objetos se perciben con un tamaño menor y distorsionados, pero, al contrario que en el caso anterior, los puntos con paralaje positivo pierden profundidad, mientras que aquellos con paralaje negativo, lo ganan.

En la Fig. 10.6 se comparan los volúmenes restituidos mediante la intersección del haz de rayos que parte de la posición de los ojos del observador y pasa por los puntos del par estereoscópico que contiene las proyecciones de un cubo. En la figura superior, la escala del par es la adecuada y el modelo restituido no presenta distorsiones, mientras que en los otros dos casos se ha alterado la escala del par y se produce una distorsión en los cuerpos restituidos que resulta evidente cuando se compara con el volumen correcto, que se representa en línea de puntos. Obsérvese que no se mantiene la ortogonalidad entre caras ni el paralelismo entre aristas, salvo en aquellas que son paralelas a la ventana estereoscópica.

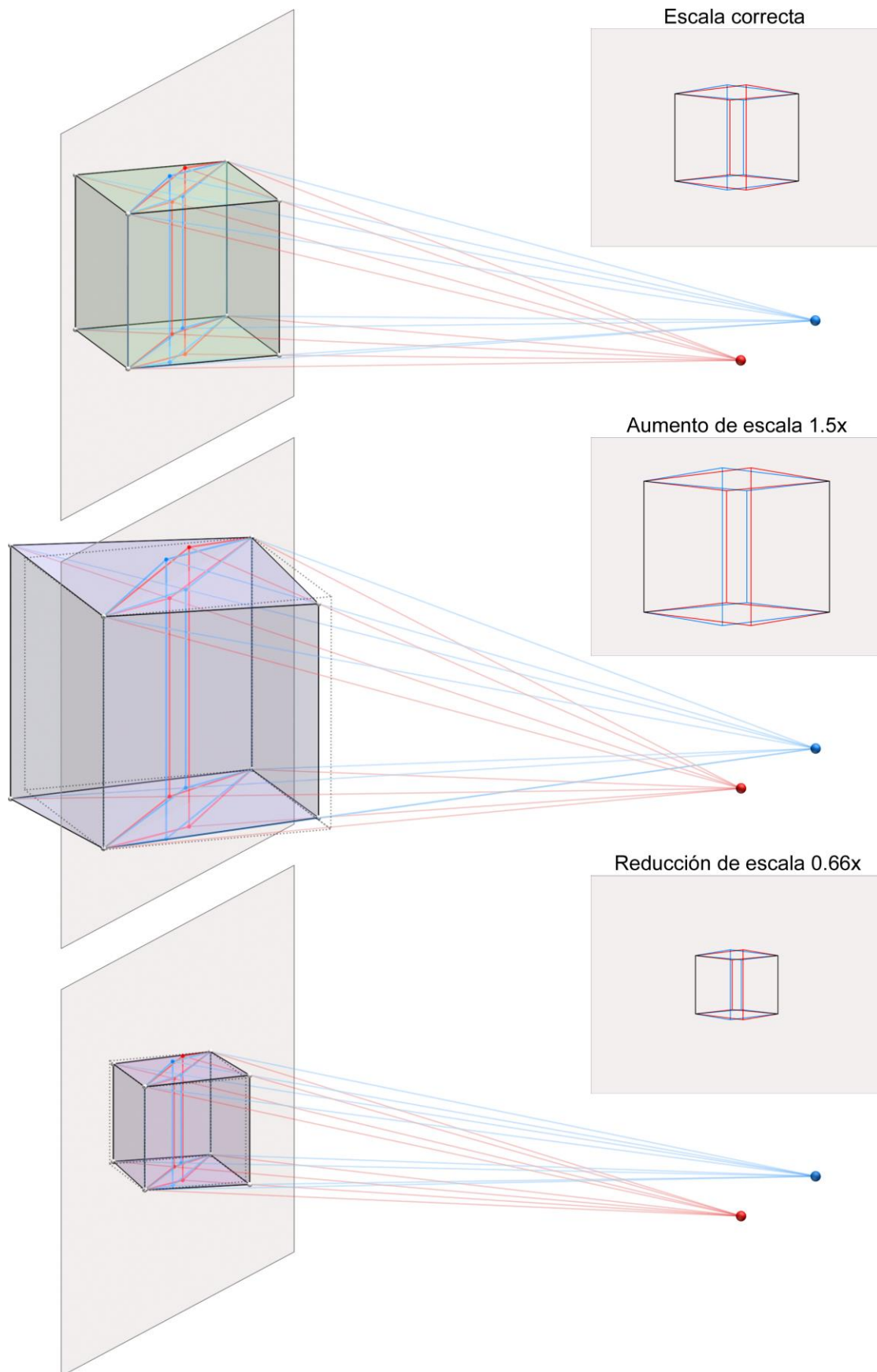


Fig. 10.6. Distorsiones volumétricas producidas por un escalado inadecuado. Pedro Cabezos

En la

Fig. 10.7 se han superpuestos los modelos restituidos previamente y se han analizado las interesantes relaciones de homografía que se produce entre ellos. Puede verse que las rectas que unen los puntos homólogos de los modelos configuran un haz de rectas de vértice O , que constituye el centro de la homografía.

El centro de la homografía O , está situado en el centro de la ventana estereoscópica, pero su situación coincide en realidad con el centro de la homotecia, o cambio de escala, que le fue practicado al par estereoscópico, a partir del que se han restituido los volúmenes.

Si se prolongan las aristas homólogas de los modelos, éstas confluyen en un punto situado sobre un plano paralelo a la ventana estereoscópica que contiene a los puntos que señalan la posición de los ojos del observador, es decir, un plano que podríamos equiparar con el plano de desvanecimiento de la perspectiva cónica.

Al unir los puntos donde confluyen las aristas homólogas de una misma cara, se obtienen los ejes de homografía que, junto con el centro O , definen la relación proyectiva entre las caras homólogas de las figuras.

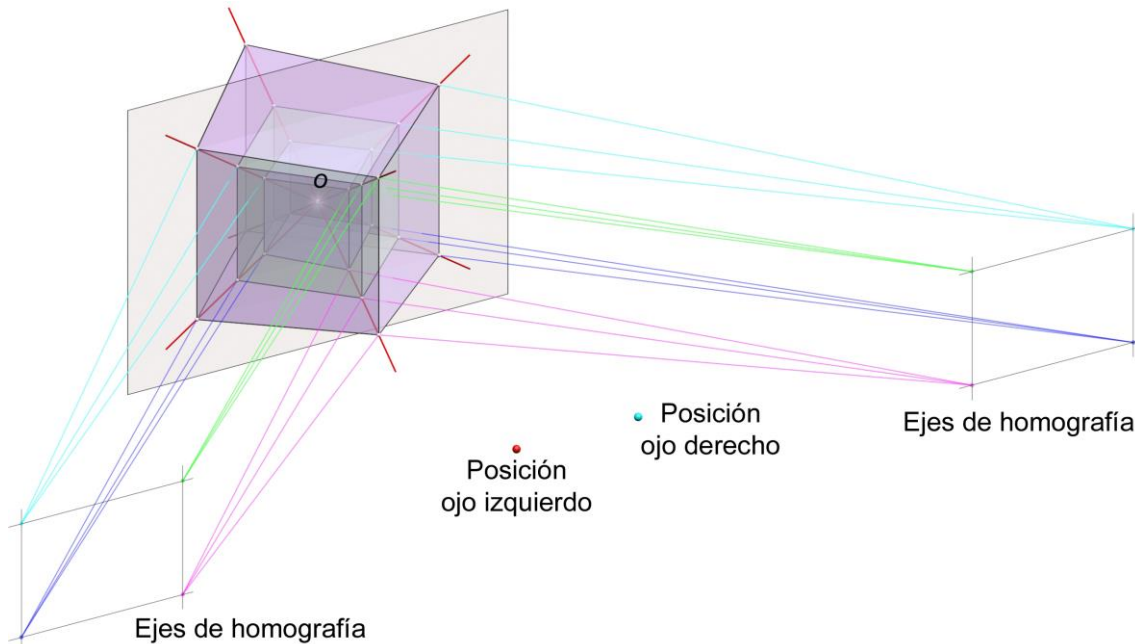


Fig. 10.7. Relaciones homográficas entre los volúmenes restituidos. Pedro Cabezos

10.3.2. La alteración del paralaje

Es algo muy habitual en los foros de estereoscopia que se hable de alterar deliberadamente el paralaje entre los puntos homólogos del par, para variar la posición en la que se perciben los objetos, en relación a la ventana estereoscópica y que éstos pueden percibirse por delante o por detrás de ella, dependiendo de cómo se modifique el paralaje, pero nadie parece ser consciente de las distorsiones volumétricas que ello produce.

Cuando se realiza la toma estereoscópica, se deben tener presentes las condiciones de visualización que determinarán el ángulo de convergencia, en el caso de la toma convergente, o la translación horizontal que habrá de practicarse en el caso de la toma paralela. Ello determina el paralaje adecuado a las condiciones de visualización, por lo que si se transgrede el paralaje óptimo, cometeremos un error muy frecuente en el mundo de la estereoscopia, que lleva implícito la distorsión del relieve percibido. Esta frivolidad con la que suele tratarse el paralaje está favorecida por el hecho de que con los programas de creación de imágenes estereoscópicas, el usuario inexperto establece el valor del paralaje “a ojo”, generalmente, con la intención de causar un marcado efecto de relieve, sin preocuparse de que el resultado sea natural o geoméricamente correcto.

La Fig. 10.8 compara el modelo restituído a partir de un par estereoscópico con el paralaje correcto (figura superior), que da como resultado un cubo sin distorsiones geométricas. En el caso representado en la zona central de la figura, se ha incrementado el paralaje entre puntos, practicando una translación horizontal para acercar entre sí los puntos homólogos hasta anular el paralaje negativo; ésto causa que el espectador perciba un modelo bastante distorsionado, que se percibe tras la ventana estereoscópica. En la parte inferior se ha disminuido el paralaje de manera inversa al caso anterior hasta anular el paralaje positivo y en este caso el espectador percibe la figura distorsionada por delante de la ventana estereoscópica.

Obsérvese cómo un incremento del paralaje (caso central) produce una elongación en profundidad y un aumento del tamaño aparente del objeto, que se percibe más distante, mientras que la disminución (caso inferior) produce una merma de relieve y la figura se percibe más próxima y con un tamaño aparente menor. Conviene señalar que las distorsiones que resultan tan evidentes en esta figura, no lo son tanto cuando nos situamos en la posición del espectador, debido a que los contornos aparentes que percibe cada ojo son adecuados y sólo podemos apreciar la distorsión mediante las claves de disparidad retiniana que, en ocasiones, entran en conflicto con otros mecanismos de la percepción como el conocimiento previo del sujeto de la forma representada, al igual que ocurre en la habitación de Ames o en el ejemplo de la máscara, vistos en el capítulo de las ilusiones ópticas.

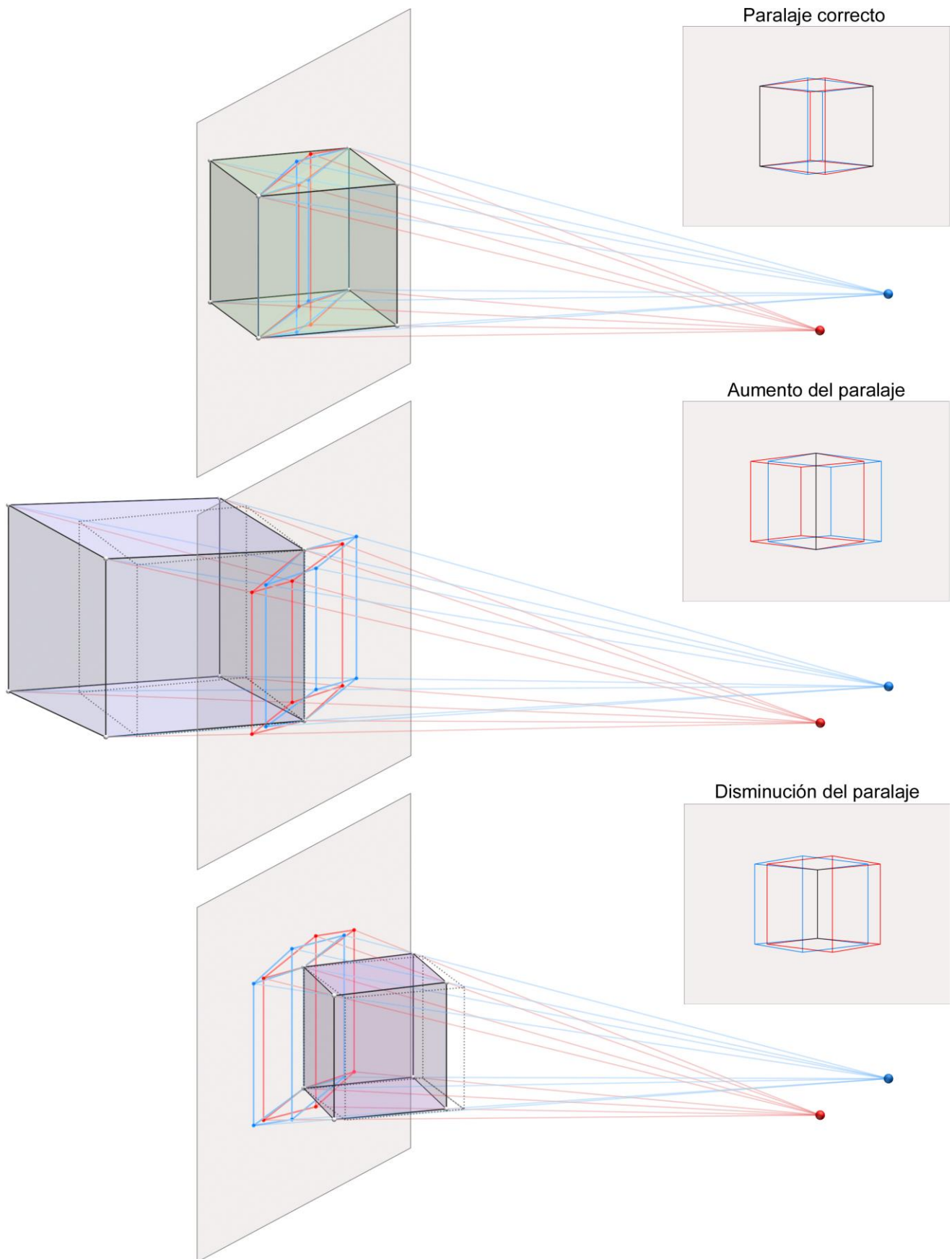


Fig. 10.8. Distorsiones volumétricas producidas por una alteración del paralaje. Pedro Cabezos

En la Fig. 10.9 se han superpuesto los volúmenes que fueron restituidos en la figura anterior para analizar las relaciones geométricas que se producen entre ellos.

Puede verse que los puntos homólogos de las figuras están contenidos en el haz de rectas con vértice O , que es el centro de la homografía, situado en la posición de “ojo cíclope”, es decir, en la posición media entre los ojos del espectador.

Al igual que sucedía en el caso anterior, las aristas homólogas confluyen en un punto situado en el plano paralelo a la ventana estereoscópica que contiene al centro de homografía O y a los ojos del espectador. Obsérvese que la posición de estos puntos en el espacio es la misma que en el caso anterior, lo que origina también que tengamos los mismos ejes de homografía.

Las relaciones proyectivas entre las caras homólogas de los diferentes modelos quedan definidas mediante los ejes y el centro de homografía O .

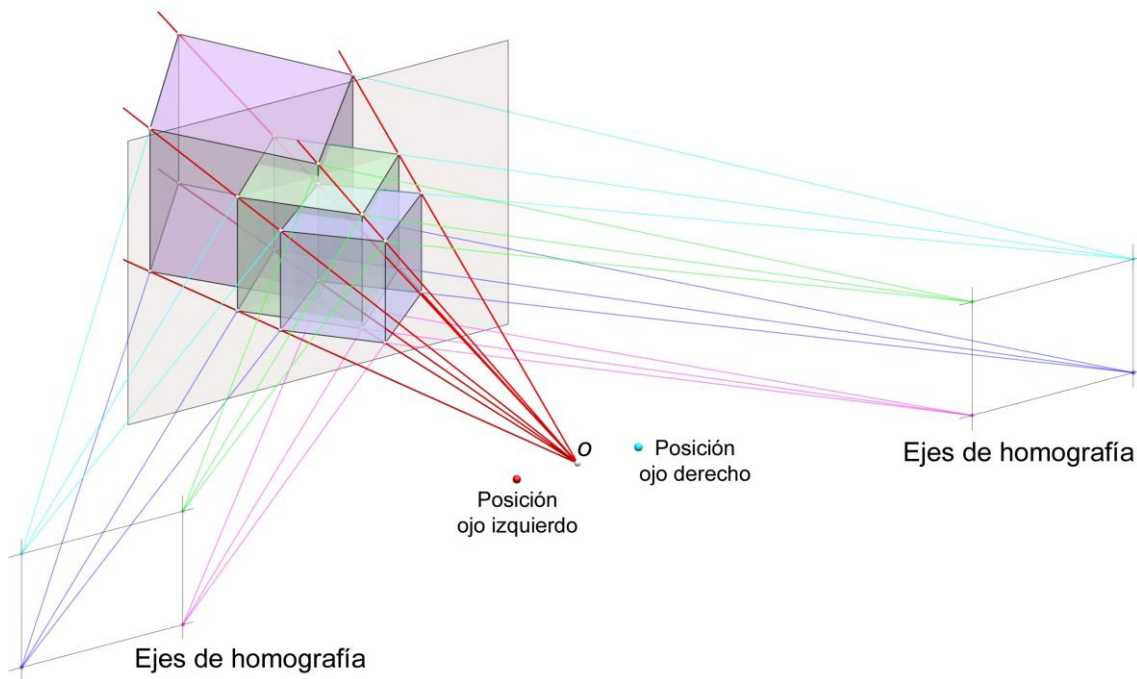


Fig. 10.9. Relaciones homográficas entre los volúmenes restituidos. Pedro Cabezos

10.4. Las desviaciones en la posición del observador

La posición del espectador es un parámetro que habitualmente queda fuera de nuestro control, porque normalmente será él quien decida dónde situarse. Es muy importante advertir al espectador cuál es la posición óptima de observación, pues de lo contrario percibirá la escena distorsionada. Veamos separadamente las distorsiones que pueden ocasionar las distintas posiciones del observador.

10.4.1. Posición adelantada o retrasada

Si el observador se sitúa en una posición adelantada o retrasada con respecto a la posición adecuada, observará una figura distorsionada en profundidad como si se le hubiera practicado un cambio de escala en la dirección ortogonal a la ventana estereoscópica (eje Z en el sistema de referencia adoptado), lo que ocasiona un incremento del relieve, cuando el espectador se sitúa por detrás de la posición óptima, y una pérdida de profundidad, cuando se sitúa por delante.

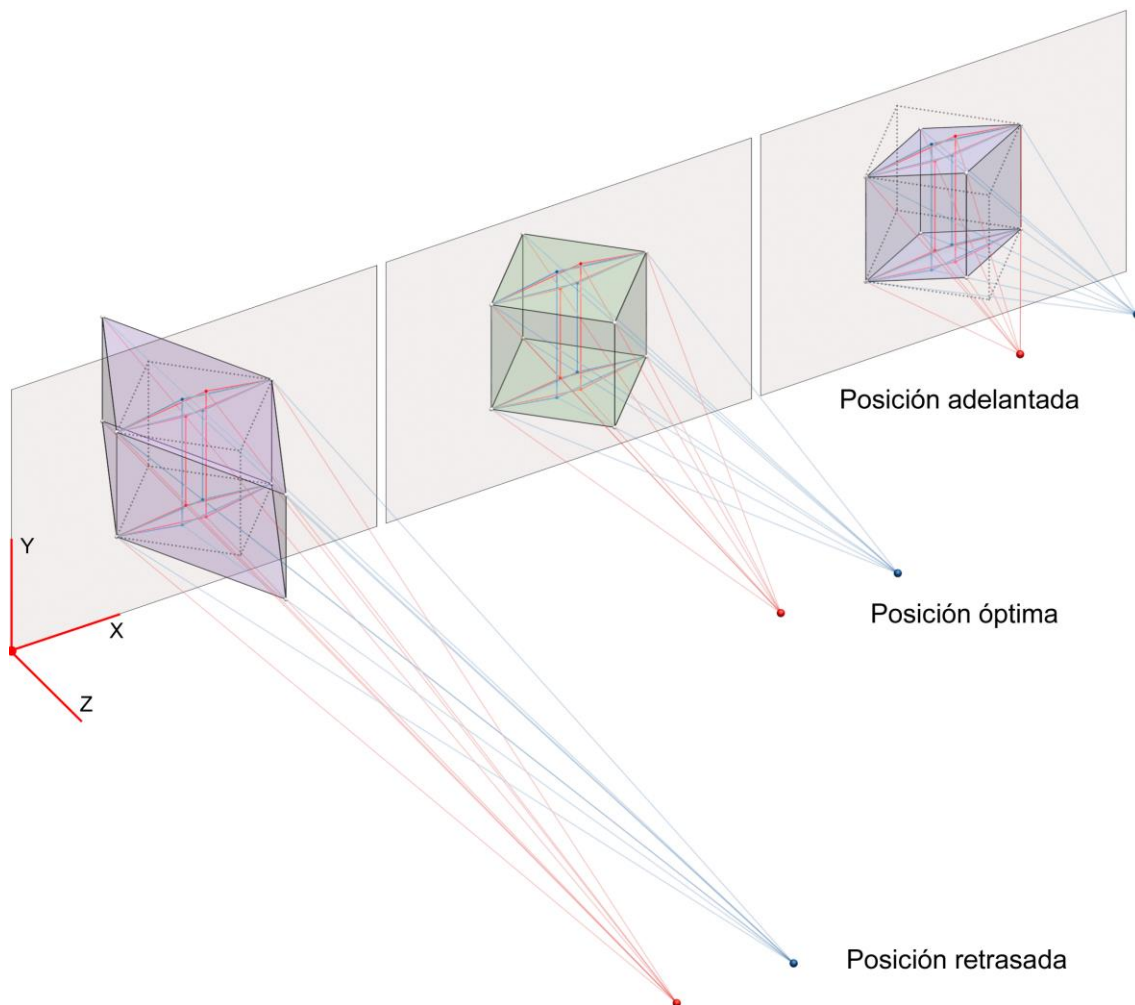


Fig. 10.10. Distorsiones producidas por una posición adelantada o retrasada. Pedro Cabezos

La Fig. 10.10 muestra la comparación entre los volúmenes restituidos desde distintas posiciones del observador. Un espectador situado en la posición definida en el centro de la figura, percibirá un relieve correcto del cubo, mientras que un observador situado retrasado el doble de la distancia óptima (izquierda), percibe una figura distorsionada, cuya profundidad duplica la anterior. La figura de la derecha, se corresponde con la posición de un observador adelantado a la mitad de la distancia de observación óptima, por lo que percibe una figura aplanada cuya profundidad se ha reducido a la mitad. El incremento de distancia que sufren los puntos de los modelos distorsionados en relación al cubo correcto es proporcional a la desviación del observador con respecto a la posición óptima a la que debería haberse situado; la translación que sufre un punto P , en la dirección del eje Z , puede determinarse mediante la ecuación:

$$\Delta P(z) = P(z) \cdot \frac{\Delta z}{d}$$

Siendo:

$\Delta P(z)$, Incremento de distancia que experimenta el punto considerado en la dirección del eje z

$P(z)$, coordenada z del punto considerado, antes de la distorsión

Δz , desviación en el eje z que experimenta el observador en relación a la posición óptima de visionado

d , distancia óptima de observación

10.4.2. Posición ladeada

Cuando el observador se sitúa a derecha o izquierda del punto de observación óptimo, se aprecia el volumen sesgado en la misma dirección en la que se produce la translación lateral del espectador, es decir, en la dirección del eje X , según el sistema de referencia adoptado (Fig. 10.11).

El valor de la translación que sufren los puntos es proporcional a la desviación del observador con respecto a la posición óptima y su valor obedece a la expresión:

$$\Delta P(x) = P(z) \cdot \frac{\Delta x}{d}$$

Siendo:

$\Delta P(x)$, Incremento de distancia que experimenta el punto considerado en la dirección del eje x

$P(z)$, coordenada z del punto considerado, antes de la distorsión

Δx , desviación en el eje x que experimenta el observador en relación a la posición óptima de visionado

d , distancia óptima de observación

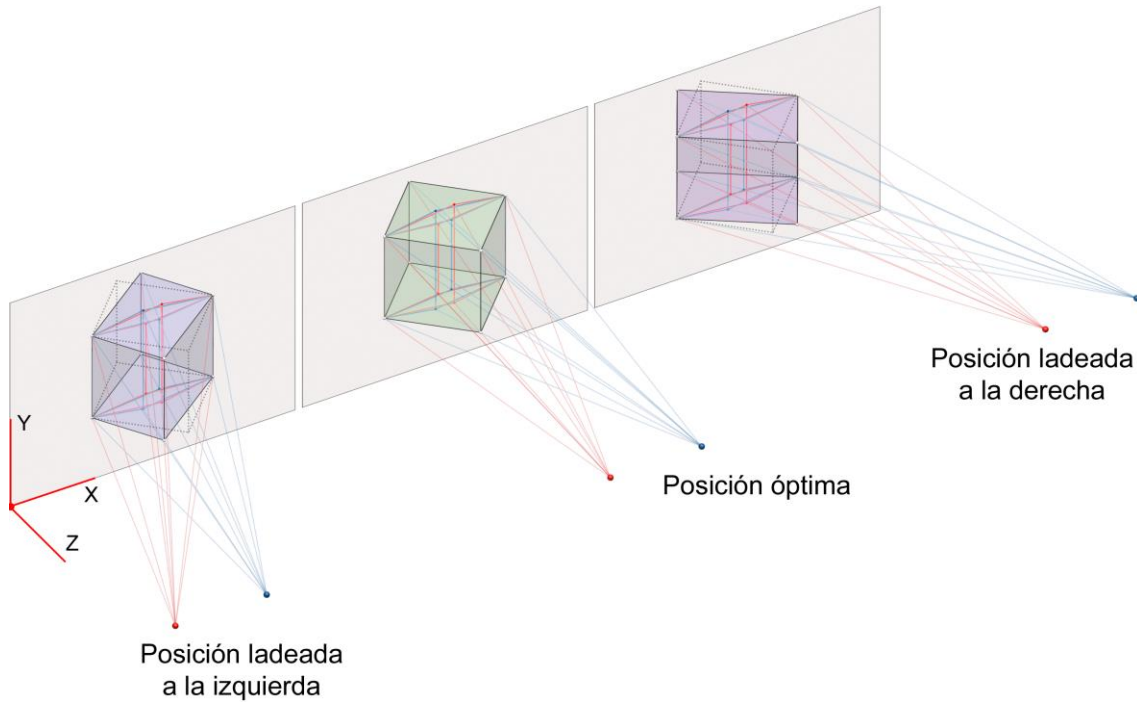


Fig. 10.11. Distorsiones debidas a una posición ladeada del espectador. Pedro Cabezos

10.4.3. Posición superior o inferior

Cuando se varía la posición del observador en sentido vertical, se produce una distorsión de la figura equivalente a un sesgado vertical (Fig. 10.12).

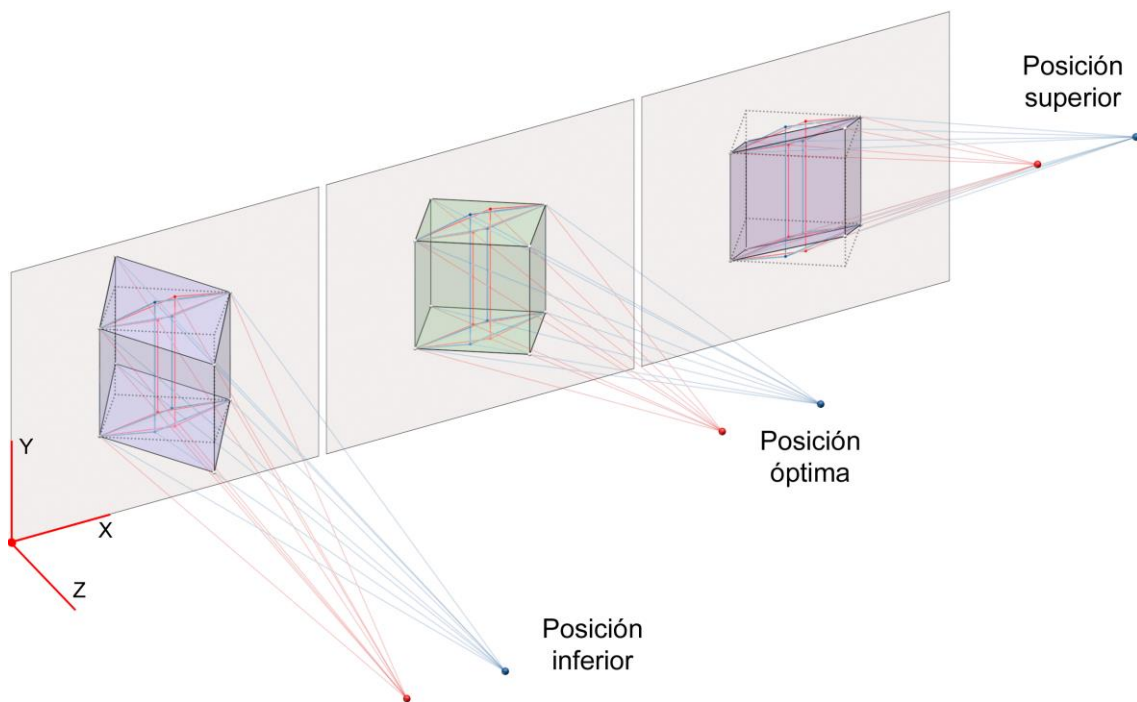


Fig. 10.12. Distorsiones debidas a posiciones de observación a distinto nivel. Pedro Cabezos

Si nos situamos por encima de la posición óptima, los puntos con paralaje negativo se perciben más altos y los que tienen paralaje positivo más bajos (Fig. 10.12, derecha), mientras que si nos situamos por debajo del punto óptimo ocurre justo lo contrario (Fig. 10.12, izquierda).

El valor de la translación vertical que sufren los puntos es proporcional a la desviación del observador con respecto a la posición óptima y su valor obedece a la expresión:

$$\Delta P(y) = P(z) \cdot \frac{\Delta y}{d}$$

Siendo:

$\Delta P(y)$, Incremento de distancia que experimenta el punto considerado en la dirección del eje y

$P(z)$, coordenada z del punto considerado, antes de la distorsión

Δy , desviación en el eje y que experimenta el observador en relación a la posición óptima de visionado

d , distancia óptima de observación

En la Fig. 10.13 se comparan las deformaciones producidas por las desviaciones del observador en cada una de las direcciones de los ejes coordenados, que obedecen a una homografía de centro impropio.

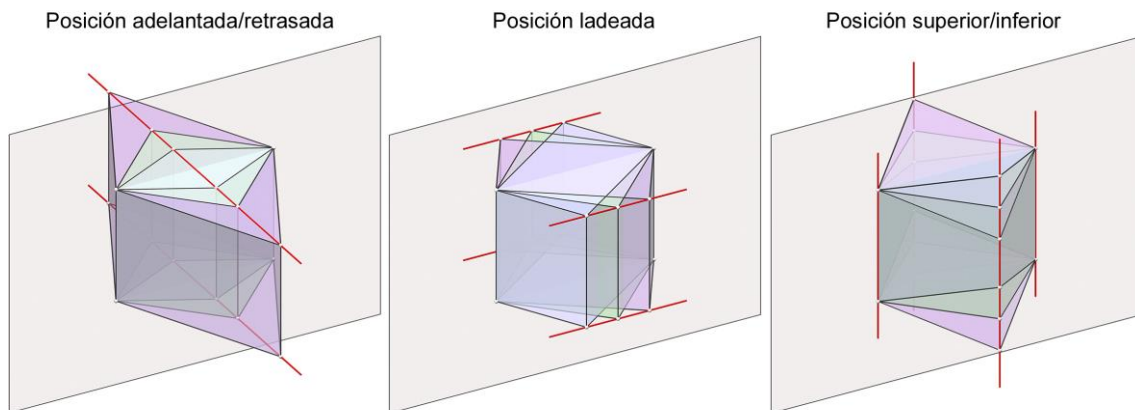


Fig. 10.13. Relaciones geométricas entre los modelos distorsionados por desviaciones de la posición del espectador en la dirección de los ejes coordenados. Pedro Cabezos

10.4.4. Posiciones genéricas

Cuando el observador se desplaza en una dirección que no es paralela a los ejes coordenados, se producirá el efecto combinado de las distorsiones que acabamos de estudiar, por lo que bastaría con hallar las componentes $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ de la posición del espectador, con relación a la posición óptima de observación, para hallar las componentes de la distorsión para cada uno de los puntos $\Delta P = (\Delta P(x), \Delta P(y), \Delta P(z))$, mediante las ecuaciones deducidas previamente:

$$\Delta P(x) = P(z) \cdot \frac{\Delta x}{d} ; \Delta P(y) = P(z) \cdot \frac{\Delta y}{d} ; \Delta P(z) = P(z) \cdot \frac{\Delta z}{d}$$

En la figura siguiente se comparan los diferentes modelos que se han restituido desde nueve posiciones distintas del observador; se ha señalado la posición del espectador en el mismo color que la figura que le corresponde. La figura que no presenta distorsiones es el cubo de color blanco que queda en posición central, mientras que los demás cuerpos se perciben distorsionados.

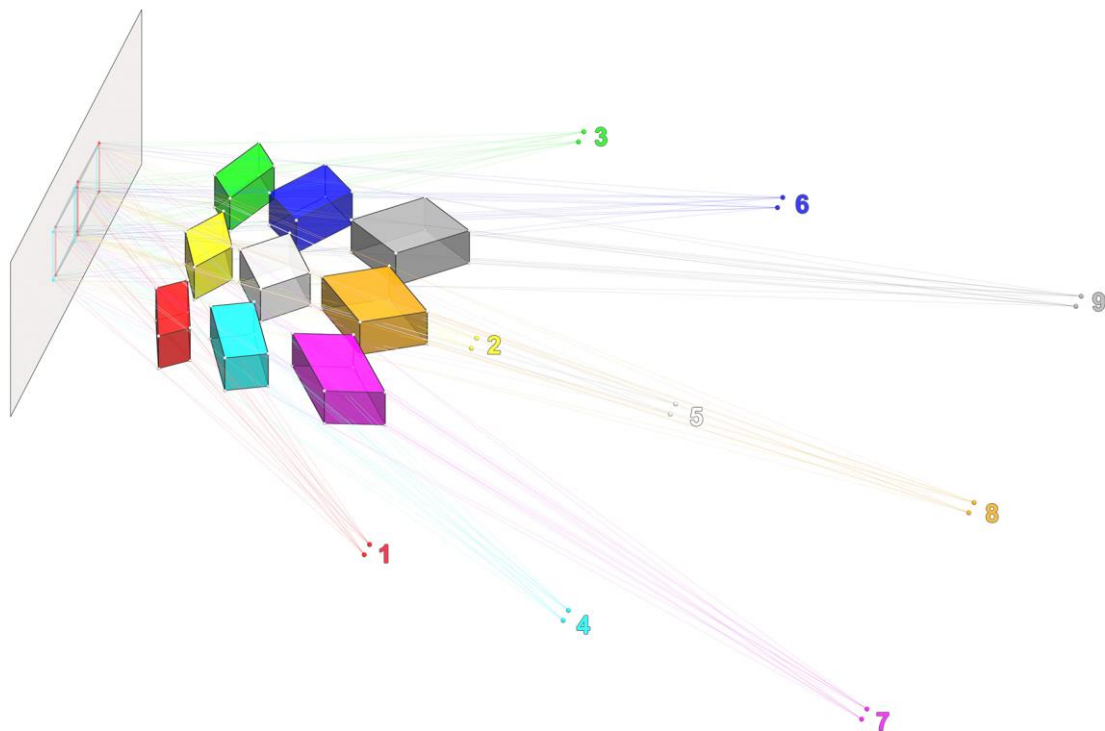


Fig. 10.14. Comparación entre las figuras restituidas desde 9 posiciones de observación. Pedro Cabezos

Esta deformación, provocada por la variación de la posición del observador, es la que induce el efecto de pseudo-movimiento que se percibe cuando, al contemplar una imagen estereoscópica estática, movemos la posición de nuestros ojos al desplazar lateralmente la cabeza, efecto que se hace mucho más evidente cuando se trata de un par estereoscópico anamórfico, pues las distorsiones que se producen en este caso son de mayor magnitud.

11. LOS MEDIOS DE REPRODUCCIÓN Y VISIONADO ACTUALES

Aunque suele referirse a los medios de visionado como los sistemas que permiten la visión estereoscópica, debemos aclarar que en estos sistemas suelen intervenir dos medios, el de reproducción y el de visionado, pues la conjugación de ambos posibilita la percepción estereoscópica. El medio de reproducción constituye el soporte en el que se materializa el par estereoscópico, como podría ser un papel impreso o una pantalla, mientras que el medio de visionado es el sistema visual que permite que cada ojo del espectador vean sólo la imagen que le corresponde.

Los medios de reproducción y visionado están íntimamente relacionados, pues es necesario el correcto funcionamiento de ambas partes para lograr un buen efecto estereoscópico. Por ejemplo, en un estereoscopio de lentes como el de Brewster, el medio de reproducción lo constituye la tarjeta estereoscópica que contiene el par, mientras que el medio de visionado es el propio estereoscopio. Si la fotografía está deteriorada, el efecto estereoscópico se verá mermado, aunque las lentes estén en perfecto estado. Por el contrario, si la tarjeta es perfecta, pero las lentes están deterioradas, el efecto también se verá perjudicado.

Algunos medios de visionado admiten diversos medios de reproducción y otros requieren un medio de reproducción específico y, en ciertos casos, ambos deben estar sincronizados dinámicamente.

Las condiciones de toma, vistas en capítulos anteriores, no dependen del medio de visionado, pero sí de las condiciones de visualización que éste pueda imponer. Cada medio de visionado suele requerir una técnica de reproducción específica y posee unas características propias que es necesario conocer, pues un fallo en cualquiera de los medios puede arruinar todo el trabajo previo.

A continuación, iremos describiendo las características de los distintos medios de reproducción y visionado actuales, para conocer sus particularidades y limitaciones.

11.1. La visión libre

La visión libre nos permite observar el efecto estereoscópico sin usar ningún dispositivo óptico adicional, pero para ello se debe adquirir un gran control de nuestros ojos que puede lograrse con paciencia y dedicación.

Existen dos modos de visión libre: la visión libre paralela, en la que debemos procurar que los ejes visuales de nuestros ojos se mantengan paralelos, y la visión libre cruzada, en la que debemos converger los ejes ópticos en su justa medida. Cada una de estas variantes requiere que las imágenes que constituyen el par sean reproducidas de una manera determinada.

Charles Wheatstone adquirió esta capacidad y la describió en su primer artículo (Wheatstone, 1838), pero siendo consciente de la dificultad que supone la adquisición

de esta capacidad para algunas personas, decidió desarrollar algunos aparatos que ayudaran a conseguir la visión libre cruzada; el primero estaba constituido por dos tubos que dirigían la mirada hacia un punto y el otro estaba compuesto por un cajón con una abertura que limitaba el campo visual para que cada ojo viera sólo la imagen que le correspondía.

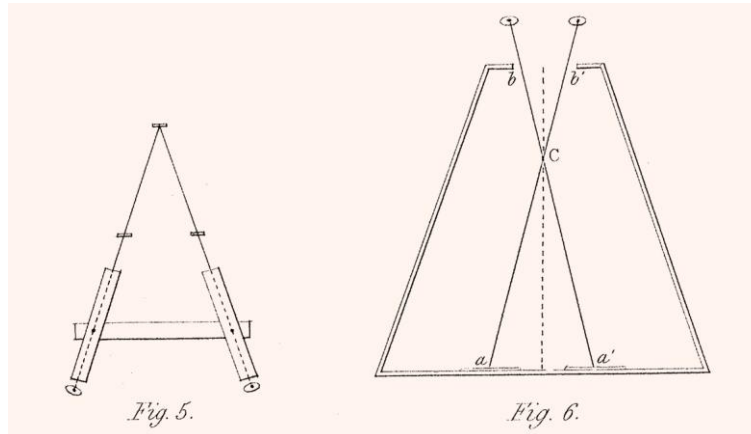


Fig. 11.1. Aparatos diseñados por Wheatstone para facilitar la visión libre cruzada. (Wheatstone, 1938:371)

11.1.1. La visión libre paralela

En la visión libre paralela, las imágenes deben disponerse una al lado de la otra, sin que lleguen a superponerse, de forma que la imagen correspondiente al ojo izquierdo, quede a la izquierda y la correspondiente al ojo derecho, a la derecha. Esta disposición resulta muy habitual y se le denomina *Side By Side Parallel*.

Aunque se puede tolerar cierto grado de divergencia, lo más aconsejable es procurar que el paralaje positivo máximo no rebase la distancia interpupilar media, para no producir divergencia de los ejes ópticos, lo que limita la anchura de las imágenes a un valor máximo de 6.5 cm.

En la Fig. 11.2 puede verse un par estereoscópico preparado para visión libre paralela. Para conseguir apreciar el relieve se debe relajar la vista, mirar hacia un punto alejado del observador y procurar que los ejes oculares permanezcan paralelos, luego debe dirigirse la mirada hacia el par, tratando de mantener los ejes oculares paralelos, lo que supone una de las mayores dificultades de este método, pues los ojos intentarían converger automáticamente hacia el papel.

Una vez se consigue mantener los ejes paralelos, el cristalino mantiene su enfoque al infinito y las imágenes tienden a verse desenfocadas; para verlas nítidamente, se debe lograr desarticular la relación natural entre convergencia y acomodación, tratando de ejercer una tensión voluntaria en el cristalino que nos permita enfocar al papel, sin alterar la convergencia. Cuando el espectador logra controlar la posición y enfoque se

beben apreciar tres imágenes: una imagen central, vista en relieve, y dos imágenes residuales a los laterales, algo desenfocadas y tenues (Fig. 11.3).



Fig. 11.2 Laocoonte. Adaptado de una vista estereoscópica de Underwood & Underwood. ca. 1900

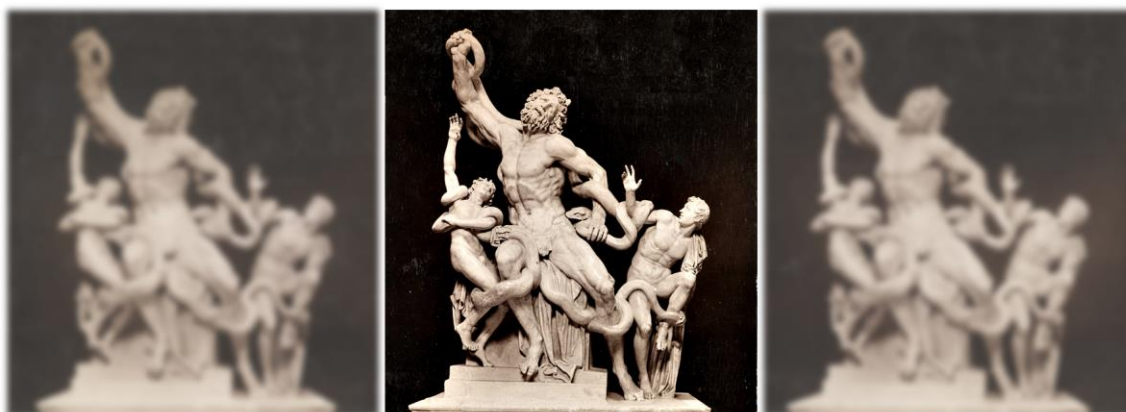


Fig. 11.3. Simulación de lo que debería apreciar el espectador. Pedro Cabezas

Adquirir esta capacidad no es nada sencillo y requiere grandes dosis de paciencia y tenacidad; resulta muy reconfortante poder ver con esta técnica después de haberlo intentado muchas veces sin éxito.

11.1.2. La visión libre cruzada

La visión libre cruzada puede resultar más fácil, sobre todo para aquellos que tienen facilidad de bizquear los ojos, pues se trata de cruzar los rayos visuales de manera que cada ojo vea la imagen que le corresponde. Para ello las imágenes deben permutarse con respecto a la visión paralela, es decir, las imágenes deben cruzarse, de modo que la imagen correspondiente al ojo derecho quede al lado izquierdo y la del ojo izquierdo, al lado derecho; esta disposición suele denominarse *Side By Side Crossed*.

Al contrario de lo que ocurre con la visión paralela, no hay una limitación tan estricta en el tamaño de las imágenes, sino que se deben prever tamaños que permitan una convergencia ocular natural que no supere los 18° , puesto que convergencias mayores pueden resultar molestas o quedar fuera de los límites fisiológicos.

La Fig. 11.4 muestra un par adaptado para la visión cruzada. Para su visualización se debe bizquear y procurar que los ejes visuales se orienten hacia la fotografía correspondiente, es decir, el ojo derecho debe mirar hacia la fotografía de la izquierda y viceversa. Cuando se logra la convergencia adecuada, el espectador verá tres imágenes, una imagen central, vista en relieve, y dos imágenes residuales a los laterales, de forma análoga al caso anterior (Fig. 11.5).

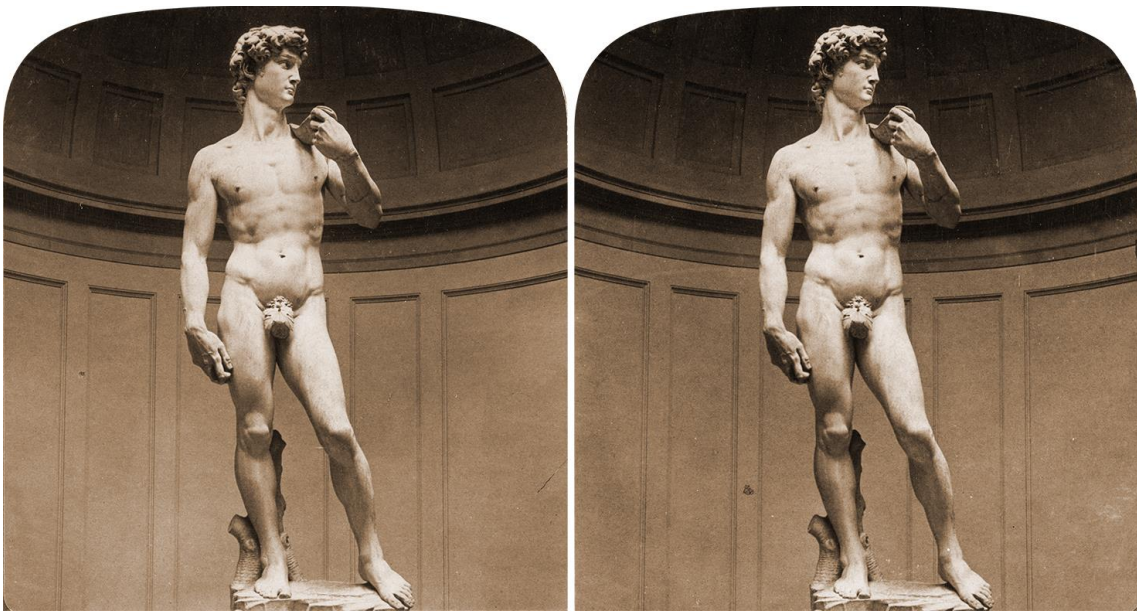


Fig. 11.4. David de M.A. Adaptado de una vista estereoscópica de Underwood & Underwood. ca. 1900



Fig. 11.5. Simulación de lo que debería apreciar el espectador. Pedro Cabezos

Al igual que sucede en la visión libre paralela esta técnica puede resultar complicada, pero en mi caso me ayudó mucho la utilización de la pantalla de papel, diseñada por el ingeniero militar José Estevan Clavillar (1935), que será descrita más adelante en el

capítulo de los dibujos estereoscópicos. Su función es análoga a los aparatos de Wheatstone y consiste en limitar el campo de visión ayudando a dirigir los ejes visuales y evitando la presencia de las imágenes residuales laterales. Recomiendo su construcción y uso a aquellos que tengan dificultades con esta técnica.

11.2. Los estereoscopios modernos

Ya fue comentado en capítulos anteriores que el estereoscopio refractor de Sir David Brewster fue el primero en comercializarse. A raíz de su éxito, se desarrollaron muchos más estereoscopios de este tipo que fueron evolucionando hacia una versión más liviana y reducida que los hacía más prácticos. Wing (1996) hace una excelente recopilación y catalogación de los diferentes modelos de estereoscopios y su evolución en sus 100 primeros años de historia.



Fig. 11.6. Pequeño estereoscopio promocional plegable de principios s. XX. Colección Carmen Ruiz Más

Los antiguos estereoscopios se han convertido en piezas de coleccionismo verdaderamente maravillosas, no sólo por su diseño y calidad óptica, sino porque, en combinación con las antiguas tarjetas fotográficas estereoscópicas, se convierten en una auténtica máquina del tiempo. Cuando miramos a través de sus antiguos anteojos, nos abstraemos de nuestra realidad cotidiana para sumergirnos en una estampa tridimensional, de otra época, que inunda nuestro campo visual.

Al margen de los antiguos estereoscopios, me interesa destacar algunos modelos fabricados en la actualidad, con un precio muy asequible, que pueden ser empleados con fines divulgativos o docentes.

La marca Loreo fabrica muchos complementos para la fotografía estereoscópica, entre los que se encuentra un visor estereoscópico plegable y liviano llamado *Loreo Lite 3D Viewer* (Fig. 11.7), que está construido en cartulina plastificada y posee unas lentes que proporcionan una buena calidad óptica, aunque pueden producir leves aberraciones cromáticas, en forma de halos, en situaciones de alto contraste.

Este estereoscopio sirve para visualizar pares del mismo tamaño y disposición que las antiguas tarjetas estereoscópicas, con una anchura total del par de entre 12 y 17 cm y una altura máxima de 10 cm. La distancia focal de las lentes permite un enfoque óptimo a distancias de observación de entre 12 y 20 cm.



Fig. 11.7. Loreo Lite 3D Viewer. www.loreo.com

Otro visor muy práctico y ligero es el denominado *Lorgnette 3D Viewer*, constituido únicamente por unas lentes de plástico con un asidero, que ofrecen una calidad de visionado algo inferior al modelo anterior, debido a que las aberraciones cromáticas que producen son bastante notorias.

La potencia refractiva y características de las lentes de este tipo de estereoscopios son muy similares, por lo que podrán utilizarse con los mismos tamaños y disposición comentados previamente.



Fig. 11.8. Lorgnette 3D Viewer

11.3. Los anaglifos

Un anaglifo es una imagen estereoscópica en la que las imágenes del par se representan utilizando colores complementarios y se emplean gafas con filtros de color para que cada ojo vea solo la imagen que le corresponde.

El método de los anaglifos fue descrito por primera vez en un sucinto artículo del profesor alemán Wilhelm Rollmann (1853). Cinco años más tarde, el profesor francés Joseph Charles d'Almeida, logró crear un método de proyección de anaglifos sobre una pantalla mediante la mezcla aditiva de luces de color complementario, pero los anaglifos deben su nombre al científico francés Louis Ducos Du Hauron, inventor de la fotografía en color, que patentó, en 1891, un método para realizar anaglifos a partir de fotografías, tal como él mismo explica en su obra *La triplice photographique des couleurs et l'imprimerie*, en la que dedica un capítulo a los anaglifos denominado *L'art des anaglyphes, a synthèse noir ou a synthèse polychrom* (Hauron, 1897:415-442).

Du Hauron distingue entre dos modalidades del método de los anaglifos: la síntesis en negro y la síntesis polícroma. El método de síntesis en negro es adecuado para representar anaglifos realizados mediante dibujos lineales que se trazan utilizando dos colores complementarios. Para que el observador aprecie los trazos del dibujo de color negro, se debe disponer, delante de cada ojo, un filtro de color complementario al del dibujo correspondiente, que no deje pasar su color. El espectador verá con cada ojo un sólo trazado de color negro, en contraste con un fondo claro.

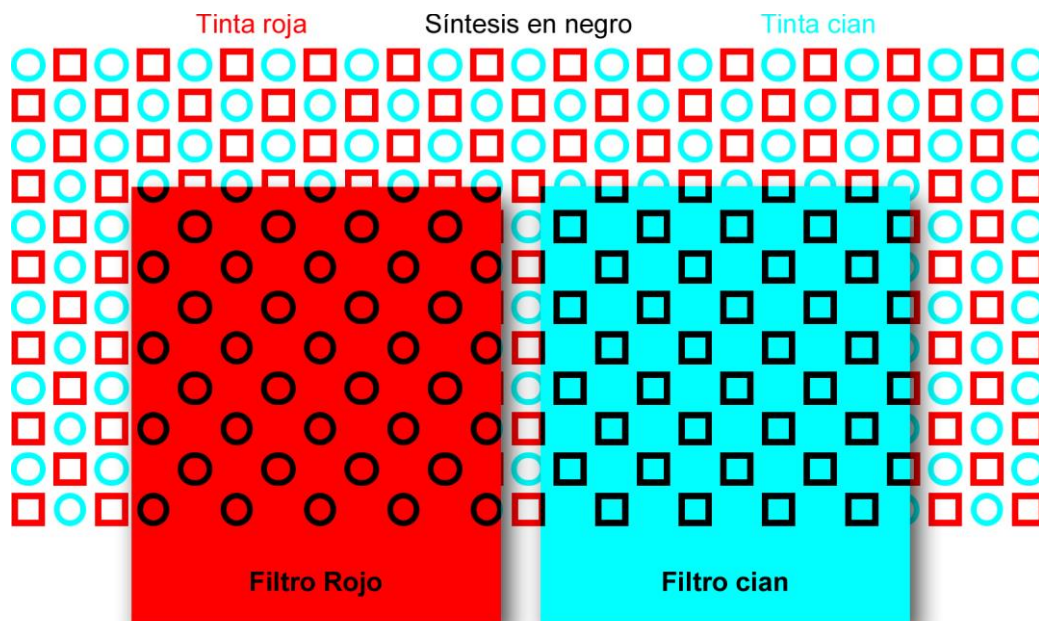


Fig. 11.9. Anaglifo de síntesis en negro. Pedro Cabezos

La síntesis policroma se aplica a anaglifos construidos a partir de imágenes en color, que pueden descomponerse en tres canales de color RGB (Red Green Blue). La combinación de dos canales genera colores complementarios al canal restante, por lo que el método consiste en formar el anaglifo mediante la combinación de dos de los canales pertenecientes a una imagen del par, más el canal restante que pertenecerá a la otra imagen, lo que da lugar a diferentes combinaciones (Fig. 11.10)

Imagen izquierda	Imagen derecha	Filtro izquierdo	Filtro derecho
Canal R	Canales G-B	Rojo	Cian
Canales R-G	Canal B	Amarillo	Azul
Canales R-B	Canal G	Magenta	Verde
Canales G-B	Canal R	Cian	Rojo
Canal B	Canales R-G	Azul	Amarillo
Canal G	Canales R-B	Verde	Magenta

Fig. 11.10. Posibles combinaciones entre canales y filtros necesarios para la síntesis policroma

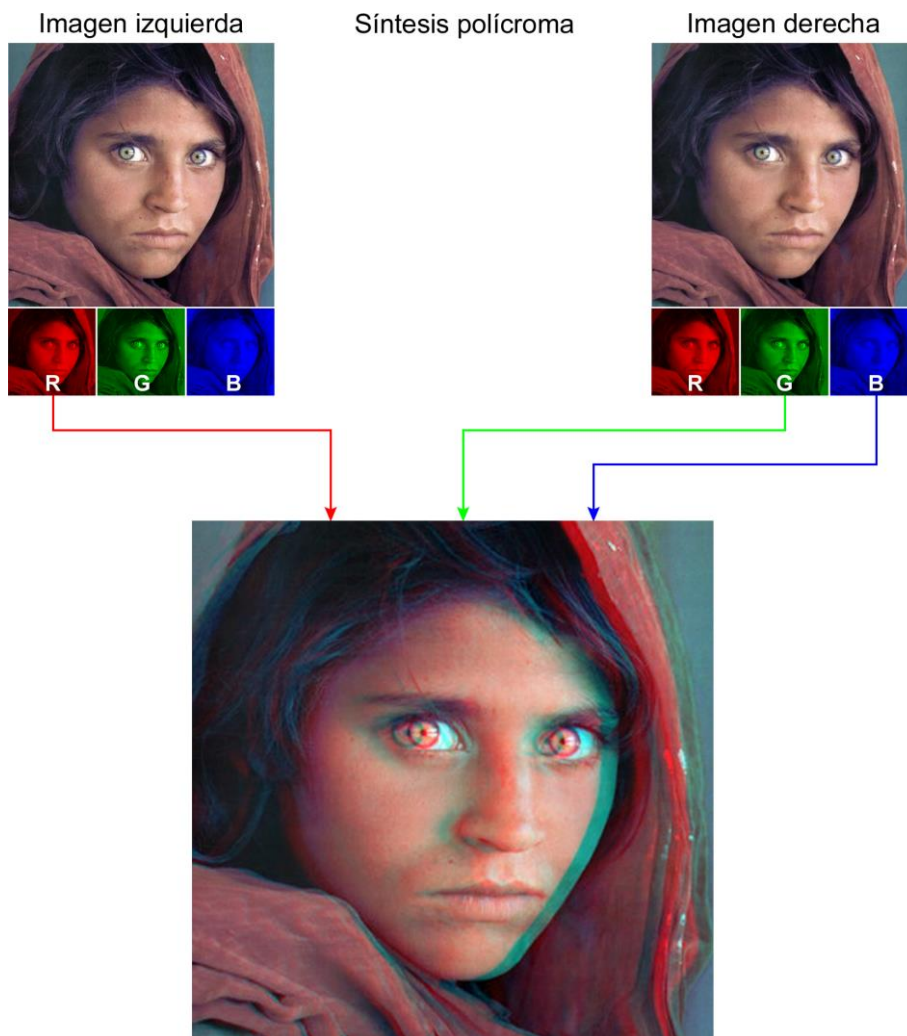



Fig. 11.11. Anaglifo de síntesis policroma con combinación R/GB. Pedro Cabezas (Conversión 3D de la niña afgana de Steve McCurry realizada por James Long. www.jim3dlong.com) 

Cada una de estas combinaciones necesita unas gafas con los filtros adecuados; las gafas más extendidas utilizan la combinación de filtros rojo/cian, que pueden adquirirse fácilmente a través de Internet a un precio muy bajo. El resto de combinaciones es bastante difícil de encontrar; la combinación amarillo/azul, tiene todavía una patente propiedad de la empresa ColorCode3D.

A diferencia de la síntesis en negro, en el que el emparejamiento filtro/pigmentos está pensado para bloquear el color de la imagen correspondiente al ojo, en la síntesis policroma el emparejamiento se alterna y el filtro deja pasar el canal o canales correspondientes a ese ojo; el cerebro se encarga de fusionar la información de color que llega descompuesta a través de cada ojo y de esta manera se logran percibir los colores, aunque éstos quedan algo desvirtuados por el efecto del filtrado.

Sin duda, el punto débil de los anaglifos es su limitación para reproducir fielmente los colores, junto con otros problemas de rivalidad retiniana que pueden surgir si hay colores presentes en las imágenes originales coincidentes con el de los filtros, como fue ya comentado en el capítulo del confort visual. Otra dificultad importante de este método es el efecto *ghosting*, que se produce cuando los filtros no logran separar las imágenes convenientemente. Este problema se acentúa en los medios de reproducción impresos, por ello se analizarán más adelante los motivos de este problema y se expondrá un método de optimización del color que he desarrollado para minimizar el efecto *ghosting*.

Al margen de estas desventajas, los anaglifos resultan un medio muy válido cuando el color no es una cuestión crucial, pues es un método de visionado muy eficiente y económico, que no requiere grandes medios tecnológicos.

El óptico parisino Alfred Molteni estuvo utilizando los anaglifos, desde 1890, en sus proyecciones de linterna mágica y la incursión de los anaglifos en los medios impresos comenzó en América, donde las publicaciones dominicales ya los incluían a finales de la década de 1890. También fueron el método de visionado empleado en la primera proyección comercial de cine estereoscópico, llevada a cabo en 1922, en el Hotel *Ambassador* de Los Ángeles, con la proyección del film *The power of love*. Los anaglifos se siguieron utilizando en proyecciones de cine hasta la década de los 50, en la que empezaron a sustituirse por los sistemas de luz polarizada (Zone, 2007).

11.4. Los sistemas de luz polarizada

La luz está compuesta por ondas electromagnéticas que vibran en todos los planos que contienen a su trayectoria. Los filtros polarizadores están formados por un material que deja pasar sólo las ondas con una determinada dirección de oscilación y cuando la luz los atraviesa se obtiene luz polarizada.

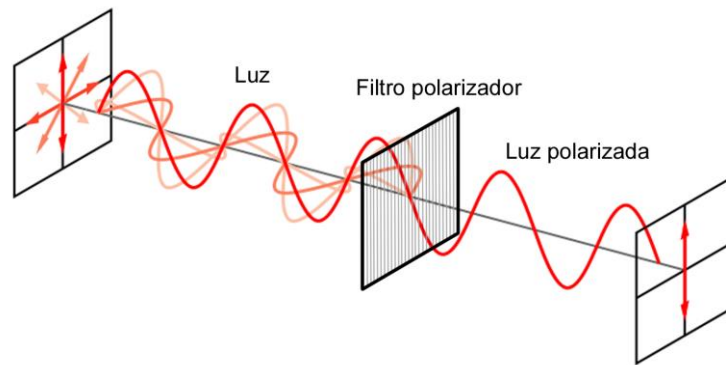


Fig. 11.12. Polarización lineal de la luz. Adaptado de un diagrama de Bob Mellish

Los primeros descubrimientos acerca de la polarización fueron realizados por el científico danés Rasmus Bartholin en 1669, quien observó la doble refracción o birrefringencia que se producía cuando la luz atravesaba las caras de una pieza de espato de Islandia, una variedad de calcita transparente y romboédrica. Más tarde, en 1828, el científico escocés William Nicol seccionó diagonalmente una pieza de espato de Islandia y volvió a unir sus partes utilizando un pegamento óptico denominado bálsamo de Canadá, creando lo que más tarde sería denominado Prisma de Nicol. El Prisma de Nicol funciona como un polarizador lineal; la luz que penetra por una de sus caras se divide en dos haces polarizados (haz ordinario y haz extraordinario), por la birrefringencia de la calcita. Cuando los haces inciden sobre el plano de corte, el haz ordinario es reflejado y sale por una faceta contigua a la de entrada, mientras que el haz extraordinario se refracta y sale polarizado por la faceta opuesta (Fig. 11.13, izda.).

John Anderton ideó en 1991 un sistema para proyectar imágenes estereoscópicas utilizando luz polarizada (Drouin, 1894) (Zone, 2007). El sistema constaba de dos proyectores a los que se les ponía delante un polarizador constituido por un Prisma de Nicol. Ambos prismas estaban girados 90° , uno con respecto al otro, según el eje de proyección, de manera que polarizaban la luz en dos direcciones ortogonales. Para conseguir que la luz no perdiera la polarización tras reflejarse en la pantalla era necesario que ésta estuviera metalizada. El espectador debía llevar unas gafas, al estilo de los anteojos de ópera, cuyas lentes estaban constituidas por Prismas de Nicol con la misma orientación que los proyectores, para procurar que cada ojo viera la imagen correspondiente Fig. 11.13 (dcha.).

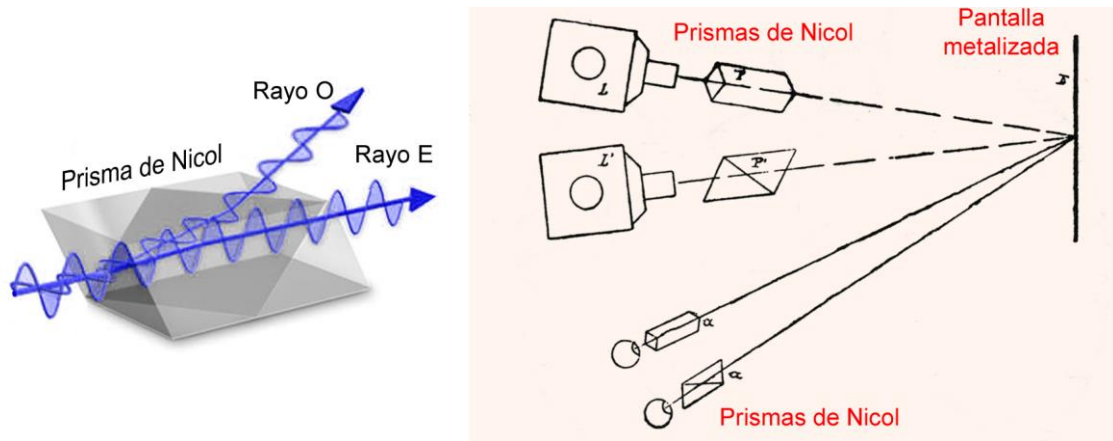


Fig. 11.13. Polarización de la luz mediante un prisma de Nicol (izda.). Esquema de funcionamiento del sistema ideado por John Anderton. (Drouin, 1894:88)

En 1929, Polaroid patenta su filtro polarizador, que sustituye rápidamente a los prismas de Nicol. El filtro de Polaroid actual es una delgada película de un polímero denominado alcohol de polivinilo (PVA), impregnado con yodo, cuyas cadenas moleculares se alinean en una dirección mediante el estiramiento de la lámina. Gracias a esta configuración, la lámina bloquea las ondas luminosas que oscilan en la dirección paralela a la alineación molecular y deja pasar aquellas que oscilan ortogonalmente.

Las primeras proyecciones públicas con el sistema Polaroid se realizaron en el Museo de las Ciencias de Nueva York en 1936 (Zone, 2007:152).

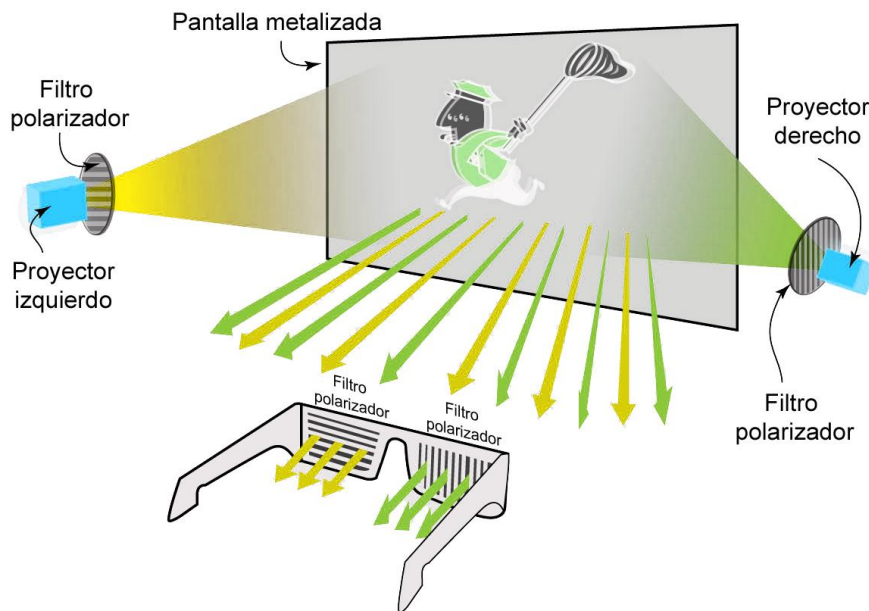


Fig. 11.14. Sistema de visionado estereoscópico mediante polarización lineal. (Adaptado de dpreview.com)

En la polarización lineal los haces luminosos que proyectan las imágenes oscilan en dos direcciones ortogonales, por lo que, si el observador gira lateralmente la cabeza,

dejará de ver las imágenes, porque la orientación de los filtros impedirá el paso de la luz polarizada. Para solventar este inconveniente se empezó a utilizar la polarización circular, que se consigue mediante la combinación de un polarizador lineal y una lámina de onda o retardador, que produce un desfase de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda entre el campo magnético y el eléctrico, que hace que la oscilación de la onda siga una hélice cilíndrica. La orientación del polarizador lineal condiciona el sentido de giro de la hélice, de modo que, si el polarizador se gira 90° , el sentido de giro se invierte.

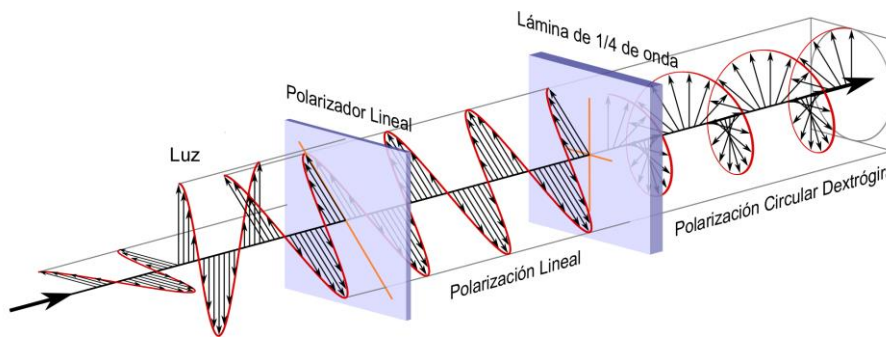


Fig. 11.15. Polarización circular dextrógira

El sistema de polarización circular se utiliza actualmente en muchos sistemas como el REALD, con un único proyector de alta frecuencia, que se emplea en la mayoría de salas de cine 3D. También se utiliza en los sistemas IMAX3D panorámicos y en algunos televisores 3D, denominados de sistema pasivo, en donde el panel TFT-LCD muestra las imágenes entrelazadas horizontalmente, es decir, las filas de transistores impares componen la imagen derecha y las filas pares, la izquierda, con la desventaja de perder la mitad de resolución en el sentido vertical, pero esto no supone un inconveniente en las modernas televisiones con resolución 4K.

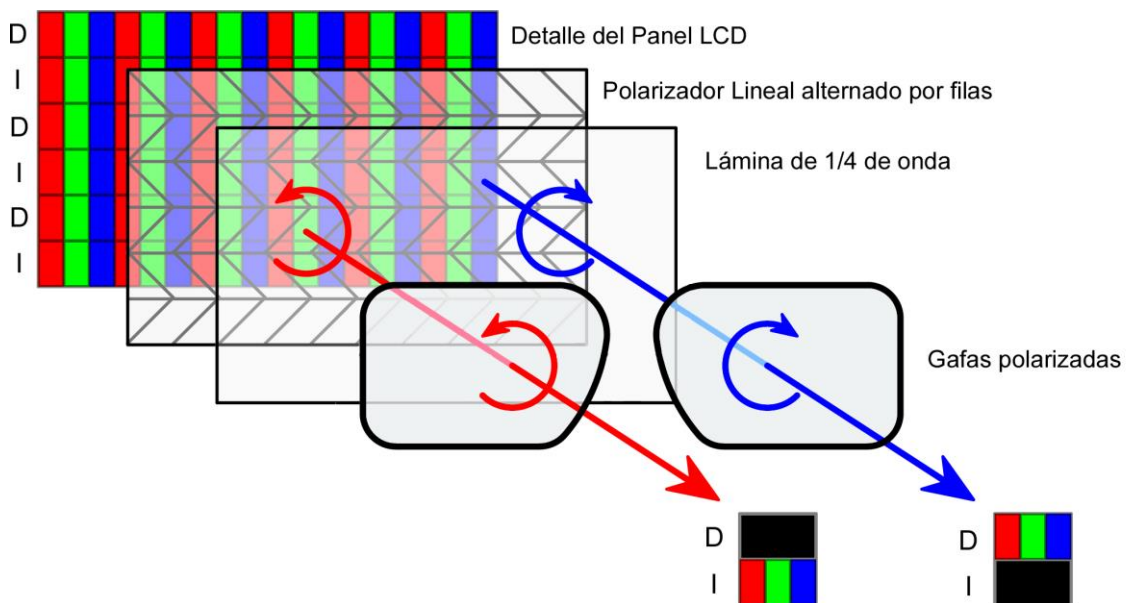


Fig. 11.16. Funcionamiento de un televisor TFT-LCD con sistema polarizado. Pedro Cabezos

11.5. Los sistemas activos

Los sistemas que hoy en día denominamos activos, son el resultado de la evolución del Estereoscopio Eclipse, inventado por Charles d'Almeida en 1858, que consistía en el uso de dos proyectores que mostraban las imágenes del par de forma alterna, gracias a un obturador que estaba sincronizado con otro, situado ante los ojos del observador, que permitía que cada ojo viera la imagen que le correspondía. El obturador debía funcionar a gran velocidad para que el espectador no apreciara el parpadeo y pudiera lograrse el efecto estereoscópico gracias al fenómeno de persistencia de la visión. D'Almeida sugería el uso de electroimanes para lograr el sincronismo entre obturadores (Fig. 11.17, izda.) (Drouin, 1894).

A. Stroh presentó en 1886 ante la *Royal Society* de Londres, un estereoscopio Eclipse, para dos observadores, dotado de un obturador giratorio capaz de producir una frecuencia de 30 a 40 imágenes por segundo. El obturador estaba constituido por un disco con dos hendiduras que dejaban pasar la luz emitida por los proyectores, de forma alterna, al girar a una velocidad de entre 15 y 20 revoluciones por segundo. Los espectadores debían colocarse a ambos lados donde habían unas aberturas sincronizadas con el disco (Fig. 11.17, dcha) (Drouin, 1894).

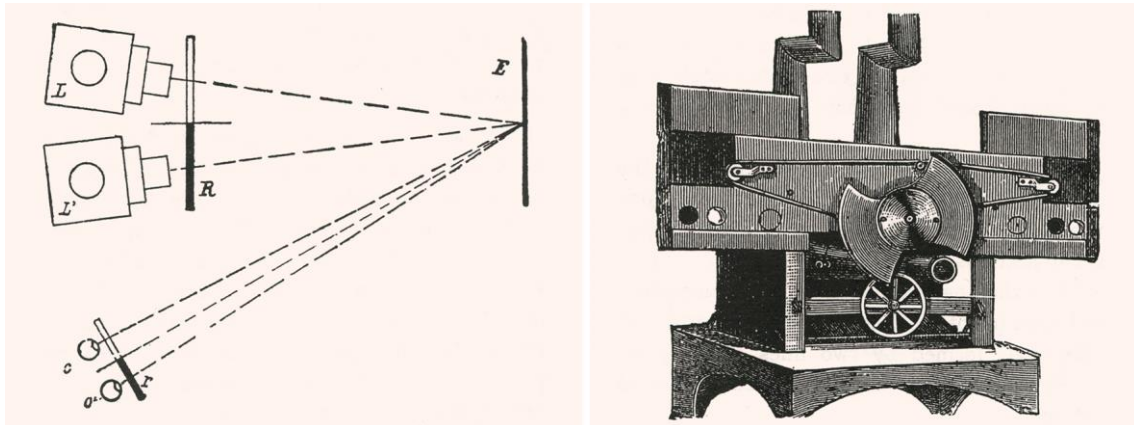


Fig. 11.17. Esquema del funcionamiento del estereoscopio Eclipse inventado por d'Almeida (izda.). Estereoscopio Eclipse de A. Stroh. (dcha.). (Drouin, 1894:84-85).

Los sistemas actuales utilizan pantallas TFT-LCD, capaces de alternar las imágenes a una frecuencia de 60 cuadros por segundo, evitando así el efecto de parpadeo o *flickering*. El espectador utiliza unas gafas de cristal líquido, denominadas *Active Shutter Glasses*, que se oscurecen o dejan pasar la luz de manera alterna y sincronizada con la pantalla. Normalmente la sincronización se efectúa mediante señales infrarrojas.

La ventaja primordial de este sistema es que se aprovecha toda la resolución de la pantalla, por el contrario la tecnología necesaria para las gafas hace que estas

resulten bastante caras y requieran de una batería para su funcionamiento, lo que las hace algo más pesadas y voluminosas.

En la actualidad, este sistema se emplea principalmente en algunos tipos de televisores 3D y en sistemas de visionado para ordenadores como NVIDIA 3D VISION. También los sistemas de realidad virtual CAVE, utilizan el sistema activo, pero usan proyectores de alta frecuencia en vez de pantallas TFT-LCD.



Fig. 11.18. Sistema CAVE de realidad virtual. Vista desde el exterior con los proyectores (izda.) y vista interior del recinto (dcha.). (Sáiz et al, 2010)

11.6. Los visores personales

Los visores personales, también llamados cascos de realidad virtual o *Head Mounted Displays*, tienen dos pantallas independientes, una para cada ojo, que ofrecen un gran ángulo visual y proporcionan un entorno de visualización inmersivo.

El primer visor de este tipo fue el *Ultimate Display* o *Espada de Damocles*, desarrollado en 1968 por Ivan Sutherland, inventor del Sketchpad, primer dispositivo de diseño asistido por ordenador. Sutherland, ayudado de su estudiante Bob Sproull, logró construir un dispositivo parecido al que había imaginado tres años antes, definiéndolo de la siguiente manera:

“El -Ultimate Display- sería una habitación dentro de la cual el ordenador puede controlar la existencia de la materia. Una silla representada en esta habitación, serviría para sentarse en ella, unas esposas que se representarían en ella, podrían detenerte y una bala representada en esta habitación, resultaría fatal. Con la programación adecuada, esta representación podría ser literalmente el país de las maravillas por el que anduvo Alicia”

(Sutherland, 1965) (Fragmento traducido)

El dispositivo de Sutherland contaba con sensores para controlar el movimiento de la cabeza del espectador, característica denominada actualmente *Head Tracking*, que permite interactuar con el software, de forma que este responda a los giros y translaciones del espectador, mejorando así la experiencia inmersiva.

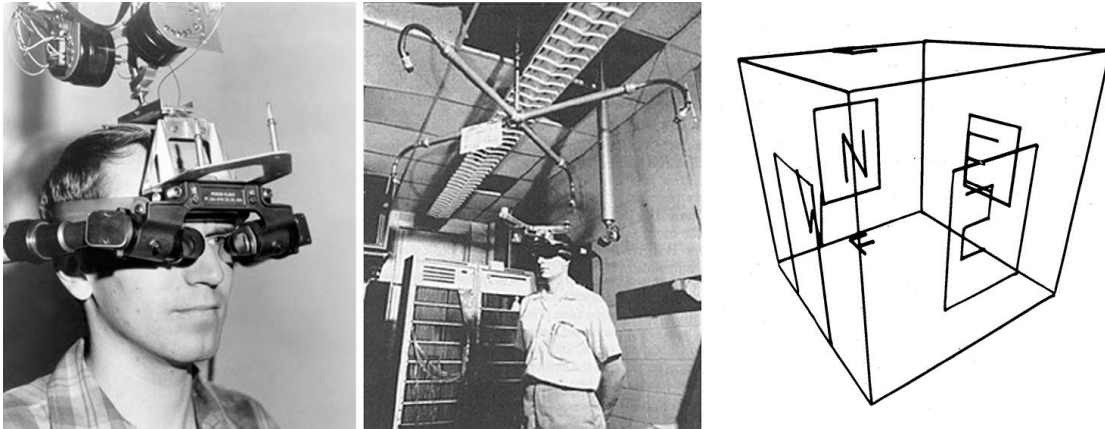


Fig. 11.19. *The Ultimate Display o Espada de Damocles.* (Sutherland,1968)

La mayoría de los dispositivos actuales están orientados al uso de videojuegos, que pueden resultar una plataforma de visualización excepcional, si los adaptamos a nuestras necesidades. Hay programas gratuitos para el desarrollo de videojuegos como CRYENGINE y UNREAL, que pueden utilizarse como un entorno de realidad virtual en el que podemos visualizar nuestros propios modelos tridimensionales. La industria de los videojuegos mueve mucho dinero y las empresas dedican muchos esfuerzos a la optimización del software, lo que ocasiona que la capacidad de renderizado en tiempo real de los videojuegos supere con creces la de otros programas de pago diseñados específicamente para la realidad virtual.



Fig. 11.20. Visor personal Vuzix iWear (izda.) y Sony Personal Viewer (dcha.)

Empresas emergentes como Oculus Rift, ofrecen un visor con un kit de desarrollo a un precio muy económico y también aportan un modelo de visor personal que utiliza la pantalla de un Smartphone (Fig. 11.21). El proyecto Cardboard⁹, aporta los diseños y el software necesario para fabricarse un visor de este tipo. Basta con un kit de lentes, un poco de cartón y algo de velcro para sujetar el móvil (Fig. 11.22).



Fig. 11.21. Visor personal diseñado por Óculus que utiliza un Smartphone como pantalla

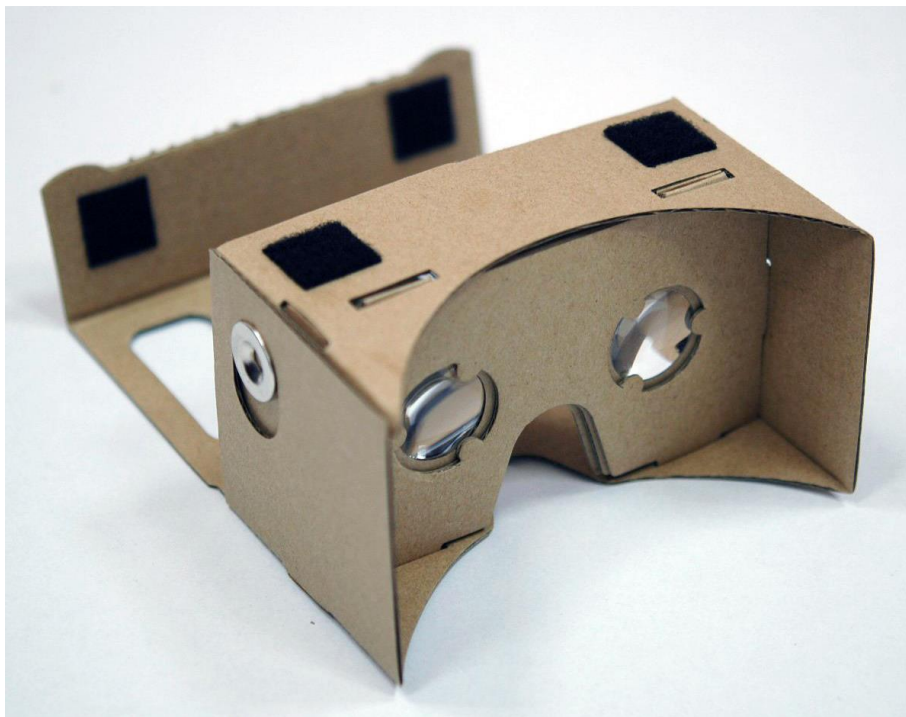


Fig. 11.22. Proyecto Cardboard. Visor personal de cartón para usar con un Smartphone

⁹ <http://gweb-cardboard.appspot.com/>

11.7. La estereoscopia a través de Internet

Actualmente, se puede encontrar mucho contenido estereoscópico en la Red, la mayoría en forma de anaglifos, imágenes para visión libre o algunos canales de televisión que emiten contenido estereoscópico compatible con los televisores 3D.

Sin duda la estereoscopia vive un momento álgido y los usuarios demandan este tipo de contenido. De momento, la plataforma YouTube es la única que ha añadido la posibilidad de visionar y subir videos estereoscópicos.

El sistema empleado por YouTube es capaz de sacar partido a las nuevas funcionalidades del lenguaje HTML5 y nos permite visualizar los videos en varios tipos de formatos como el anaglifo, entrelazado, visión paralela y HTML5, compatible con el sistema de visión activa NVIDIA 3D VISION.

El sistema se encarga de hacer la conversión entre formatos, en tiempo real, a partir de un único video que haya sido subido en formato *Side By Side*, el usuario sólo tiene que asignar al video una serie de etiquetas como veremos posteriormente, para que éste se identifique como un video estereoscópico.

Para elegir entre los distintos modos de visualización, el usuario debe dirigirse a las opciones que se encuentran en el panel de navegación, representado por un icono en forma de engranaje, desde el que además se puede elegir la resolución del video.

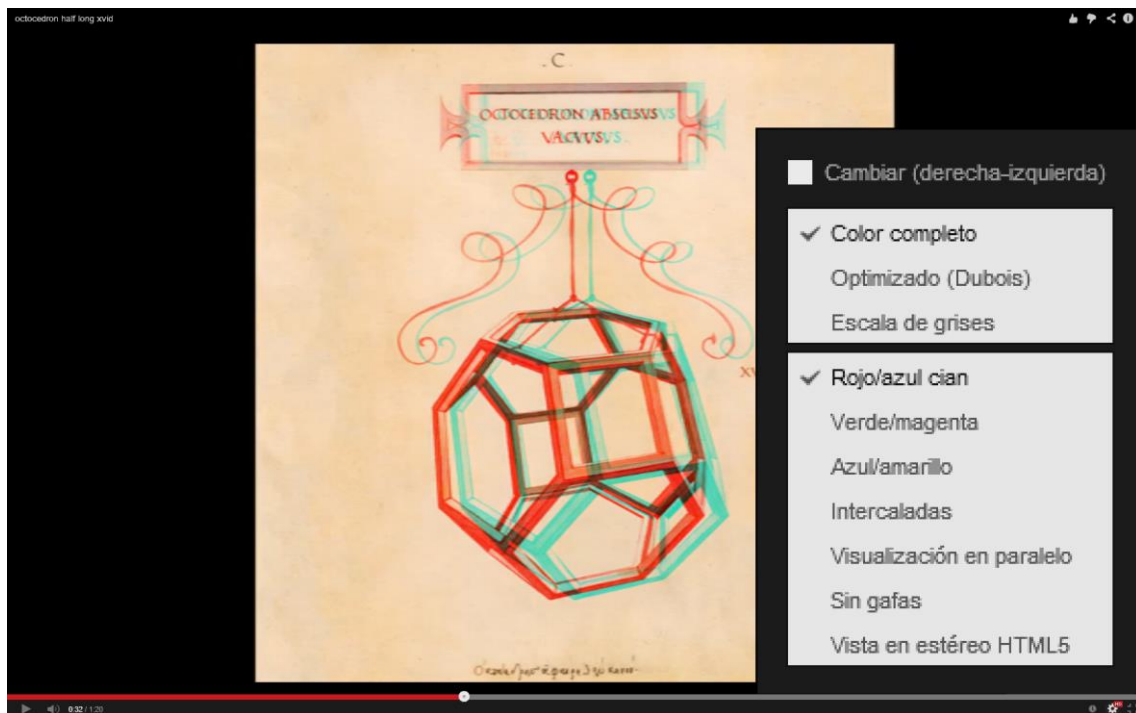


Fig. 11.23. Video estereoscópico en YouTube con las diferentes opciones de visualización. Pedro Cabezos

11.8. Los sistemas autoestereoscópicos

La autoestereoscopia comprende los métodos de visionado que no necesitan gafas o ninguna otra técnica de visionado para apreciar el efecto estereoscópico.

El primer método autoestereoscópico fue la barrera de paralaje, descrita por primera vez en 1896 por Auguste Berthier, en un artículo publicado en la revista Cosmos (Berthier, 1896). Frederic E. Ives produjo en 1903 las primeras imágenes autoestereoscópicas con barrera de paralaje (*parallax stereogram*) utilizando el método de captura fotográfica que él mismo había patentado (Ives, 1903).

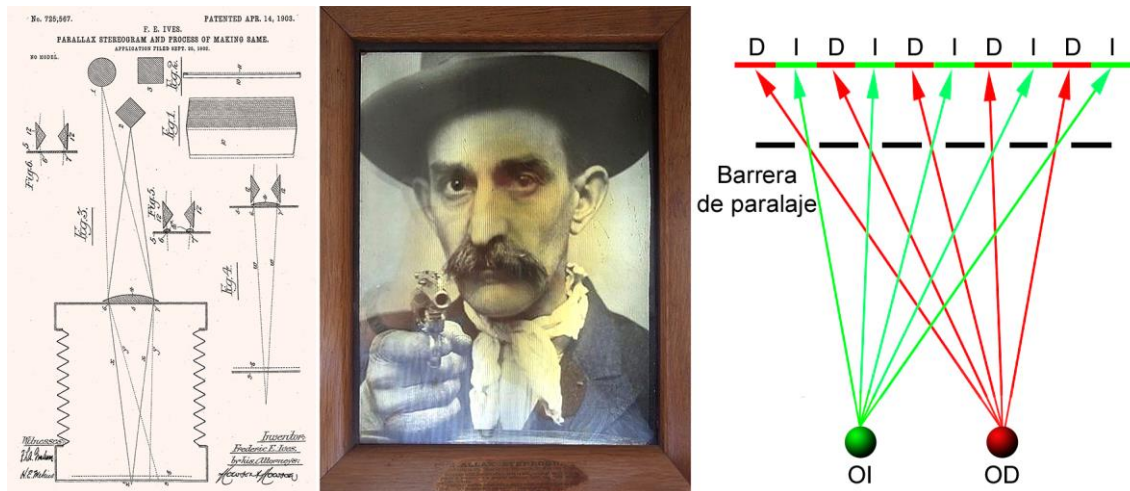


Fig. 11.24., Patente de Frederic E. Ives (izda.). Frederic E. Ives, 1903, *The Brigand*, Estereograma con barrera de paralaje (centro). Esquema de funcionamiento de una barrera de paralaje (dcha.)

La barrera de paralaje está formada por una sucesión de tiras verticales opacas que dejan un espacio entre ellas. La barrera se coloca por delante del estereograma, que está constituido por una imagen entrelazada con una sucesión de franjas verticales pertenecientes a cada una de las imágenes del par. La anchura de estas franjas y el paso de la barrera deben calcularse teniendo en cuenta la posición del observador y la separación de la barrera en relación al estereograma.

La barrera de paralaje se aplica en la mayoría de los dispositivos autoestereoscópicos actuales, que son muy escasos porque condicionan mucho la posición del observador y limitan el número de observadores. En estos dispositivos se utiliza una pantalla de cristal líquido LCD adicional que actúa como una barrera de paralaje, gracias a su capacidad de hacerse opaca o transparente y en ella pueden representarse líneas opacas verticales con anchuras micrométricas. La barrera LCD puede activarse o desactivarse para cambiar entre el modo 2D y 3D. La casa SHARP ha desarrollado un panel autoestereoscópico en el que la barrera de paralaje queda por detrás de la pantalla TFT-LCD e impide o permite la retroiluminación de los transistores (Fig. 11.25).

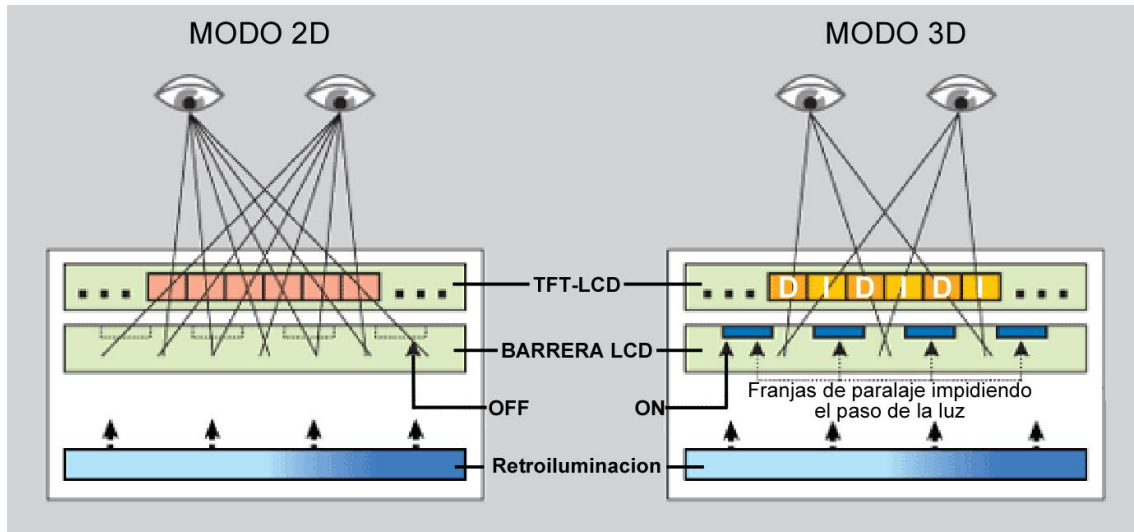


Fig. 11.25. Esquema de funcionamiento de una pantalla autoestereoscópica de la casa SHARP con barrera de paralaje LCD en posición trasera al panel TFT-LCD.



Fig. 11.26. Dispositivos con pantalla autoestereoscópica mediante barrera de paralaje LCD Smartphone LG Optimus 3D (izda.) y Videoconsola portátil Nintendo 3DS (dcha.)

Algunos dispositivos utilizan una cámara para detectar la posición del espectador, proceso denominado *eye tracking*, para calcular la posición correcta de la imagen en la pantalla con respecto a la posición del espectador y evitar así los efectos de *ghosting* y pseudoscopia.

Otro de los sistemas autoestereoscópicos se debe al desarrollo de las lentes lenticulares, constituidas por una matriz lineal de lentes cilíndricas de un material plástico que, cuando se disponen sobre un estereograma entrelazado, nos permiten contemplar el efecto estereoscópico gracias al efecto refractivo de las lentes.

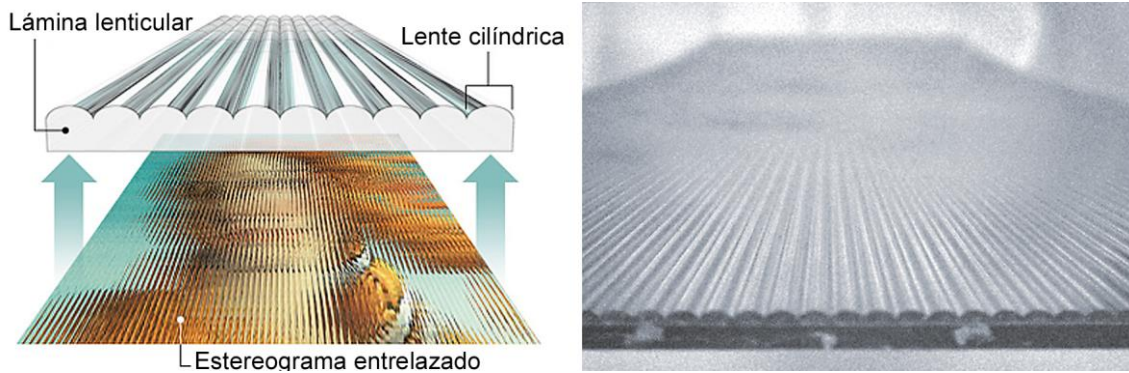


Fig. 11.27. Descripción de las láminas lenticulares

Las láminas lenticulares producen un efecto similar al de la barrera de paralaje, pero con la ventaja de proporcionar una mayor continuidad visual.

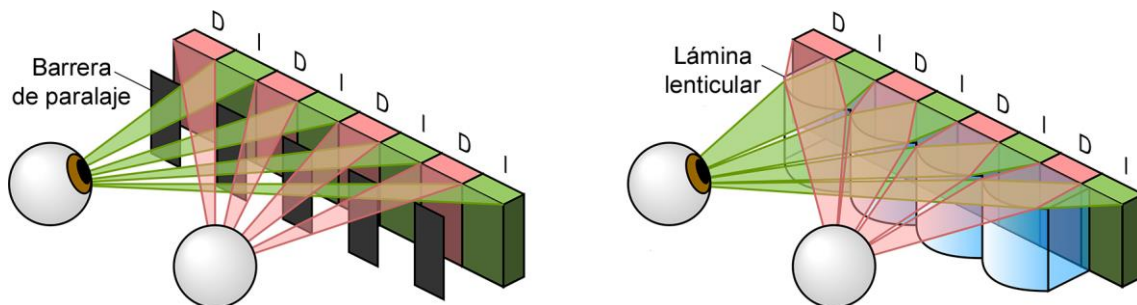


Fig. 11.28. Barrera de paralaje vs. Lámina Lenticular.

Las láminas lenticulares fueron desarrolladas por varios científicos a finales de la década de 1920, entre los que se incluye, Herbert Ives, hijo de Frederic E. Ives, pero la puesta en práctica a gran escala de este método no sería posible hasta el año 1964, cuando la revista *Look*, incluye una postal autoestereoscópica en blanco y negro con el busto de Thomas Edison rodeado de sus inventos más famosos, del que se vendieron más de 8 millones de ejemplares (Roberts, 2003).



Fig. 11.29. Primeros estereogramas lenticulares publicados por la revista *Look*, en 1965

A través de Internet puede contactarse con empresas que imprimen estereogramas lenticulares, a partir de nuestros propios pares estereoscópicos, o bien, comprar directamente las láminas para adherirlas sobre una impresión convencional.

Las láminas lenticulares pueden disponerse sobre paneles TFT-LCD. Algunos fabricantes como Philips las han empleado en su línea de televisores WOWvx. La empresa 3DSlide, suministra láminas lenticulares a medida para colocar sobre pantallas de portátiles y teléfonos móviles de última generación. El software aportado puede aprovechar la cámara incorporada para efectuar el seguimiento ocular y poder posicionar convenientemente la imagen entrelazada con respecto al espectador.

Actualmente se está investigando en otra serie de pantallas autoestereoscópicas como las holográficas y las volumétricas, pero su alta complejidad técnica no hace todavía viable su comercialización.

12. LA EDICIÓN DE MATERIAL ESTEREOSCÓPICO

Este capítulo expone algunas herramientas y procedimientos de edición digital que nos permitirán adecuar el par estereoscópico a los sistemas de visionado más comunes. Hay métodos que requieren un tipo de representación específica, como pueden ser los anaglifos, mientras que hay formatos estereoscópicos que pueden ser soportados por varios medios de visionado, como sucede en el caso de los televisores 3D activos y los pasivos.

Muchos de los métodos que aquí se exponen son fruto de una investigación de los formatos digitales soportados por los distintos fabricantes de dispositivos 3D. Al tratarse de una tecnología incipiente, la información técnica es escasa y dispersa, por lo que me ha parecido muy conveniente realizar una guía de referencia que aglutine toda la información y ofrezca unas pautas acerca de los formatos soportados, sus características y metodologías para la edición y montaje, que resultará de gran ayuda para la divulgación de los contenidos estereoscópicos a través de estas novedosas vías de difusión.

12.1. Los formatos soportados por los televisores y dispositivos 3D

Los televisores 3D actuales, ya sean de sistema activo o luz polarizada, soportan en su mayoría una serie de formatos digitales, que han sido definidos para cumplir los estándares EIA/CEA-861, definidos por la CEA (*Consumer Electronic Association*), que normalizan la transmisión de datos a través de los conectores HDMI (*High Definition Multimedia Interface*) y DVI (*Digital Visual Interface*).

Algunos de estos formatos están destinados a la representación de imágenes estáticas y otros están optimizados para codificar videos, por lo que los analizaremos separadamente.

12.1.1. Los formatos estáticos

Básicamente hay 3 formatos compatibles con la mayoría de televisores 3D actuales, el JPG, el JPS y el MPO, siendo este último uno de los más recomendables. Para visualizar este tipo de formatos, lo más cómodo es almacenarlos en una memoria USB, que puede ser conectada directamente al televisor, o bien, guardarlos en un disco DVD o CD-ROM, para ser reproducidos mediante un lector de DVD conectado al televisor.

El formato JPG es el archiconocido formato gráfico creado por el *Joint Photographic Experts Group* en 1986 y su codificación es la misma que para una imagen 2D. La diferencia entre un JPG 2D y uno 3D está en el contenido; para que un JPG pueda ser visualizado estereoscópicamente, debe contener las imágenes del par estereoscópico en disposición Side By Side (SBS), o bien, en una disposición denominada *Top-Bottom* (TB), en la que la imagen izquierda se dispone en la parte superior de la imagen y la

derecha en la parte inferior. Ambas disposiciones constituyen un método de empaquetar las dos imágenes en una sola, que recibe el nombre de *Frame Packed*.(Fig. 12.1)

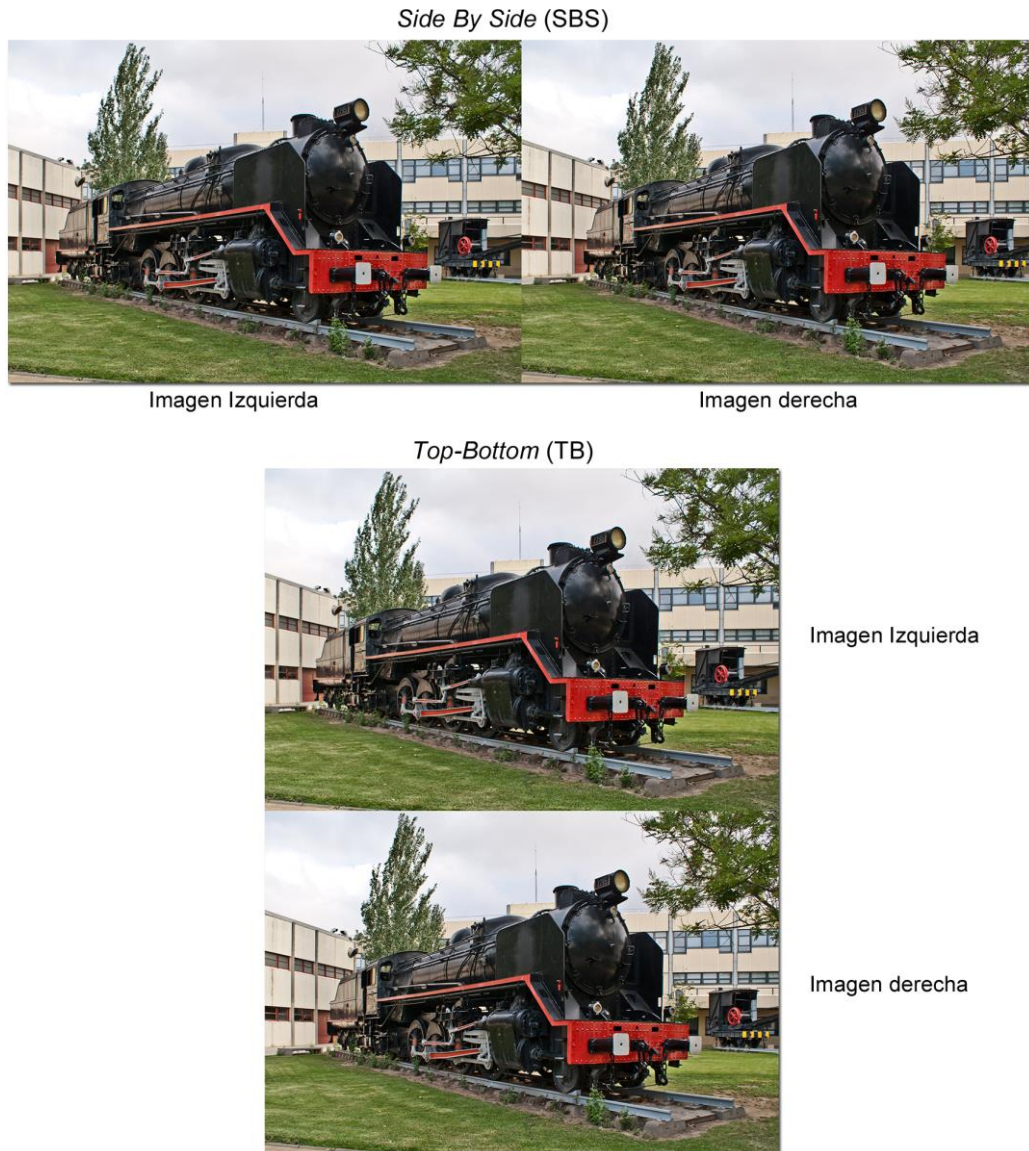


Fig. 12.1. Métodos de codificación *Frame Packed*: *Side by side (SBS)* y *Top-Bottom (TB)*. Pedro Cabezos

Cuando se utiliza el formato JPG, el televisor no es capaz de identificar por sí solo que se trata de una imagen estereoscópica y la trata como una imagen convencional, por lo que debe accederse al menú de configuración del modo 3D del televisor y seleccionar manualmente la disposición en la que está empaquetada la imagen para que ésta sea mostrada estereoscópicamente.

El formato JPS (JPG Stereoscopic), en realidad está diseñado para empaquetar ambas imágenes según el sistema SBS. En esencia, es un archivo JPG al que se le ha cambiado la extensión para identificar que su contenido es estereoscópico y está

empaquetado en disposición SBS. Esto ayuda al televisor a reconocer su naturaleza, por lo que debe reproducirlo estereoscópicamente de manera directa, sin que el usuario tenga que cambiar el modo de visualización manualmente, como sucede con el formato JPG.

Aunque los dispositivos suelen soportar archivos que superen la resolución nativa del televisor, lo ideal es preparar el material ajustándose a las resoluciones del dispositivo, para optimizar el tamaño de los archivos y mejorar el flujo de datos. En la actualidad, la mayoría de los televisores del mercado tienen una resolución nativa de 1920x1080 px, correspondiente al estándar HD (High Definition), pero está empezando la comercialización de televisores UHD (Ultra High Definition) con una resolución que dobla la del anterior estándar; 3840x2160 px. Estos televisores UHD están recibiendo el apelativo 4K, en relación a los casi 4000 px de resolución máxima horizontal.

Algunos televisores, sobre todo los desarrollados antes de mediados de 2013, siguen el estándar CEA/EIA-861D que regula las señales del conector HDMI 1.3, y tienen una limitación con respecto a la resolución en las imágenes codificadas por el sistema *frame packed*, que obliga a reducir la resolución a la mitad, en uno de los sentidos de la imagen, tratándose del sentido longitudinal, si la disposición es SBS y del sentido vertical, en el caso de la disposición TB. Los televisores que se acogen al estándar CEA/EIA-861F correspondiente al conector HDMI 1.4, definido en junio del 2013, no deberían tener esta limitación de resolución en los formatos *Frame Packed*.

Cuando las imágenes se empaquetan con toda la resolución HD, reciben el apelativo de Full SBS (3840x1080 px) o Full TB (1920x2160), mientras que, si se comprimen en uno de los sentidos, reciben el calificativo de Half SBS (1920x1080 px) o Half TB (1920x1080 px) (Fig. 12.2).

En los televisores 3D de luz polarizada, ya vimos cómo las características del sistema obliga a entrelazar las imágenes verticalmente, perdiéndose la mitad de resolución en el sentido vertical, por lo que en la práctica es más conveniente utilizar en este tipo de televisores la disposición Half TB, ya que este producirá una mayor nitidez en el visionado al no haber la necesidad de producir escalados.

Cuando se trata de imágenes estáticas es muy conveniente utilizar el formato MPO (*Multi Picture Object*), definido en 2009 por la CIPA (*Camera & Imaging Products Association*). Se trata de un archivo que empaqueta las imágenes de manera secuencial, como si se tratara de dos archivos JPG independientes que se codifican en un único archivo; de ahí que este método reciba el nombre de *Frame Sequential*.

El formato MPO tiene el mismo encabezado y codificación que el JPG, pero primero se codifica la imagen izquierda y luego la derecha. Si un archivo MPO se renombrara con

la extensión JPG, podría verse sólo la imagen izquierda del par, mientras que la derecha quedaría oculta y no se llegaría a descodificar.

Full SBS (3840x1080 px)



Half SBS (1920x1080 px)



Full TB (1920x2160 px)



Half TB (1920x1080 px)



Fig. 12.2. Disposiciones SBS y TB con resolución completa (*Full*) y media (*Half*). Pedro Cabezos

Uno de los primeros dispositivos en emplear este formato fue la cámara estereoscópica Fuji Finepix Real 3D W1, lanzada al mercado en 2009. El formato MPO es soportado cada vez por más dispositivos y se está convirtiendo en el estándar para la codificación de imágenes fijas.

La edición de estos formatos puede llevarse a cabo mediante cualquier programa de edición de imágenes digital, a excepción del formato MPO, para el que puede utilizarse un software específico como *StereoPhoto Maker*¹⁰, de libre distribución.

¹⁰ Programa desarrollado por Masuji Suto y David Sykes que puede descargarse desde <http://stereo.jpn.org/eng/stphmkr/index.html>

12.1.2. Los formatos de video

Con el video estereoscópico sucede algo muy similar a lo que acabamos de ver con las imágenes estáticas, pues el video no es más que una sucesión de ellas e igualmente disponemos de los modos de empaquetado *frame packed* e *image sequential*, pero en este caso nos centraremos en los métodos *frame packed* puesto que, de momento, los formatos *frame sequential* sólo pueden reproducirse a través de discos Blu-Ray y para generarlos es necesario el uso de programas de autoría Blu-Ray específicos que son de pago.

Se puede conseguir generar video estereoscópico fácilmente mediante el uso de cámaras estereoscópicas que codifican directamente el video en un formato compatible con los televisores, pero supondremos que la captura se realiza con dos cámaras convencionales, lo que nos permite ajustar perfectamente la distancia base. Cada cámara producirá un video independiente y ambos deben combinarse en un único video para que pueda ser reproducido por el televisor.

Los videos pueden empaquetarse mediante un método *frame packed* como SBS o TB, con resolución completa o media, dependiendo del modelo del televisor, al igual que sucedía en el caso de las imágenes estáticas, pero los formatos de video difieren de los estáticos.

Los formatos de video que pueden reproducir muchos de los televisores actuales son el AVI, MP4, MKV y el emergente WEBM, desarrollado por Google, pero lo que los hace verdaderamente compatibles, es el algoritmo que se haya empleado en la codificación del video. Este algoritmo de codificación es lo que se denomina *Códec* de video y los formatos que acabamos de comentar son en realidad meros contenedores de información que puede codificarse de distintas maneras, dependiendo del códec empleado.

Los códecs más soportados son el códec DIVX y el XVID, ambos están basados en el standard de compresión de video y audio MPEG-4 (parte 2), definido por el *Moving Picture Experts Group*, pero, a diferencia del DIVX, el XVID ¹¹ es de uso libre.

Otro códec, cada vez más soportado, es el H.264, derivado del estándar MPEG-4 (parte 10), que puede emplearse libremente instalando el software codificador X264 ¹².

¹¹ El códec puede descargarse desde www.xvid.com/download

¹² El códec puede descargarse desde www.videolan.org/developers/x264.html

Por último el formato Webm, emplea un códec específico denominado VP8 y, aunque todavía no está muy soportado, está destinado a convertirse en un estándar muy importante sobre todo en el video transmitido vía Web.


Dado que un video puede ser convertido a cualquiera de estos formatos, lo ideal será almacenar el video en un formato corriente como el AVI, si es posible sin comprimir o utilizando un códec de compresión sin pérdidas como *Lagarith*¹³, que constituirá el *Master* de edición a partir del cual podrán obtenerse versiones codificadas con el códec y el formato que más se adapte a las necesidades del dispositivo en el que el video deba ser visionado.



12.2. Material para pantallas convencionales y el medio impreso


Para pantallas convencionales o medio impreso puede utilizarse el montaje en formato SBS para visión libre o para su visualización mediante estereoscopios actuales, como los que se han descrito en el capítulo anterior, pero el método más socorrido en estos casos sigue siendo el de los anaglifos, por su economía y simplicidad. Sin embargo, en la impresión de anaglifos es frecuente la aparición de efectos de *ghosting* a causa de ciertos problemas que tienen que ver con la reproducción del color que merecen ser estudiados en profundidad. En el capítulo siguiente se analizarán estos problemas y se tratará la optimización de los anaglifos para el medio impreso.

12.3. Edición y montaje de imágenes con StereoPhoto Maker



Aunque hay diversos programas orientados al montaje de imágenes estereoscópicas, StereoPhoto Maker es sin duda el más completo y extendido. Con él podemos montar fácilmente las imágenes estereoscópicas en cualquiera de los formatos que acabamos de comentar y nos permite otra serie de interesantes funcionalidades, como veremos a continuación.

Para abrir las imágenes que componen el par se debe pulsar el icono  o la tecla [O], que abre el cuadro de diálogo para seleccionar el archivo que contiene la imagen izquierda y, seguidamente, el archivo que contiene la imagen derecha.

La disposición SBS es la opción en la que las imágenes aparecen visualizadas por defecto y a ella puede accederse mediante el icono  o la tecla [F9], mientras que si se pulsa el icono  o la tecla [F10], se obtiene una disposición TB. (Fig. 12.3)

El programa permite especificar la resolución de la imagen final desde el icono  o la tecla [R], lo que nos permite adecuar las imágenes a las características del televisor ya sea con resolución completa o media.

¹³ Códec de compresión sin pérdidas descargable desde <http://lags.leetcode.net/codec.html>

En el capítulo de la toma estereoscópica ya vimos que era necesario calcular el tamaño y paralaje de las imágenes en relación a las condiciones de visualización. El programa permite, mediante los cursores de desplazamiento lateral del teclado, ajustar con total precisión la translación entre imágenes previamente calculada en la fase de toma de datos, desde el modo *easy adjustment*, al que se accede desde el icono  o la tecla [K]. También se pueden efectuar los recortes necesarios para adaptarse al ángulo de visualización definido por la ventana estereoscópica, mediante el icono  o la tecla [O].

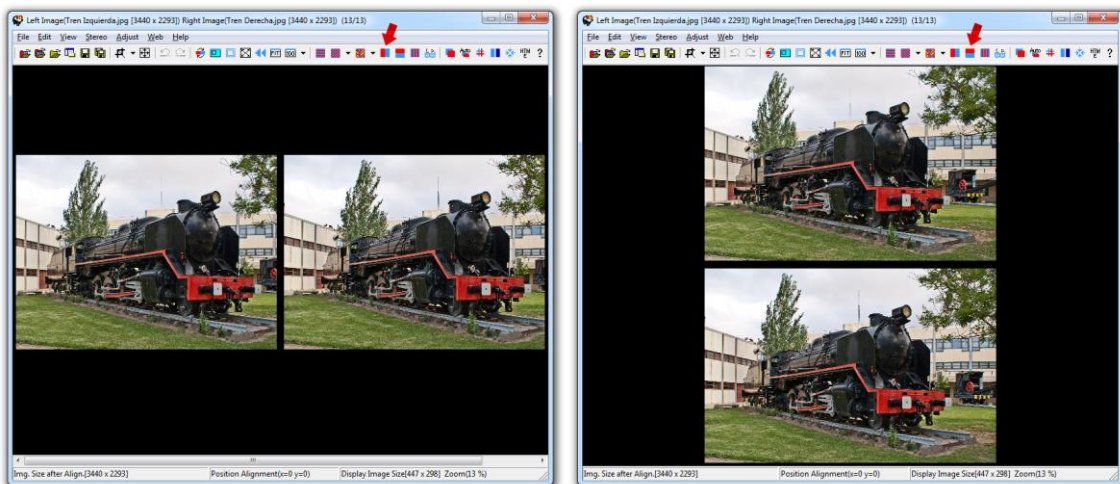





Fig. 12.3. *StereoPhoto Maker*. Disposición SBS (izda.) y TB (dcha.). Pedro Cabezos

El programa dispone de una interesante opción de autoalineación, a la que puede accederse desde el icono  o mediante la combinación de teclas [ALT+A], con la que se logra epipolarizar el par, es decir, se efectúan las transformaciones proyectivas pertinentes para lograr que el paralaje entre puntos homólogos tenga sólo componente horizontal. Con ello se corrigen los errores producidos por defectos de nivelación o por una toma sin trípode. La epipolarización se efectúa en base a un algoritmo automatizado de detección de puntos homólogos desarrollado por Lowe (2004).

Cuando se carece de un televisor 3D o cuando se trata del medio impreso, podemos optar por construir un anaglifo y el programa ofrece dos opciones equivalentes a la síntesis negra y polícroma definidas por Ducos du Hauron.

Mediante el icono  o la tecla [F6], el programa realiza un anaglifo que será percibido en tonos grises; para ello convierte las imágenes del par a escala de grises, antes de combinar los canales. También puede construirse un anaglifo en color, pulsando sobre el icono  o la tecla [F7]. A través de este icono se tiene acceso a un submenú que permite elegir la combinación de colores [**color(red/cian)**] o [**color(yellow/blue)**], además de otras opciones destinadas a evitar los problemas de rivalidad retiniana y *ghosting* (Fig. 12.4).

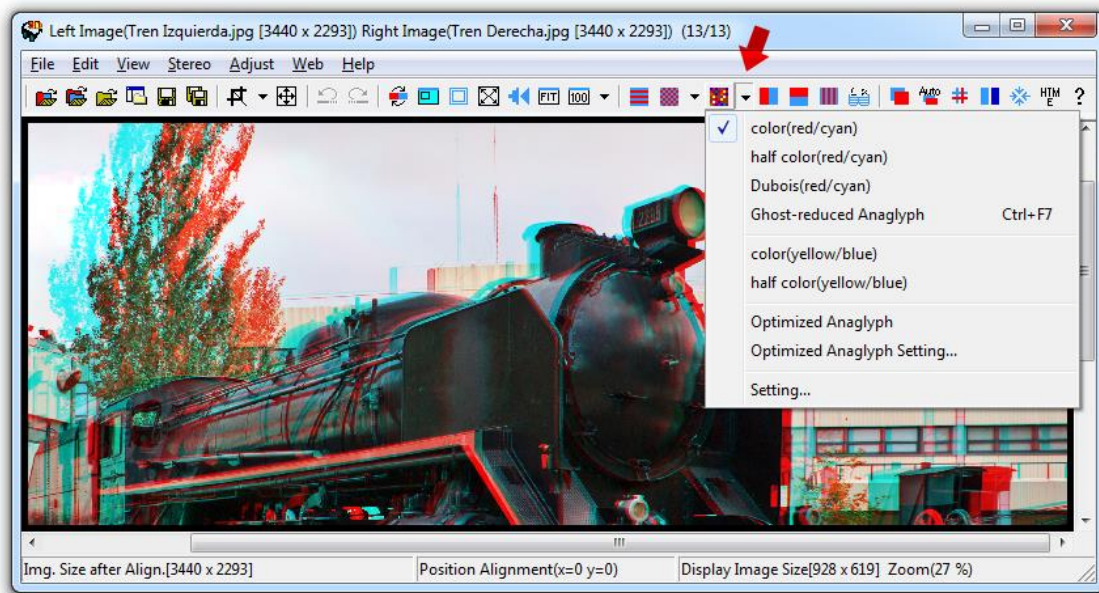


Fig. 12.4. *StereoPhoto Maker*. Opciones para la creación de anaglifs. Pedro Cabezos

El método [**half color(red/cian)**] convierte la imagen izquierda en monocroma antes de fusionar el anaglifo, lo que atenúa el efecto de rivalidad retiniana, a costa de desvirtuar todavía más la reproducción cromática.

La técnica [**Dubois(red/cyan)**], realiza un cambio de tono en la imagen que transforma aquellos colores susceptibles de causar rivalidad retiniana (Dubois, 2001).

La opción [**Ghost-reduced Anaglyph**], permite alterar manualmente el contraste y luminancia de cada una de las imágenes con el fin de minimizar el efecto *ghosting*, pero este método resulta ineficaz cuando el medio es el impreso.

Por último, la opción [**Optimized Anaglyph**], permite realizar una combinación personalizada de los canales RGB, aplicando multiplicadores definidos previamente mediante la opción [**Optimized Anaglyph Setting...**]. Con ello puede conseguirse cualquier combinación de canales, así como generar fusiones personalizadas.

La Fig. 12.5 muestra el uso de los diferentes modos de construcción de anaglifs de *StereoPhoto Maker*; obsérvese como el color rojo, presente en el tren, es propenso a producir rivalidad retiniana, como puede constatarse al contemplar la imagen superior derecha, en la que puede percibirse un molesto destello o color palpitante sobre las zonas de color rojo. Con el resto de opciones se distorsionan más los colores, pero se consigue evitar este molesto efecto de la rivalidad retiniana.

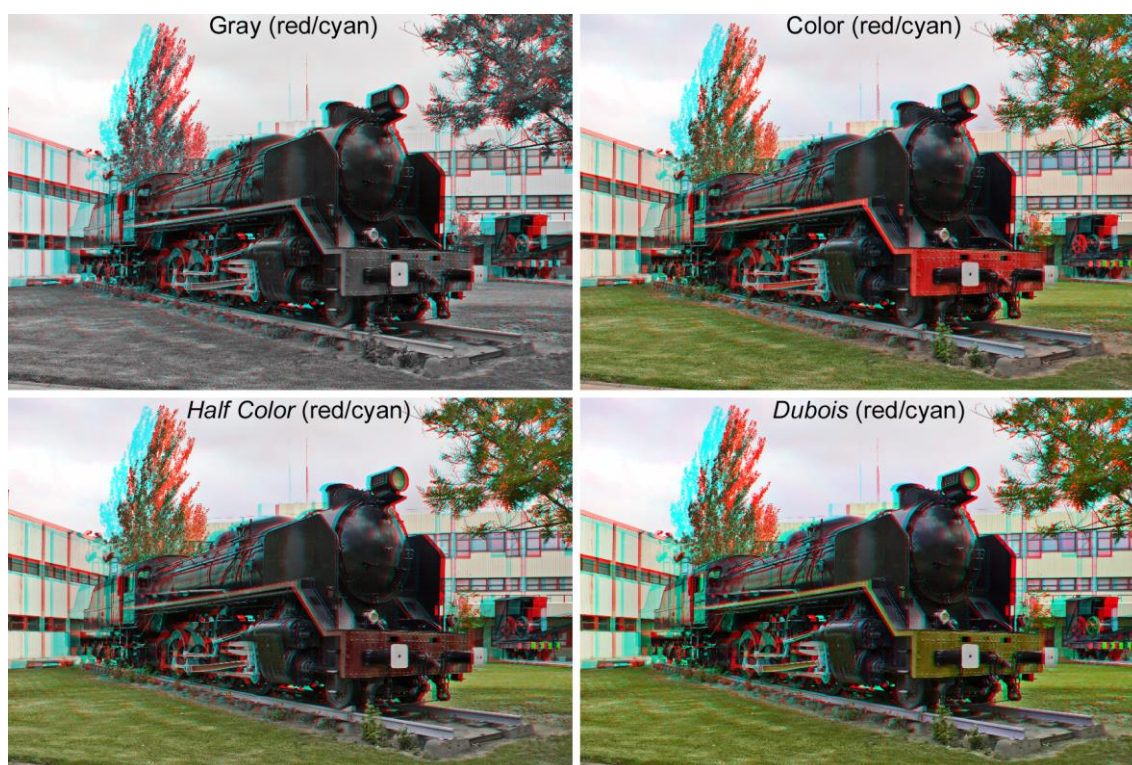




Fig. 12.5. Distintos modos de creación de anaglifos que permite *PhotoStereo Maker*. Pedro Cabezos





Finalmente el icono  permite almacenar la imagen estereoscópica, según la disposición que tengamos seleccionada en una amplia variedad de formatos incluidos el JPG y el JPS. Para almacenar la imagen en formato MPO no hay un icono específico, pero podemos hacerlo desde el menú *File*, o bien, pulsando la tecla [ALT+S]



12.4. Edición y montaje de videos con StereoVideo Maker

Para combinar los dos videos en uno sólo, puede utilizarse el programa de libre distribución *StereoVideo Maker* ¹⁴, de los mismos autores de *StereoPhoto Maker*. Este programa nos permite generar un video estereoscópico en formato AVI codificado con cualquiera de los códecs que hayamos instalado en el sistema, empaquetando las secuencias de video en disposición SBS, TB o anaglifo.


El funcionamiento del programa es muy similar al de *StereoPhoto Maker*, por lo que se repiten muchos de los iconos y teclas de acceso rápido a las funciones. Para abrir los videos se debe pulsar el icono  o la tecla [O], que abre el cuadro de diálogo para seleccionar el video correspondiente al ojo izquierdo y, seguidamente, el archivo que contiene el video correspondiente al ojo derecho.


¹⁴ El programa puede descargarse desde <http://stereo.jp/eng/stvmkr/index.html>

Para obtener una disposición SBS se debe pulsar sobre el icono  o la tecla [F9], mientras que si se pulsa el icono  o la tecla [F10], se obtiene una disposición TB.

El programa permite realizar video en anaglifo monocromático desde el icono  o la tecla [F6] y en color, mediante el icono  o la tecla [F7]. La versión para video no tiene tantos modos como la dedicada a fotografías estáticas y se echa en falta el modo *Dubois* y la optimización manual.

Se mantiene la opción de alineación automática para efectuar la epipolarización, pero en esta ocasión no hay un icono dedicado y se accede a ella mediante la combinación de teclas [ALT-K].

La translación horizontal entre imágenes puede controlarse desde el modo *easy adjustment*, al que se accede pulsando la tecla [K] y los recortes necesarios desde el icono  o la tecla [0].

Finalmente el icono  permite almacenar el video en cualquiera de las disposiciones y con la resolución de salida que queramos. El video se guardará en formato AVI y puede elegirse cualquier códec de compresión que se encuentre instalado en el sistema.

Para la conversión posterior del video obtenido a otros formatos puede emplearse cualquier conversor de videos. Handbrake ¹⁵ es un conversor de código abierto multiplataforma que soporta todos los formatos modernos incluidos WebM.

12.5. La edición de videos estereoscópicos para YouTube

Tal como se comentó en el capítulo anterior, la plataforma YouTube es la única, de momento, que permite publicar un video estereoscópico de forma gratuita, lo que constituye una vía de difusión excelente.

La ventaja del sistema empleado por YouTube es que el usuario debe subir un único video SBS. La plataforma admite varios formatos de video; puede utilizarse por ejemplo el formato AVI, codificado con el códec H.264 o XVID, con una resolución de hasta 4K.

Los espectadores pueden ver el video en distintos modos de reproducción, puesto que el navegador se encarga de procesar en tiempo real el video original y transformarlo al formato demandado por el espectador, en función del medio de visualización disponible.

¹⁵ Conversor de videos que se puede descargar desde <http://handbrake.fr/>

Es importante señalar que para que el receptor pueda visualizar correctamente este tipo de videos es necesario que disponga de un navegador actualizado compatible con HTML5.

Para que la plataforma sepa que se trata de un video estereoscópico y se activen las opciones de visualización 3D del visor de YouTube, el usuario debe introducir una etiqueta o *Tag* que actúa como una variable de entorno. Las principales etiquetas que configuran el video estereoscópico son:

yt3d:enable=true → Esta etiqueta define que el video es estereoscópico y activa los parámetros de visualización 3D del visor.

yt3d:swap=true → Intercambia la imagen izquierda por la derecha en caso de que el video aparezca permutado y origine pseudoscopia.

yt3d:aspect=16:9 → Especifica que el video tiene la proporción especificada.

Para poder publicar un video en YouTube es necesario tener una cuenta e iniciar sesión. Una vez iniciada basta pulsar el botón *subir*, que permite seleccionar el video indicando si queremos que sea un video público, oculto o privado. Si el video es público cualquiera puede tener acceso a él, si es oculto, sólo podrán acceder las personas que posean el enlace, mientras que si es privado podemos indicar los usuarios de Gmail a los que queremos dar acceso, especificando su email.

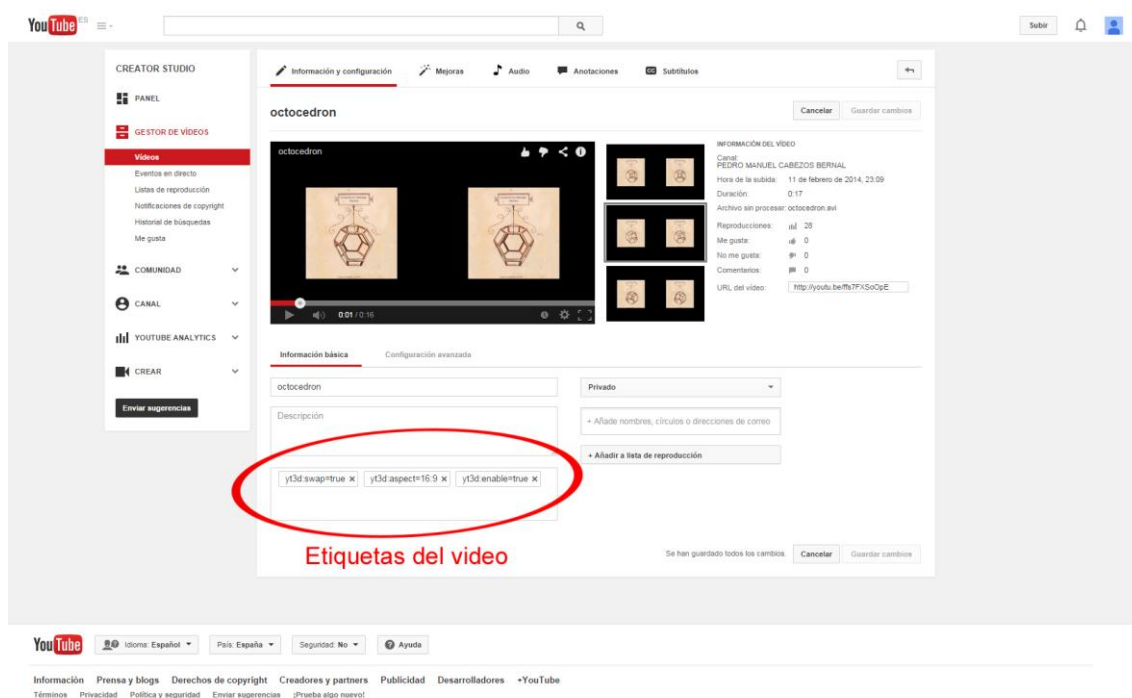


Fig. 12.6. Panel de gestión de videos de YouTube que muestra las propiedades y etiquetas del video

A modo de ejemplo, puede visualizarse un video estereoscópico que he realizado versionando uno de los poliedros de *La divina proporción* de Luca Pacioli, diseñados originariamente por Leonardo Da Vinci, a través del siguiente enlace¹⁶:

<https://www.youtube.com/watch?v=v9d4sJcKyYY>

El usuario podrá elegir, desde el icono del visor con forma de engranaje, el modo de visualización adecuado a sus necesidades, así como cambiar la resolución del video, tal como fue descrito en el capítulo anterior.

¹⁶ Para ver el video correctamente es necesario disponer de un navegador actualizado compatible con HTML5

13. LA IMPRESIÓN DE LOS ANAGLIFOS

La impresión de los anaglifos presenta una serie de inconvenientes sobre los que no he podido encontrar ningún estudio que describa un método efectivo para paliar sus efectos. Por ello, he analizado profundamente este problema para intentar dar una explicación y ofrecer una solución que consiga resultados óptimos con los medios de impresión actuales.

Un anaglifo no suele presentar problemas cuando se visualiza en una pantalla convencional, salvo que ésta tenga una gama cromática limitada, como ocurre en muchos ordenadores portátiles, pero la mayoría de los monitores de sobremesa actuales tienen un gamut (gama de color) lo suficientemente amplio como para no producir defectos notorios. Sin embargo, cuando un anaglifo se imprime en una impresora o en una imprenta, hay muchas posibilidades de que se produzcan efectos de *ghosting* relevantes, sobre todo si se trata de imágenes contrastadas.

13.1. El problema de la concordancia del color

El problema que surge al imprimir los anaglifos tiene su origen en la dificultad de lograr una concordancia perfecta entre los colores de la pantalla y el medio impreso. Esta dificultad se debe al diferente modo en el que monitores e impresoras producen los colores; los monitores generan el color mediante la mezcla aditiva de luz Roja, Verde y Azul (RGB), mientras que las impresoras utilizan la mezcla sustractiva de pigmentos Cian, Magenta, Amarillo y, complementariamente, el Negro (CMYK).

Esto da lugar a dos conjuntos o espacios de color diferentes, en cuya intersección se encuentran los colores que no son problemáticos, es decir, aquellos colores que pueden reproducirse tanto en la pantalla como en la impresora sin que se aprecien diferencias perceptibles. Sin embargo, hay una serie de colores denominados colores fuera de gama, que no pertenecen a la intersección entre los espacios de color, por lo que resulta imposible mantener la concordancia entre estos colores al ser vistos en pantalla y cuando son impresos.

Para comparar espacios de color se utiliza el espacio de color CIE XYZ de referencia, que constituye el modelo teórico de colores que es capaz de percibir una persona que no tenga mermadas sus facultades visuales. Este modelo fue desarrollado por la *Comission Internationale de l'Éclairage* (CIE) en 1931 en base a los experimentos realizados por W. David Wright y John Guild (Fairman et al, 1997).

La Fig. 13.1 (izda.) muestra los espacios de color genéricos RGB y CMYK, delimitados sobre el diagrama de cromaticidad CIE xy. Como puede verse, la cantidad de colores que podemos percibir en un monitor (espacio RGB) es mayor que la que podemos percibir mediante una impresora o imprenta (espacio CMYK).

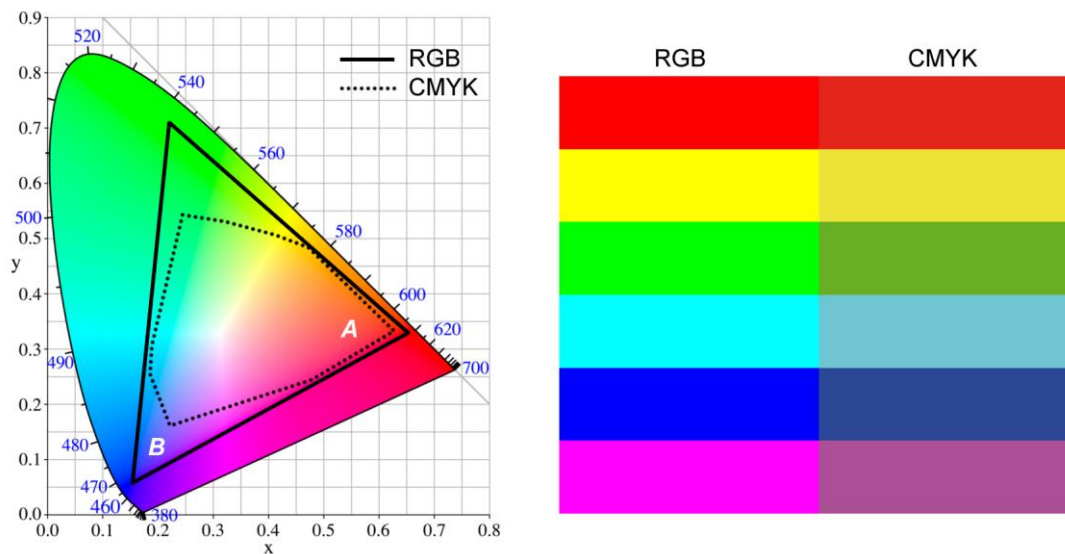


Fig. 13.1. Diferencias de gamut entre los espacios de color RGB y CMYK (izda). Discordancia de color en los colores fuera de la gama (dcha.)

La zona A enmarca los colores comunes a los dos modelos y determina los colores que no son problemáticos, mientras que la zona B engloba los colores que quedan fuera de la gama CMYK y por tanto no se reproducirán correctamente al ser impresos. Ejemplo de ello son los colores que se muestran en la parte derecha de la figura en donde puede apreciarse la discordancia en su reproducción según los dos espacios¹⁷.

Los colores más problemáticos suelen ser los más saturados, por lo que a la hora de reproducir los colores fuera de gama, entran en juego los algoritmos de gestión del color o *Color Matching Modules* (CMM), definidos según el estándar del *International Color Consortium* (ICC), para actuar de forma transparente como parte del sistema operativo y de los programas de edición de imagen. Estos algoritmos se encargan de elegir el color, dentro de la gama CMYK, que mejor se corresponde con aquel que se pretende reproducir con el fin de minimizar la discordancia entre ellos.

En el caso de Photoshop, programa por excelencia en el retoque de imagen digital, el algoritmo de gestión de color se denomina *Adobe Color Engine* (ACE) y, siguiendo el estándar ICC, permite realizar la conversión de colores de cuatro maneras distintas o propósitos colorimétricos: Colorimétrico absoluto, colorimétrico relativo, perceptual y saturación.

El propósito colorimétrico absoluto, afecta sólo a los colores de la imagen que están fuera de gama, modificando el parámetro de brillo hasta llegar al valor más apropiado. Con ello se produce un recorte de color en la imagen que puede llegar a resultar

¹⁷ Esta discordancia sólo podrá apreciarse correctamente en la versión digital de la tesis, ya que la versión impresa queda limitada a la propia gama CMYK y no se apreciará claramente la diferencia

visible en imágenes con muchos colores o gradientes, produciéndose masas de color uniforme, también llamado efecto de posterización. Esta opción es útil en imágenes con masas de color uniformes bien definidas tales como logotipos o anagramas, en las que se pretende una concordancia perfecta en los colores no problemáticos y una buena aproximación para aquellos que estén fuera de la gama CMYK.

El propósito colorimétrico relativo trata de evitar la posterización y para ello modifica proporcionalmente el valor de brillo, tanto de los colores que están fuera de gama como de aquellos que no lo están, con lo que se evitan las masas de color uniforme. Esta es la opción más aconsejada en muchos de los foros de edición digital.

El propósito perceptual afecta, al igual que el caso anterior, a la totalidad de los colores en la imagen procurando que el cambio produzca la menor diferencia perceptiva posible, generalmente mediante una disminución de la saturación. Para el caso que nos ocupa, considero que esta es una de las opciones que mejor resultados puede ofrecer, si bien, la diferencia con el propósito anterior es, en la mayoría de casos, prácticamente imperceptible.

En el propósito saturación se da prioridad a mantener la saturación y viveza de los colores, aunque ello conlleve cambios de tono, lo que sólo puede ser útil en gráficos en donde no importe tanto el tono, sino que los colores resulten llamativos, como por ejemplo en los gráficos estadísticos.

A esto debemos añadir que cada fabricante de monitor e impresoras emplea unos colores diferentes, lo que hace necesario el uso de perfiles de color específicos para cada dispositivo para lograr una correspondencia adecuada entre todos ellos.

Los perfiles de color personalizados se logran mediante el proceso de calibración del dispositivo, que puede llevarse a cabo mediante un espectrofotómetro y el software destinado a crear el perfil de color específico (perfil ICC o ICM) que sirve al módulo de gestión de color para realizar las conversiones entre los distintos espacios de color de cada dispositivo.

Si no se tiene un espectrofotómetro para realizar la calibración, al menos deben instalarse en el sistema los perfiles genéricos que proporciona el fabricante del dispositivo, aunque en este caso la correspondencia de color no será tan precisa como si se tienen los perfiles de color propios del dispositivo.

13.2. La optimización de los anaglifos para el medio impreso

Para poder visualizar los anaglifos correctamente es crucial que la reproducción impresa de los colores sea lo más perfecta posible para lograr un buen filtrado, pero nos encontramos con el problema de que los colores Cian y Rojo, que son la base de los anaglifos están fuera de gama CMYK y por tanto su reproducción resulta muy problemática. La Fig. 13.2 muestra un anaglifo lineal de síntesis en negro representado según los modelos RGB y CMYK. Como puede verse la variación que sufren los colores al imprimirse provoca un defecto de filtrado muy notorio en el anaglifo representado en el espacio CMYK, donde el efecto de *ghosting* resulta tan visible que arruina el efecto estereoscópico.¹⁸

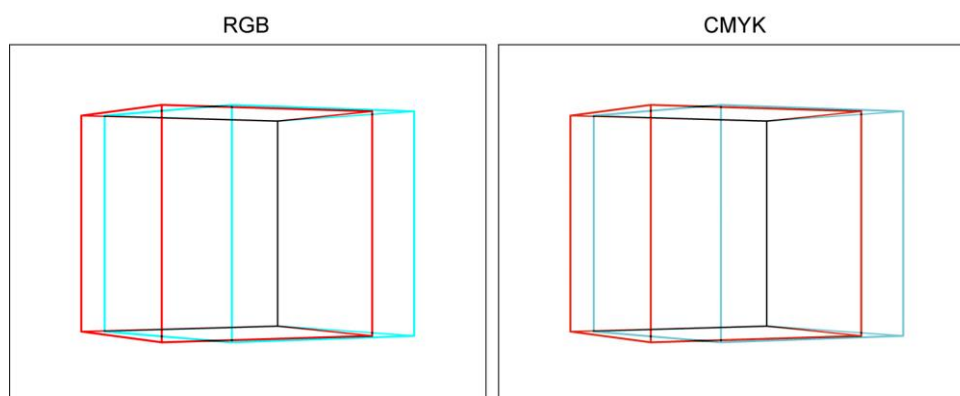


Fig. 13.2. Anaglifo de síntesis en negro en el espacio de color RGB y en el CMYK. Pedro Cabezos



Tras haber analizado este problema, uno se da cuenta que resulta imposible conseguir un color perteneciente a la gama CMYK con el que se logre un filtrado perfecto. Para ello sería necesario desarrollar una tinta con pigmentos especiales, fuera de los estándares actuales de impresión en cuatricromía. Ni siquiera las impresoras de 6 tintas, con un gamut algo más amplio, logran reproducir estos colores correctamente.

En primer lugar traté de buscar una solución para los anaglifos de síntesis en negro y pensé reducir el contraste fondo/figura sustituyendo el color blanco del fondo por un tono gris de una luminancia parecida a la de las imágenes residuales con el fin de disimular el *ghosting*.

Para ello ideé una manera bastante sencilla de obtener el color de fondo adecuado usando alguna de las herramientas que ofrece el programa de edición de imagen Photoshop, que permite efectuar una simulación de color en pantalla entre los distintos espacios de color, lo que se conoce como Soft Proofing. Para la edición del color es necesario disponer de un monitor con un gamut amplio y calibrado que permita hacer esta simulación de forma fiable, por lo que he utilizado un Monitor NEC modelo

¹⁸ La diferencia sólo se apreciará correctamente en la versión digital de la tesis vista en pantalla

P221W, con certificación UGRA para realizar simulaciones de color. Este monitor se ha calibrado mediante un espectrofotómetro Eye One Pro de la marca XRITE.

Para determinar el color de fondo óptimo he generado un test visual que consiste en visualizar en pantalla el anaglifo lineal mostrado en la Fig. 13.2, simulando el espacio de color CMYK. El observador debe usar las gafas de filtro de color, al tiempo que se reduce paulatinamente la luminancia del color de fondo, paso a paso, según la escala del modelo CIE $L^*a^*b^*$, basado en la percepción humana del color, que va del 0 (negro) al 100 (blanco). El test está preparado de forma que el observador puede ir cambiando a voluntad el nivel de luminancia del fondo mediante los cursores del teclado hasta lograr el nivel que mejor consigue disimular las imágenes residuales.

Dado que la percepción del color puede tener un carácter subjetivo, he realizado el test visual junto a cinco observadores expertos en el tema del color, pertenecientes al Dpto. de Expresión Gráfica Arquitectónica de la UPV, entre los que se encuentra la Catedrática Ángela García Codoñer, los Doctores Juan Serra Lluch, Ana Torres Barchino, Juan Cisneros Vivó y el profesor Nacho Cabodevila Artieda. Tras efectuar el test visual a los observadores, en idénticas condiciones, se han obtenido niveles de luminancia muy parejos como muestran los resultados expuestos en la tabla siguiente:

	Observador 1	Observador 2	Observador 3	Observador 4	Observador 5	Observador 6
Luminancia $L^*a^*b^*$	80	81	78	80	79	80

Fig. 13.3. Resultados de Luminancia obtenidos en los test visuales

Para determinar el valor óptimo se ha promediado y redondeado el valor de las luminancias obtenidas, con lo que se obtiene un valor de luminancia de 80, que equivale a un gris (198,198,198) en la gama RGB y (26,20,19,0) en la CMYK.

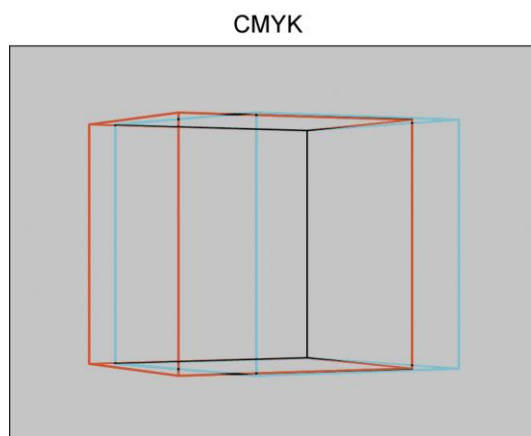


Fig. 13.4. Optimización del color de fondo para reducir el *ghosting* producido por la conversión al espacio CMYK. Pedro Cabezos.

La Fig. 13.4 muestra el anaglifo representado en el espacio de color CMYK con el color de fondo obtenido. En ella puede valorarse la mejora que supone el cambio del color de fondo que prácticamente hace invisible el *ghosting* y permite percibir correctamente el efecto estereoscópico.

En la síntesis polícroma el problema es algo más complejo de resolver, pues no contamos solo con dos colores sobre un fondo neutro, sino que debemos de trabajar sobre los canales de color de la imagen, por ello lo primero que hice fue analizar separadamente los canales de color del anaglifo al ser convertidos al espacio CMYK, pues tras la conversión se produce, de forma análoga al caso anterior, un marcado efecto *ghosting*, que puede verse en las zonas dónde se produce un alto contraste (Fig. 13.5 dcha). Véase el contorno del árbol izquierdo o el recorte de la chimenea del tren con el cielo.

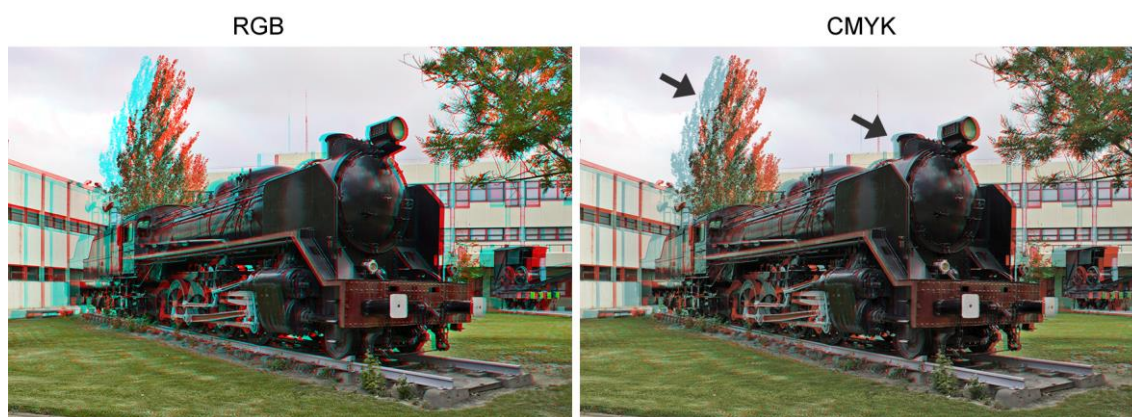


Fig. 13.5. Anaglifo de síntesis polícroma en el espacio RGB y en el CMYK¹⁹. Pedro Cabezos



El análisis consiste en convertir el anaglifo al espacio CMYK, utilizando el propósito perceptual, y después volver a convertirlo al espacio de origen RGB para comprobar que ha ocurrido con los canales de color tras el proceso de conversión. Tras realizar numerosas pruebas con anaglifos de distinta índole, he podido comprobar que el canal verde es el que más sufre en el proceso de conversión, ya que en él aparece una imagen residual que resulta visible en las zonas de alto contraste. El canal azul adolece también este problema, pero en menor medida, mientras que el canal rojo sale mejor parado y no se aprecian imágenes residuales (Fig. 13.6).

Para dar una solución a este problema he seguido con la idea de reducir el contraste de las zonas problemáticas y para ello he desarrollado un método de corrección basado en el uso de las curvas de ajuste de luminancia que pueden utilizarse con los programas de edición de imagen como Photoshop o Gimp, este último de libre distribución.

¹⁹ La diferencia sólo se apreciará correctamente en la versión digital de la tesis vista en pantalla

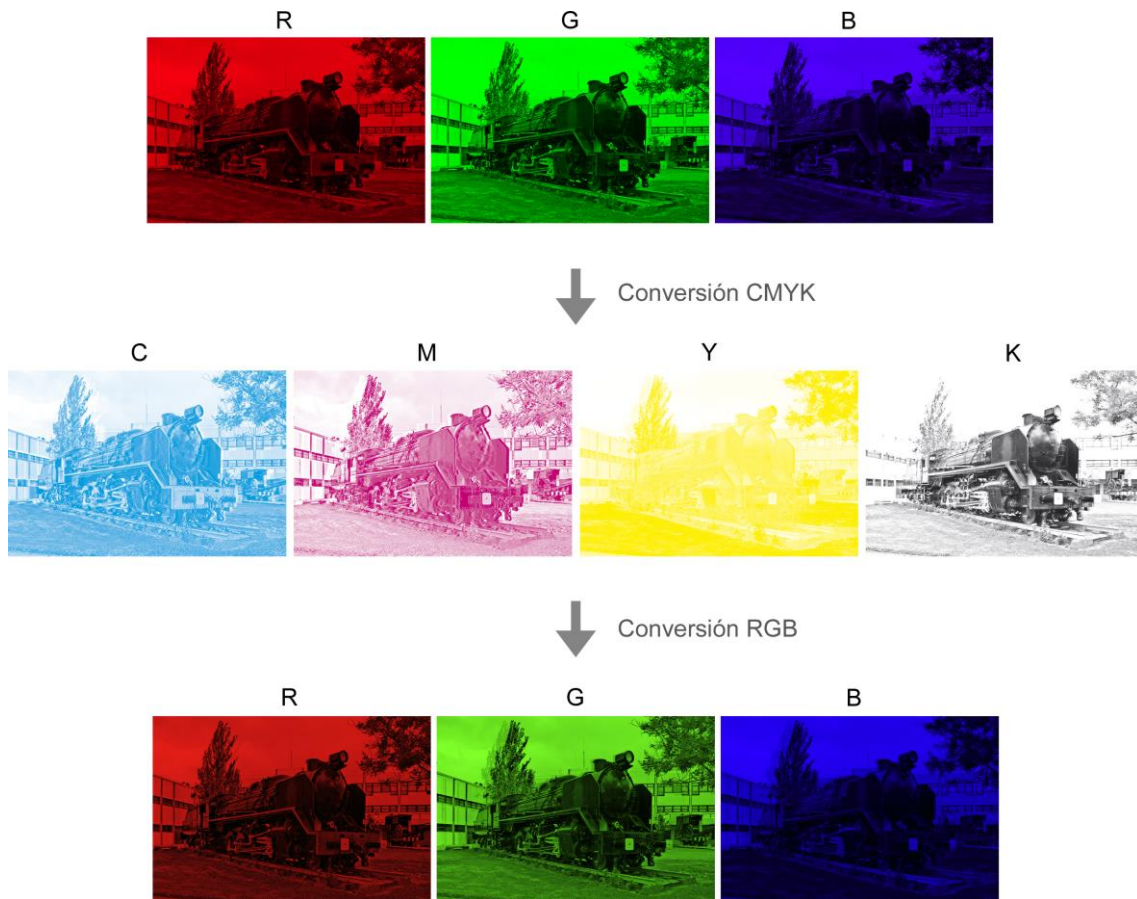


Fig. 13.6. Contaminación de los canales tras haber sufrido una conversión CMYK. Pedro Cabezos

En las curvas de ajuste se representan en el eje de abscisas los valores de luminancia de entrada (valores antes de la corrección) en la escala RGB, es decir, del 0 (negro) al 255 (blanco), mientras que en el eje de ordenadas se representan los valores de luminancia de salida que se obtendrán tras la corrección.

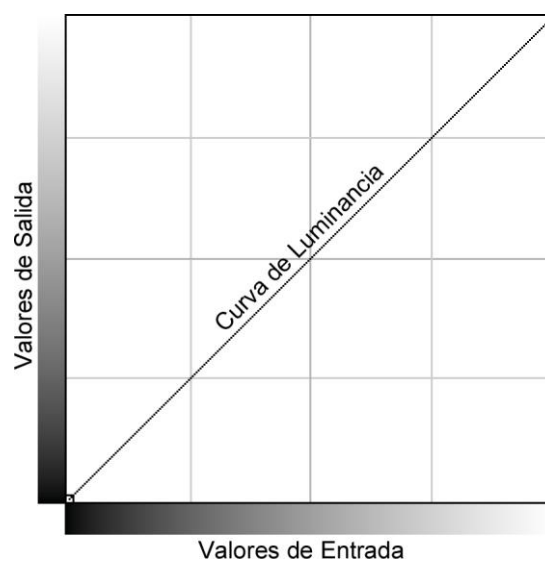


Fig. 13.7. Curva de ajuste de luminancia por defecto. Pedro Cabezos

La curva inicial de luminancia es una línea recta que parte del origen a 45° grados (Fig. 13.7) con lo que las luminancias de entrada y salida coinciden, por tanto la imagen permanece inalterada. La corrección se lleva a cabo introduciendo uno o varios nodos de ajuste sobre la gráfica y éstos se desplazan hacia arriba, produciendo un incremento de luminancia, o hacia abajo, disminuyéndola.

El método propuesto consiste en diseñar una curva de ajuste para reducir el contraste entre las zonas oscuras y claras de la imagen, reduciendo la luminosidad de estas últimas ya que son las más problemáticas para el filtrado. Con el fin de evaluar adecuadamente el efecto de la corrección, el ajuste de la curva debe realizarse sobre el anaglifo original, efectuando una simulación de color en el espacio CMYK, utilizando las gafas de filtro de color para poder valorar el *ghosting* en tiempo real a medida que realizamos el ajuste.

Para disminuir la luminancia de las zonas más claras, se debe trabajar sólo en la parte alta de la curva, haciéndola caer en su extremo final y se deben añadir algunos nodos de modo que la curva interpolada entre ellos permanezca inalterada en las zonas de luminancia baja y media (primeros tres cuartos de la curva) y disminuya en la zona de luminancia alta (último cuarto).

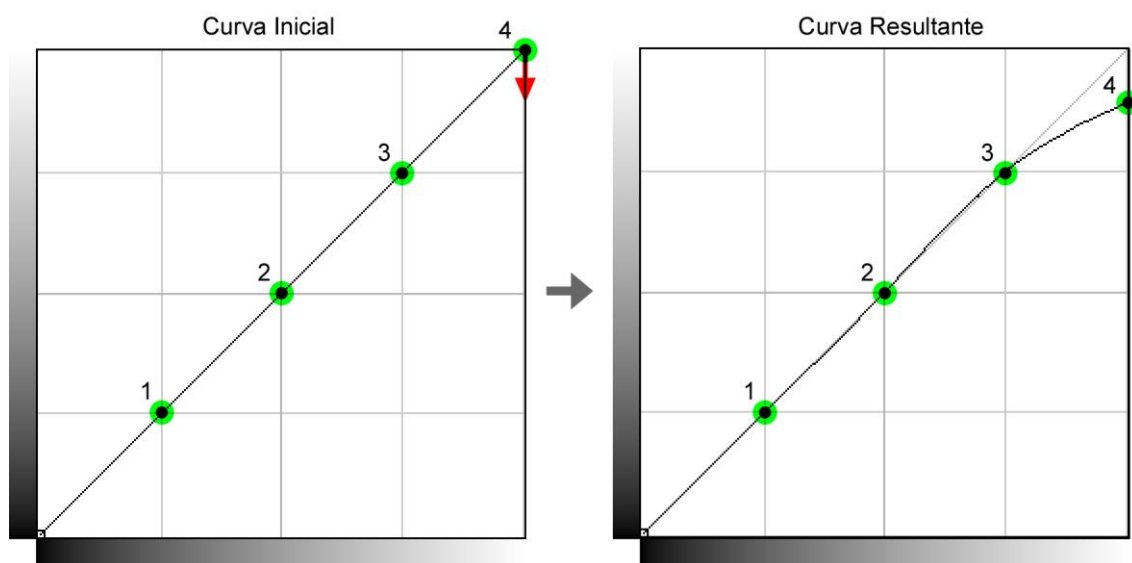


Fig. 13.8. Introducción de nodos de ajuste iniciales y desplazamiento del nodo extremo. Pedro Cabezos

Se puede comenzar situando tres nodos sobre la recta a 45° en su intersección con la cuadrícula que divide a la gráfica en cuartos (Fig. 13.8 nodos 1,2 y 3); estos tres nodos permanecerán inmóviles en el proceso y servirán para anclar la curva en estas zonas. Después puede seleccionarse el nodo del extremo derecho (4) y desplazarlo hacia abajo hasta conseguir un nivel de salida en el que se disimulen las imágenes residuales. El valor de salida puede introducirse también numéricamente y no deberá ser inferior a 198, pues este es el valor óptimo de luminancia que hemos determinado

en el caso anterior para una situación de contraste máximo entre fondo/figura, por lo que dependiendo del contraste inicial de la imagen, el valor de salida óptimo al que deberemos llevar el nodo extremo quedará comprendido entre 255 y 198 (situación de contraste máximo). La Fig. 13.8 (decha.) muestra una curva de ajuste tipo que podría ser almacenada y aplicada recursivamente a un conjunto de imágenes de forma automatizada, si se genera una acción de Photoshop que puede ser aplicada por lotes.

Cabe destacar que sería suficiente con aplicar la curva de ajuste de luminancia obtenida únicamente sobre el canal verde del anaglifo, que es el que contiene la mayor parte de las imágenes residuales, si bien esto produciría un cambio de color hacia un tono rojizo en las zonas donde se produce el ajuste. Este cambio de color no debe resultar llamativo cuando se visualiza el anaglifo con las gafas de filtro de color, ya que la percepción cromática del anaglifo es limitada. No obstante, si se quieren mantener los tonos intactos puede aplicarse la curva conjuntamente a los tres canales RGB de la imagen, lo que producirá sólo un cambio de luminosidad en las zonas corregidas.

Cuanto más contrastada es la imagen de partida, más fuerte debe ser la corrección de luminancia, por lo que he querido ejemplificar la validez del método con un caso de alto contraste que son los más problemáticos. Es importante señalar que mediante el uso de máscaras el efecto de la curva puede aplicarse sólo a aquellas zonas de la imagen en las que se acusa el efecto *ghosting*.

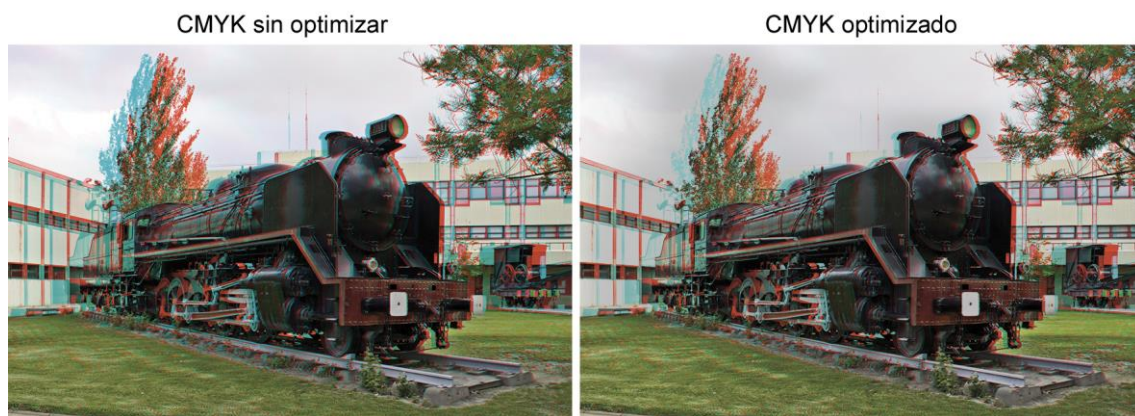


Fig. 13.9. Aplicación del método de optimización a una imagen con contraste elevado. Pedro Cabezos



En el ejemplo que muestra la Fig. 13.9 se produce una situación de contraste elevado entre el color negro de la máquina de tren y las zonas más claras del cielo, así como entre la silueta del árbol en contraste con las nubes. La curva de ajuste ha sido aplicada por zonas mediante una máscara con el fin de no oscurecer el cielo en su totalidad. Podemos apreciar que el método propuesto disimula bastante bien las imágenes residuales incluso en casos complicados de contraste extremo.

14. LOS DIBUJOS ESTEREOSCÓPICOS

Ya vimos que los primeros pares estereoscópicos que se llevaron a cabo fueron los dibujos geométricos que Charles Wheatstone presentó en su artículo de 1838, cuando la fotografía todavía no había sido dada a conocer. Por este motivo no es extraño que los primeros pares comercializados junto con el estereoscopio de Brewster fueran dibujos geométricos, posiblemente realizados por el propio Duboscq, tal como señala Rivero (2004).

14.1. Los dibujos para el estereoscopio

En estos primeros dibujos solían representar figuras geométricas sencillas y con planos de simetría que el dibujante solía aprovechar para que las imágenes del par resultaran también simétricas entre sí, lo que le ahorraba bastante trabajo pues sólo debía resolver el trazado de una de las vistas y copiar la otra realizando una simetría, como sucedía en la mayoría de los pares presentados por Wheatstone. Generalmente estas figuras se representaban con trazo blanco sobre fondo negro, lo que recuerda los dibujos fotogénicos de Niepce y Talbot, en los que los objetos situados sobre una placa sensible dejaban su huella y contornos cuando ésta se exponía a la luz.

El efecto de relieve causado por estos dibujos lineales puede resultar confuso y difícil de percibir para algunas personas, debido a que la información de profundidad que llega hasta nuestro cerebro se debe únicamente a las claves de disparidad retinal y perspectiva producidas por las aristas del modelo, pues no hay ningún refuerzo adicional de otras claves de carácter monocular como podrían ser las luces y sombras o el gradiente de textura, que ayudarían a nuestro cerebro a interpretar mejor la profundidad de la escena. A continuación se muestran algunos ejemplos realizados en torno a 1850 de la colección de Juan Antonio Fernández Rivero y de Carlos Sánchez, dos grandes historiadores de la fotografía del siglo XIX.

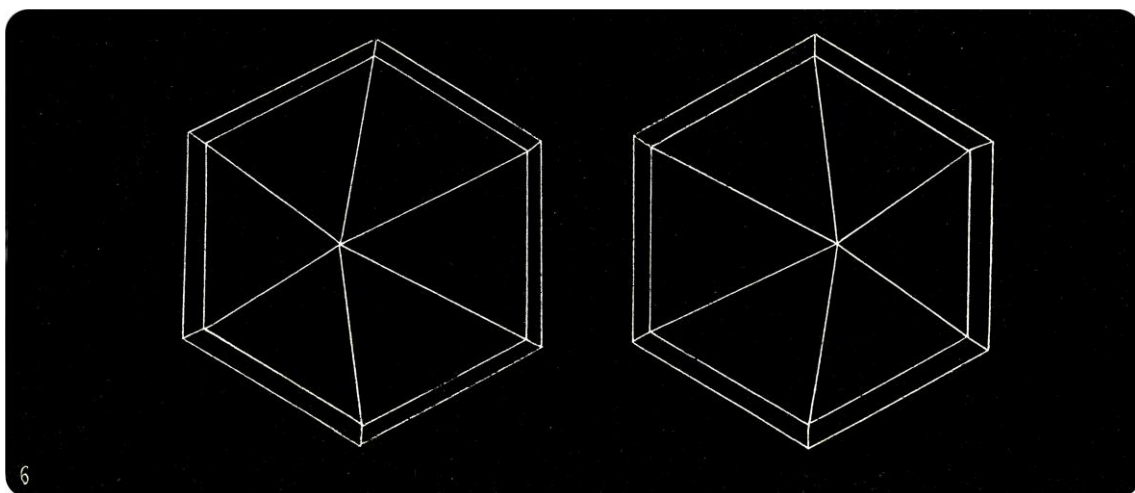


Fig. 14.1. Anónimo, ca. 1850, *Dibujo estereoscópico de una pirámide de base hexagonal*, Colección Carlos Sánchez

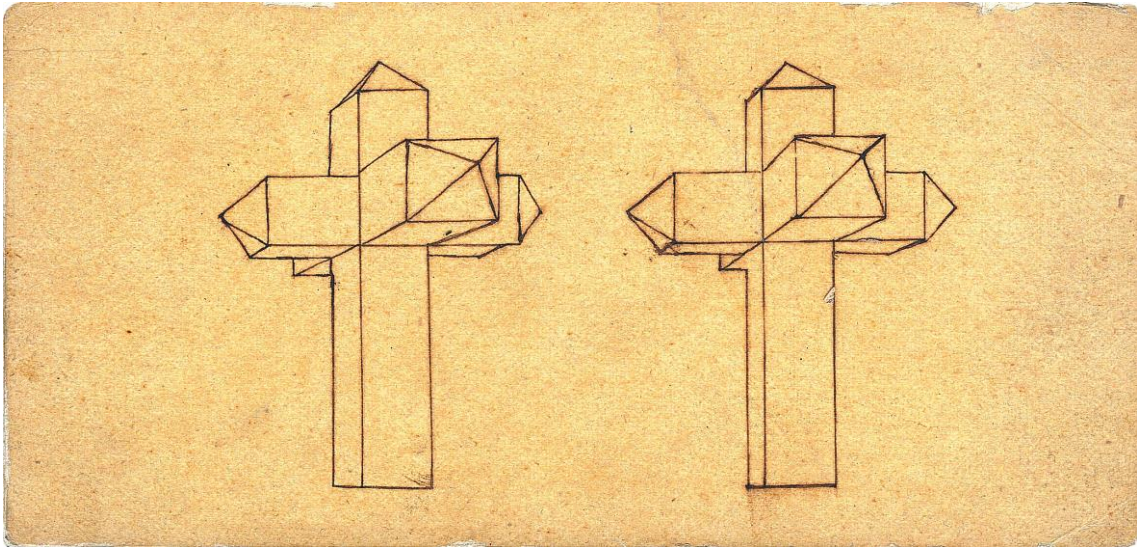


Fig. 14.2. Anónimo, ca 1850, *Dibujo geométrico estereoscópico*, Colección Fernández Rivero

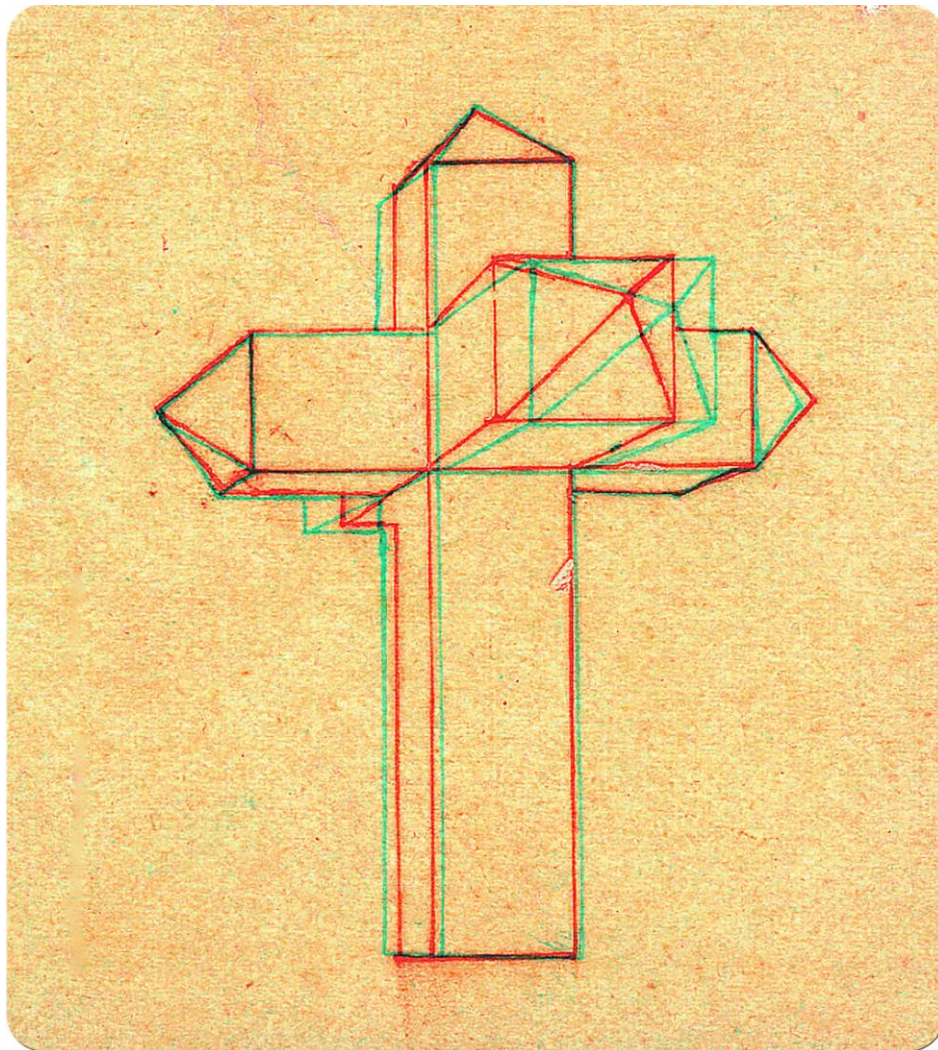



Fig. 14.3 Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos 

A pesar de las imprecisiones geométricas que presentan estos trazados, nuestro cerebro es capaz de fusionar ambas imágenes, lo que es un indicativo de la capacidad resolutoria de nuestra mente.

También he podido encontrar otra serie comercial francesa de tarjetas estereoscópicas con dibujos mucho más elaborados, destinados a un público infantil, que fue donada a la colección J. Paul Getty por Weston y Mary Naef. Esta colección consta de 7 tarjetas estereoscópicas, pero he comprobado, a través de la web de un vendedor de antigüedades, que esta inusual colección tenía al menos 10 estampas más, con lo que he podido ampliar el catálogo de esta interesante y rara colección, que por la calidad de sus dibujos y su antigüedad considero digna de apreciar.

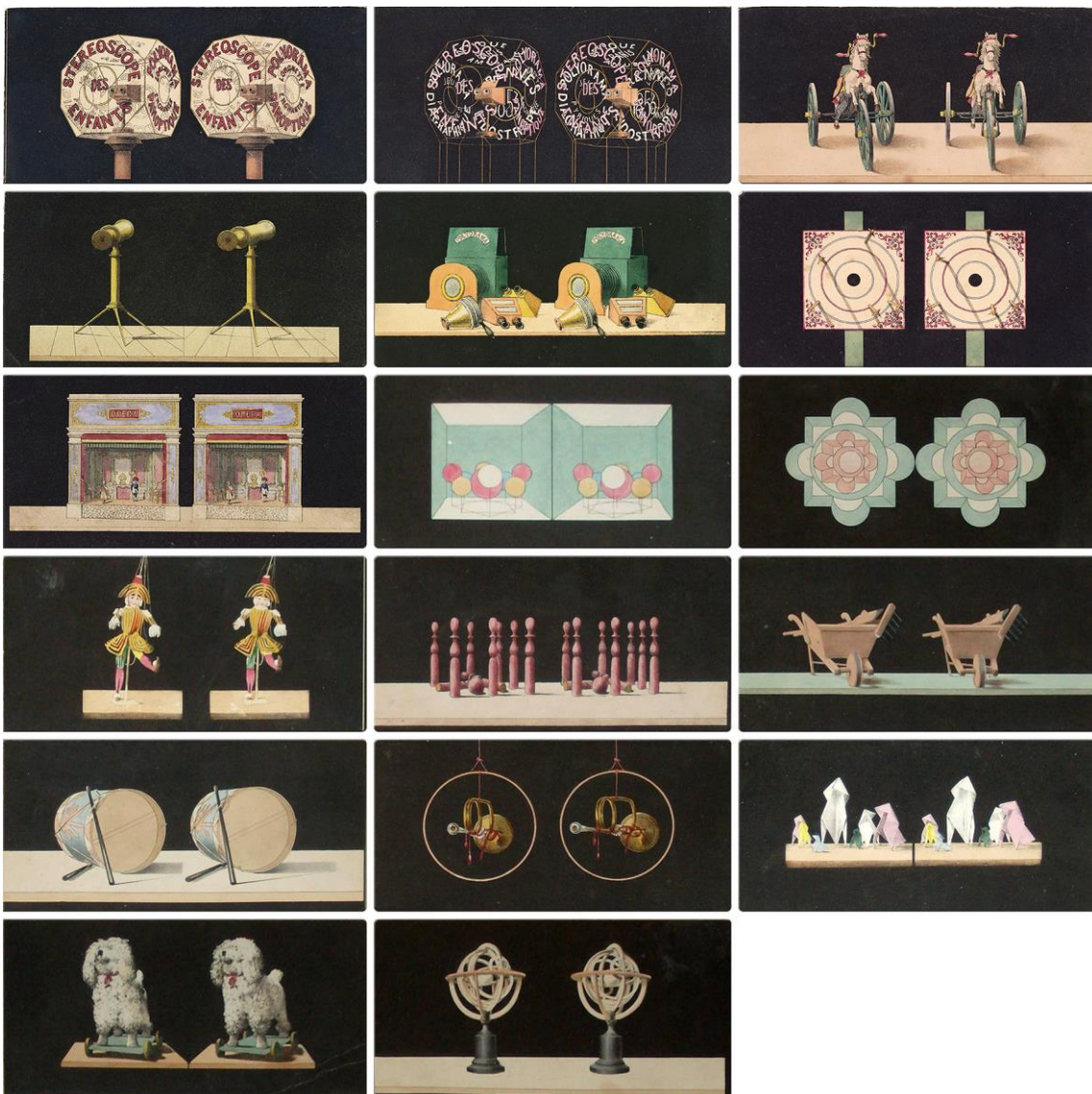


Fig. 14.4. Anónimo, ca 1853, *Stereoscope des enfants*, Litografía pintada a mano, 16.5 x 8.2 cm, Colección J. Paul Getty (7 primeras) y Reynard Collectables (10 restantes)

Los dibujos son litografías pintadas a mano por un artista desconocido. En uno de los pares de esta colección (Fig. 14.5) puede leerse: *Optique Amusant Paris, Stereoscope des enfants, Poliorama Diagraphique, Jeux Pyriques, Polyorama Panoptique, Lorgnette Enchantée*, en referencia a un conjunto de juegos ópticos que podrían haber sido comercializados por la misma empresa y que aparecen representados en algunas de las tarjetas. Si uno se fija bien, puede leerse el número 1853, inscrito en la circunferencia que contiene la cara trasera del cubo truncado, que me atrevería a señalar como el año en el que comienza su comercialización, sin embargo, en las fichas de la colección Getty se estima que fueron realizadas en torno a 1862.

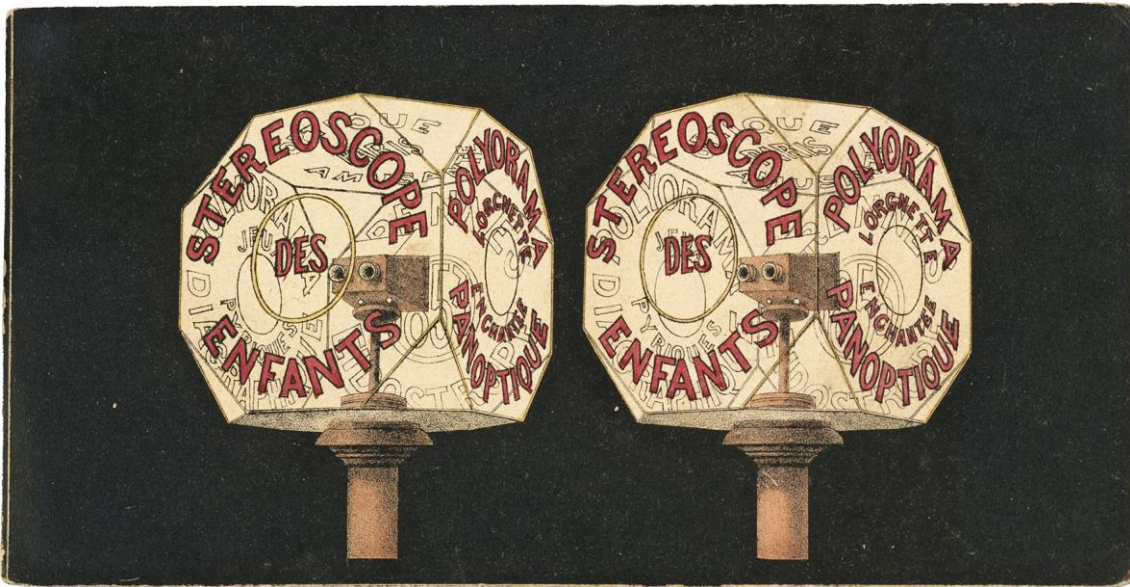


Fig. 14.5. Anónimo, ca 1853, *Dibujo de un cubo truncado con estereoscopio*, Litografía pintada a mano, 16.5 x 8.2 cm, colección J. Paul Getty

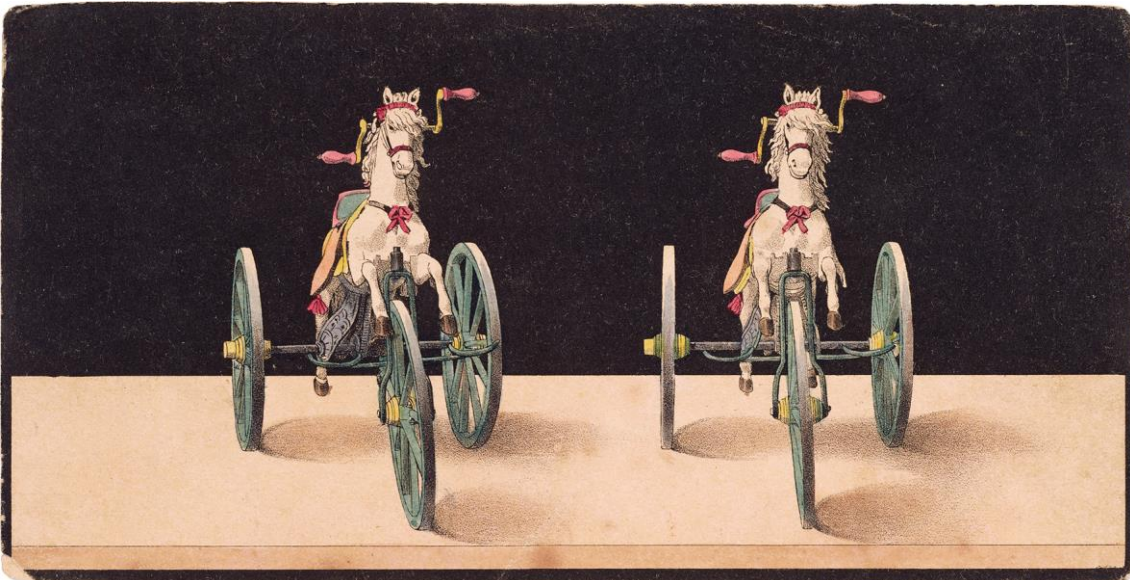


Fig. 14.6 Anónimo, ca 1853, *Dibujo de un triciclo con forma de caballo*, Litografía pintada a mano, 16.5 x 8.2 cm, Colección J. Paul Getty



Fig. 14.7 Anaglifos realizados a partir de los pares anteriores. Pedro Cabezos



14.2. Los dibujos estereoscópicos en la Geometría Descriptiva

Una de las aplicaciones técnicas en la que tiene mucha cabida el uso de la estereoscopia es en la representación gráfica y más concretamente en la Geometría Descriptiva, disciplina a la que dedico mi docencia. Sin embargo, las publicaciones con figuras geométricas estereoscópicas son, en general, poco conocidas y escasas. He realizado una intensa búsqueda bibliográfica a nivel internacional y he podido encontrar verdaderas reliquias, que he tenido la fortuna de poder ir adquiriendo poco a poco, pues la mayoría son bastante antiguas y constituyen toda una rareza.

Esto me ha permitido realizar un análisis comparativo, centrado en los dibujos y comentarios acerca de la técnica estereoscópica, con el fin de valorar la calidad del efecto estereoscópico logrado, analizando el rigor geométrico, la calidad gráfica, el confort visual y la calidad de sus medios de reproducción y visionado, además de constatar las influencias de algunas obras con respecto a otras.

Las tintas y los filtros de las gafas propias de cada publicación tienen características dispares. Para uniformizar y optimizar el color de los dibujos de cada uno de los libros han sido necesarias muchas horas de edición digital para aislar las tintas originales en canales de color independientes y adaptarlas al sistema de visionado de anaglifos actual con filtros rojo/cian. Se ha optimizado el contraste y minimizado el efecto de *ghosting* para que las figuras puedan visionarse en igualdad de condiciones y con las gafas proporcionadas con la Tesis. Las ilustraciones se reproducen con su tamaño original para transmitir fielmente el efecto estereoscópico pretendido por el autor.

He realizado un estudio colorimétrico de las publicaciones, en el que se determina el color de las tintas, fondo y los filtros originales, según el espacio de color CIE Lab, que expresa la gama teórica de colores percibidos por la visión humana y ofrece unos valores que no dependen del perfil de color que tenga asignado la imagen digital.

También se miden las luminancias tras el filtrado y se obtiene el contraste de luminancias entre fondo y figura mediante la expresión:

$$\text{Contraste} = \frac{\text{Lum. fondo} - \text{Lum. figura}}{\text{Lum. fondo}}$$

El contraste de luminancias es un indicativo de la intensidad con la que se aprecia el efecto estereoscópico, pues un contraste alto, facilita la percepción del relieve.

Para evaluar el efecto *ghosting* expresaré, por un lado, la valoración subjetiva tras la observación de las figuras al natural con sus gafas originales, en un entorno de visionado normalizado constituido por una cabina de luz D65. Con la intención de ofrecer un índice objetivo que permita evaluar la intensidad del *ghosting*, se calcula la diferencia de luminancias entre la imagen residual o fantasma y el fondo, expresada

mediante el parámetro $\Delta L = Lum.residual - Lum.fondo$. El estándar CIE Lab define el valor de la luminancia entre 0 (negro) y 100 (blanco), de modo que un espectador con visión normal podría llegar a distinguir una diferencia de una unidad. En la práctica, podemos considerar que con un filtrado óptimo se obtendrían valores de $\Delta L \leq 2$, mientras que valores más altos indican que el efecto *ghosting* empieza a ser notorio.

Las tintas presentes en los libros más antiguos han perdido su tono y viveza originales. También el papel ha perdido su blancura y se ha oscurecido adquiriendo un tono amarillento; ello implica que el análisis de los libros más antiguos no es extrapolable a sus condiciones primigenias, pero éste puede proporcionarnos indicios de su calidad.

Las mediciones más precisas del color se obtienen mediante un espectrofotómetro, pero la escasa entidad de las masas de color, materializadas por las delgadas líneas del trazado, hace imposible su uso y he optado por realizar la medición sobre la copia digitalizada. Por esta razón, resulta crucial conseguir una reproducción fiel de los colores originales, por lo que se ha realizado una gestión de color muy rigurosa.

Se ha utilizado un escáner EPSON Perfection V600 Photo, que permite digitalizar opacos y transparencias, del que se ha creado un perfil de calibración mediante una carta de color ColorCheker de la casa X-Rite, para los opacos y una carta de color IT8, en diapositiva, para los filtros de las gafas.



Fig. 14.8. Escáner y cartas de calibración empleadas

El perfil de color del escáner ha sido generado mediante el programa ColorCheker Passport y se ha empleado el software de digitalizado VueScan, que permite generar archivos en formato RAW, que se procesan posteriormente con Adobe Camera Raw, utilizando el perfil de calibración del escáner, con lo que se obtiene un archivo de salida muy fiel al original. Las mediciones de color se realizan posteriormente sobre la imagen resultante, utilizando Adobe Photoshop.

Los filtros de color de las gafas originales se digitalizan mediante el sistema de retroiluminación que posee el escáner y el color resultante tiene la longitud de onda de la luz que atraviesa el filtro. Para mostrar el efecto de filtrado se disponen los colores

obtenidos en una capa independiente, que se fusiona con la capa subyacente, que contiene la imagen de la lámina, utilizando el modo multiplicar. Este modo de fusión simula el comportamiento físico de la luz emitida por la capa inferior al atravesar los filtros.

Para valorar el rigor geométrico de las figuras, se realiza un análisis gráfico sobre las láminas digitalizadas, en el que se comprueba la coherencia de los trazados en perspectiva y se restituyen los puntos de vista, para evaluar que el resultado no produzca distorsiones volumétricas. La separación o distancia base entre los puntos de vista restituidos debería ser igual a la distancia interpupilar media, es decir, unos 65 mm y su posición debe ser congruente con las condiciones de visualización establecidas por el autor.

Para garantizar la precisión de los resultados se deben procurar que las distorsiones métricas producidas en el proceso de digitalización sean despreciables, por lo que se ha comprobado la precisión del escáner mediante la digitalización de una retícula impresa de dimensiones conocidas y el análisis de las desviaciones máximas.

Normalmente, las distorsiones que se producen en un escáner en el sentido de avance (eje X), son debidas a las elongaciones de la correa que mueve el conjunto lector, que dada su naturaleza aleatoria es imposible calibrar. No obstante, el error absoluto es pequeño y se mantiene por debajo de 0,2 mm.

En el sentido ortogonal (eje Y), sí que es posible calibrar las distorsiones debidas a la disposición de los sensores y pude comprobar que además se producía una ligera distorsión de escala (100.55%) que, tras ser corregida, produjo una desviación máxima menor de 0,1 mm, lo que proporciona una precisión suficiente para el propósito de este análisis gráfico.

El momento en el que se publicaron las obras que contempla este análisis, no se conocían los estudios sobre confort visual de los que ahora disponemos, pero me ha parecido interesante, para valorar la intuición y sensibilidad de los autores, realizar también una comprobación del confort visual de cada figura, tomando como referencia los límites de paralaje establecidos por Shibata et al. (2011), para la distancia de observación óptima en cada uno de los casos.

Con frecuencia los autores no expresan con palabras el secreto de su técnica, pero los dibujos hablan por sí mismos y de ellos se desprenden muchas particularidades que iré mostrando, siguiendo el orden cronológico de las publicaciones.

14.2.1. Les Anaglyphes Géométriques de H. Vuibert

Los primeros anaglifos fueron publicados en 1912 por Henri Vuibert, en *Les Anaglyphes Géométriques* (Vuibert, 1912). Tal como se dice en el propio libro, los dibujos fueron realizados por el profesor Henri Richard, director del Liceo de Chartres, quien había presentado ese mismo año sus dibujos estereoscópicos en el quinto Congreso Internacional de Matemáticos celebrado en Cambridge, causando gran admiración.

Vuibert y Richard deciden utilizar la novedosa técnica de impresión a color, desarrollada gracias a los descubrimientos de Ducos du Hauron, para divulgar el método de los anaglifos.

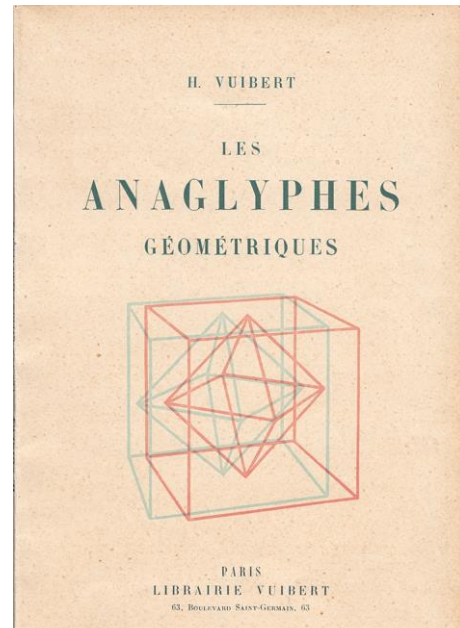


Fig. 14.9. H. Vuibert, 1912, *Les Anaglyphes Géométriques*

En sus 32 páginas el libro describe el funcionamiento de los anaglifos y contiene 30 figuras estereoscópicas con ejemplos geométricos de temas variados como la Geometría Descriptiva, la Cristalografía y la Física. Vuibert y Richard tenían la intención de seguir haciendo más álbumes estereoscópicos en el futuro sobre temas concretos; en el libro se anima a los responsables de centros de enseñanza y a los profesores interesados a que propongan los temas, pero no hay constancia de que publicaran ningún otro álbum posterior.

En la copia analizada, el paso del tiempo ha deteriorado los colores y el efecto estereoscópico que se aprecia es débil, pero el efecto tampoco debió ser mucho más intenso cuando el propio autor reconoce que el procedimiento de impresión fue muy complejo y tuvieron que utilizar tintas más claras, en detrimento de la viveza del efecto de relieve, para evitar el efecto *ghosting*, al que el autor se refiere como residuo.

Las gafas suministradas con el libro utilizan filtros de color azul/rojo; el ojo izquierdo recibe el filtro azul y el derecho el rojo, al contrario que en las gafas actuales, en las que se cambió la disposición para eludir una patente que había vigente. Las gafas originales logran un filtrado bastante bueno y apenas se hace visible un ligero efecto *ghosting* a través del filtro azul (Fig. 14.10), pero el contraste es escaso y algo descompensado, lo que disminuye bastante la intensidad del efecto estereoscópico.

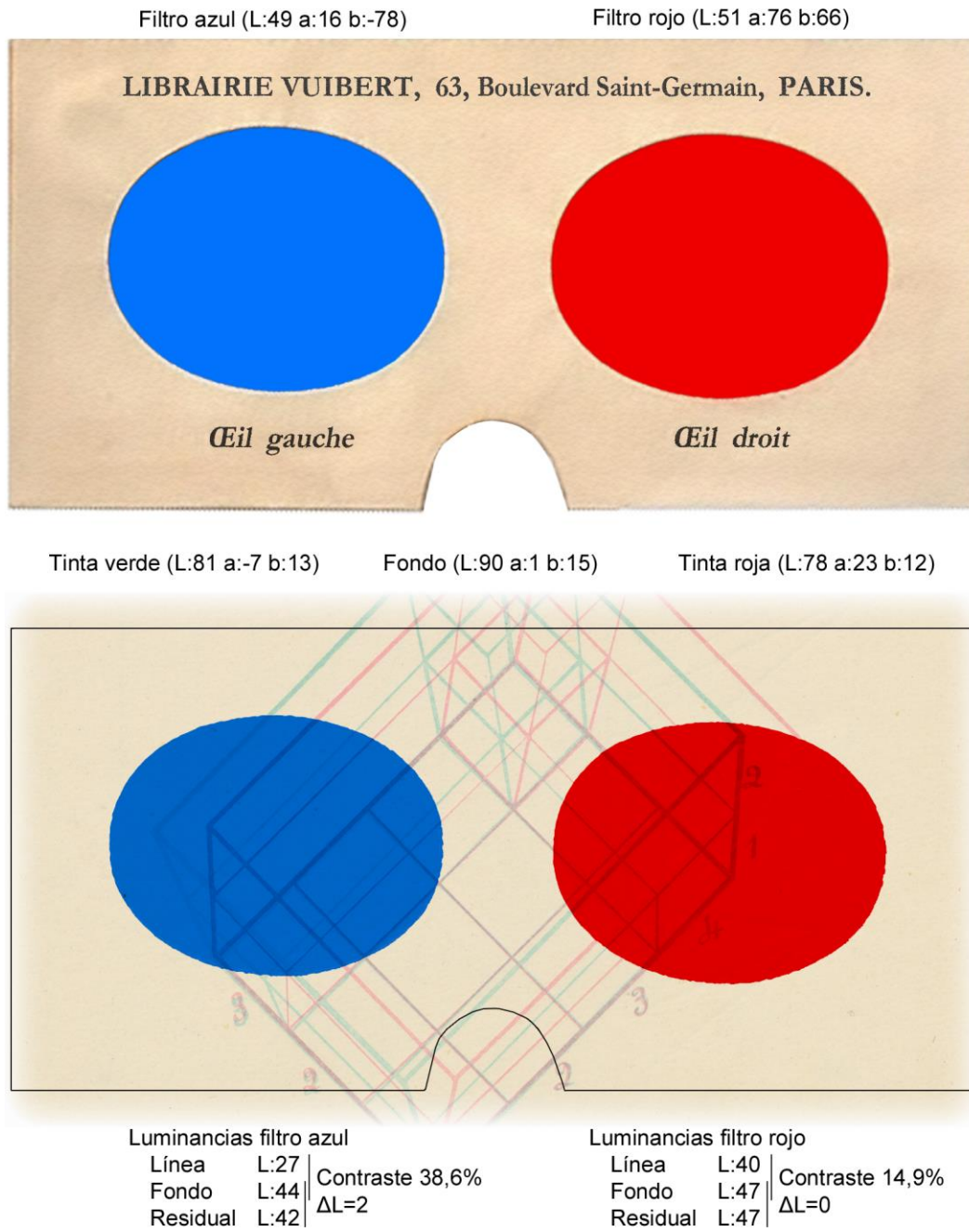


Fig. 14.10. Análisis colorimétrico y de filtrado con las gafas originales. Pedro Cabezos

Me interesa destacar que algunas de las figuras estereoscópicas que aparecen en este libro son anamórficas, lo que sin duda ha influenciado a muchas otras publicaciones posteriores y ha marcado una tendencia, por lo interesantes que resultan cuando el medio puede observarse oblicuamente. El autor señala con la letra (V) aquellas figuras que deben contemplarse con el libro en posición vertical y de frente a los ojos, mientras que utiliza la (H) cuando se trata de un par anamórfico que debe contemplarse con el libro en posición horizontal, apoyado sobre la mesa; además especifica que el observador se debe colocar de forma que las líneas verticales se perciban ortogonales con respecto al plano horizontal.

El autor quiere que las figuras se perciban siempre por delante del papel, por eso no hay paralajes positivos. Considerando los límites de paralaje establecidos por Shibata et al. (2011), podemos comprobar que el paralaje máximo se mantiene debajo de los límites en 25 de las figuras (89,2%).

A continuación, se muestran algunas de las figuras originales, a las que se les ha practicado la optimización de las tintas para adaptarlas a las gafas rojo/cian actuales. La Fig. 14.11 muestra el sólido resultante de la intersección entre un cubo, un octaedro y un dodecaedro rómbico. La (V) indica que debe contemplarse en posición vertical. Obsérvese como no es necesario seguir la convención habitual de líneas vistas/ocultas, pues las aristas se perciben en la posición del espacio que les corresponde.

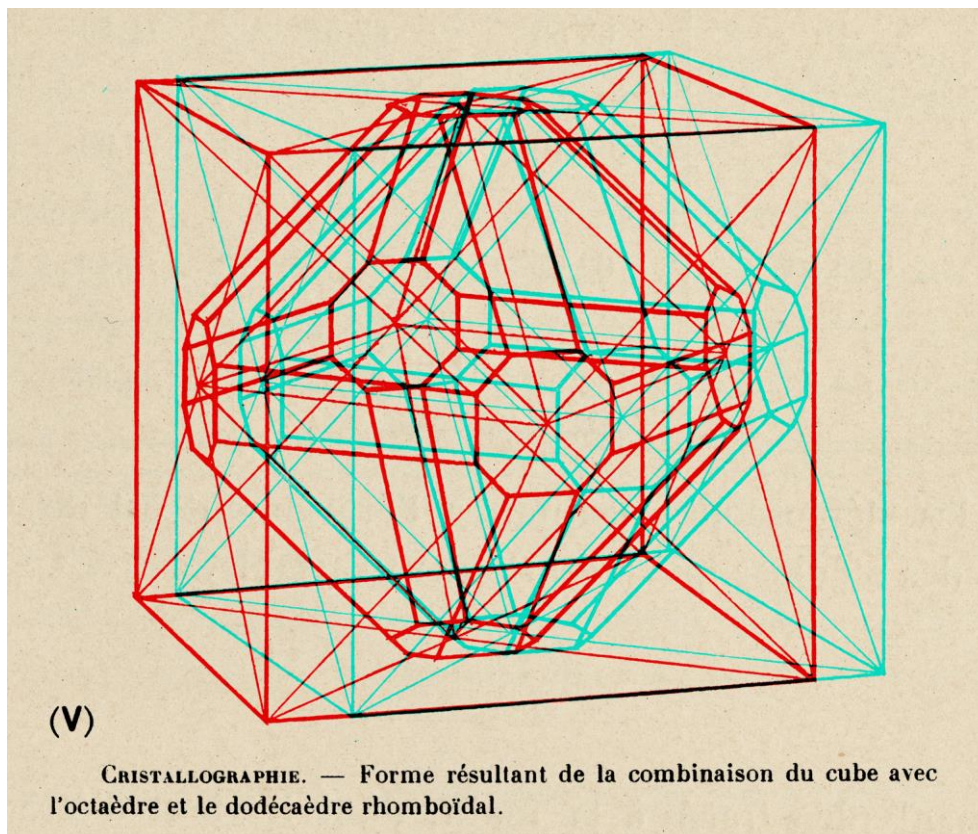


Fig. 14.11. Anaglifo para visualización vertical (V). Tintas optimizadas. Adaptado de Vuibert (1912)



La Fig. 14.12 muestra un cilindro recto a partir de algunas de sus secciones axiales. La letra (H) indica que, en este caso, se trata de una anaglifo anamórfico, por lo que debe contemplarse en posición horizontal. Richard, muy astuto, en la Fig. 14.13 presenta pares que pueden ser contemplados en las dos posiciones (V) y (H), con lo que las distorsiones producidas por el cambio de posición nos lleva a percibir dos figuras geométricas distintas.

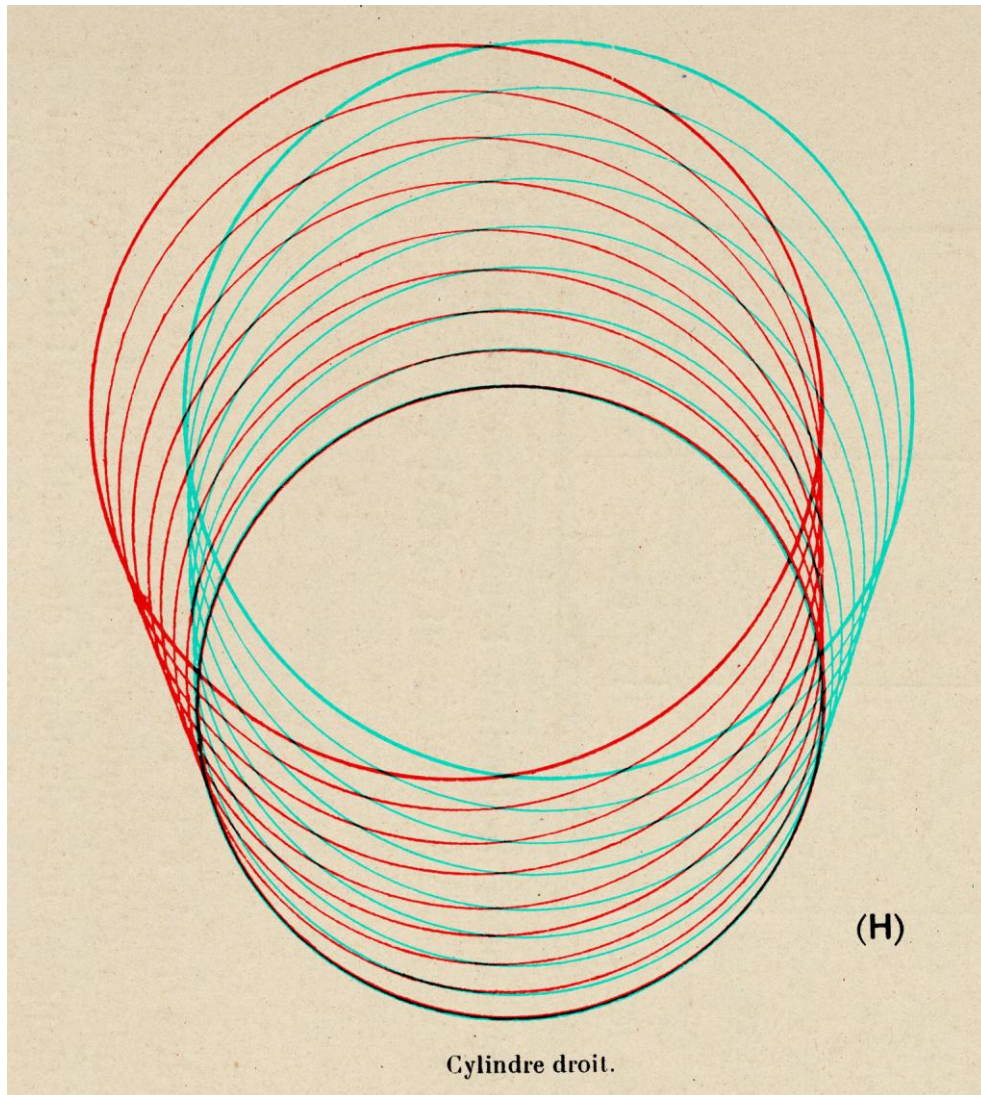



Fig. 14.12. Anaglifo para observación en posición horizontal (H). Adaptado de Vuibert (1912) 

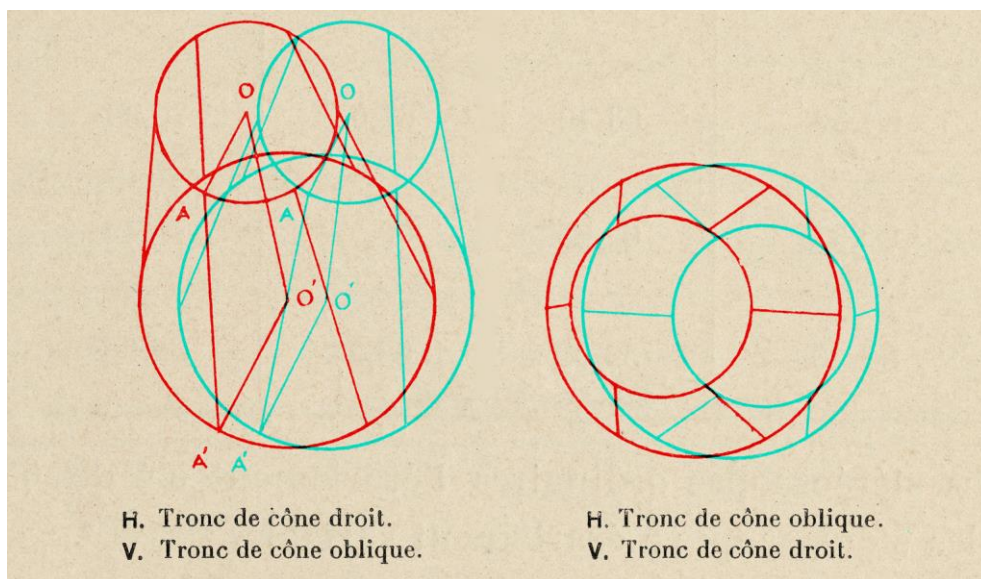



Fig. 14.13 Anaglifo para observación vertical u horizontal. Adaptado de Vuibert (1912) 

En el libro se da a entender que para realizar las proyecciones cónicas que componen el par, se deben disponer los puntos de vista con una separación equivalente a la distancia interpupilar (caso ortoestereoscópico) e incluso aporta la tabla que muestra la Fig. 14.14, donde partiendo de tres valores iniciales que se corresponden con observadores de ojos más o menos separados, se aportan las pequeñas variaciones que sufre la distancia interpupilar en función del ángulo de convergencia ocular a una distancia determinada, lo que supone hilar realmente fino.

Actualmente sabemos que el centro de la pupila no coincide con el centro de perspectiva del ojo, sino que éste se encuentra en el punto nodal trasero, que queda por detrás del cristalino y bastante próximo al centro del globo ocular, lo que ocasiona que las variaciones en la posición del centro de perspectiva del ojo, por efecto de la convergencia ocular, sean aún más pequeñas y totalmente despreciables a efectos prácticos.

Distance à l'œil du point de convergence des axes.	DISTANCES DES CENTRES DES PUPILLES		
	64 ^{mm}	68 ^{mm}	72 ^{mm}
∞	64 ^{mm}	68 ^{mm}	72 ^{mm}
10 ^m	63,95	67,95	71,95
5 ^m	63,91	67,90	71,90
1 ^m	63,55	67,52	71,50
0 ^m ,50	63,10	67,05	70,99
0 ^m ,33	62,65	66,57	70,49
0 ^m ,10	59,52	63,24	66,96

Fig. 14.14. Variaciones en las distancias interpupilares debidas a la convergencia. (Vuibert,1912)

La Fig. 14.15 muestra el análisis geométrico para restituir la posición de los puntos de vista gracias al conocimiento de la forma y proporciones de la figura representada.

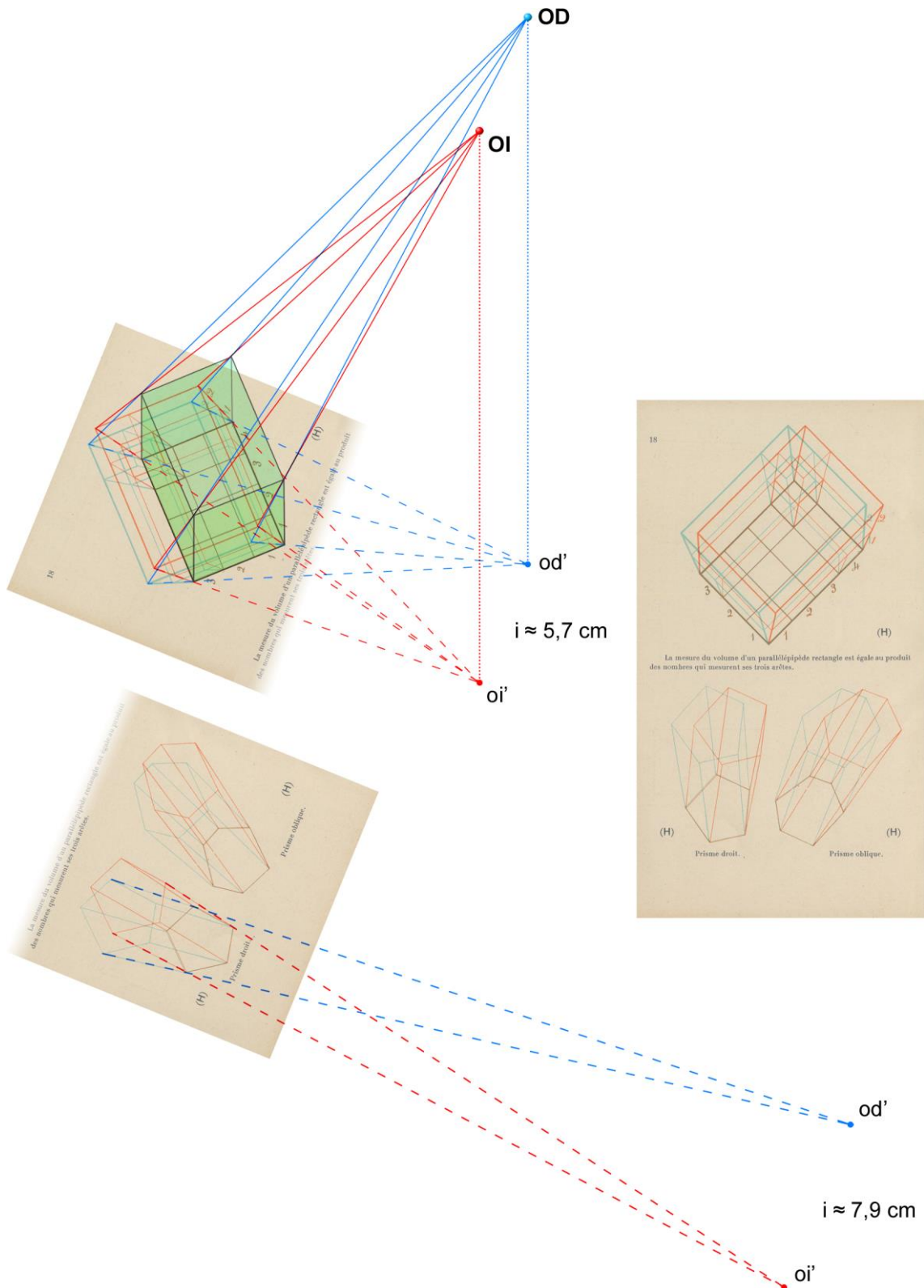


Fig. 14.15. Restitución del punto de vista de las figuras de una misma página. Pedro Cabezos

El anaglifo de la parte superior de la página es un prisma rectangular de proporciones conocidas (4-3-2); gracias a ello se puede restituir la posición en el espacio de ambos puntos de vista (OI y OD). El ángulo de oblicuidad con el que el observador debería contemplar las figuras está próximo a 60°. Sin embargo, en los anaglifos de los prismas hexagonales que aparecen en la parte inferior de la página analizada, no se conoce su altura, por tanto, sólo se puede obtener la proyección de los puntos de vista sobre el plano horizontal (oi' y od'), que se han obtenido al prolongar dos líneas verticales del prisma pentagonal recto, que convergen en el punto principal de la perspectiva cónica, en cuya vertical quedaría situado el punto de vista, pero esto nos basta para determinar la distancia base considerada al realizar los dibujos.

Llama la atención la discrepancia entre las distancias restituidas y que éstas estén fuera del margen proporcionado en la tabla anterior. La distancia de observación también es diferente; el espectador debe estar más retirado al observar los anaglifos de la parte inferior de la página que al contemplar el de la parte superior. Probablemente, los dibujos no fueron realizados teniendo en cuenta su maquetación definitiva y por eso fueron tratados de forma aislada. Los pares podrían haber sufrido también un escalado a la hora de la impresión, lo que explicaría las diferencias entre las distancias restituidas.

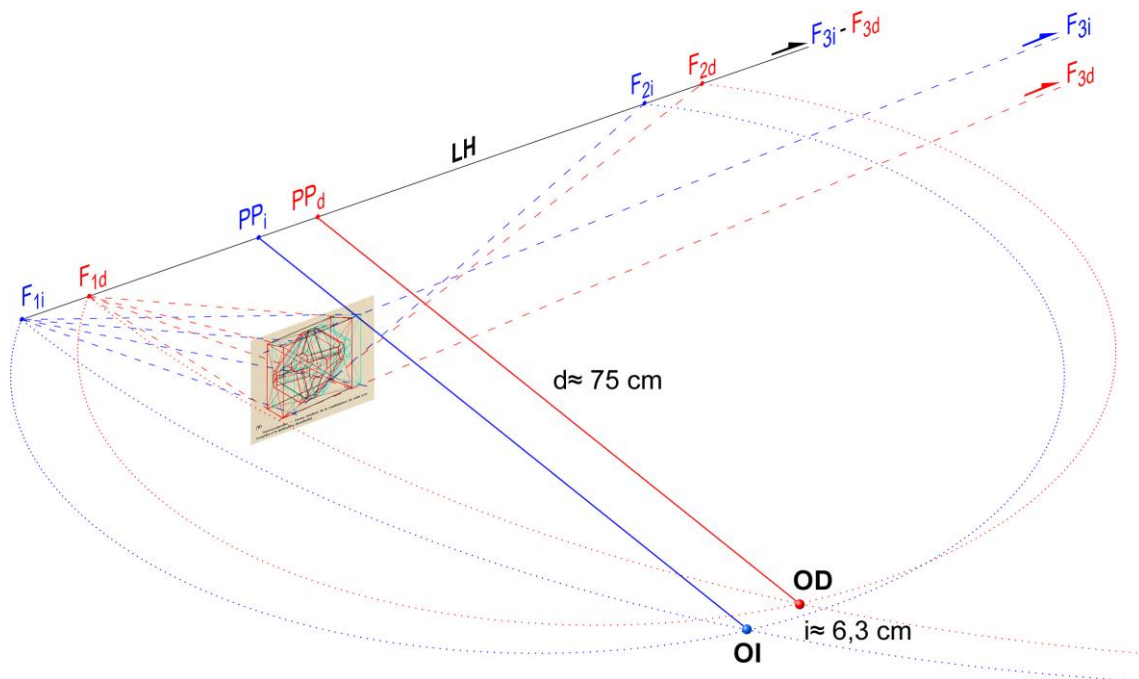


Fig. 14.16. Restitución del punto de vista en una de las láminas frontales. Pedro Cabezos

Para restituir los puntos de vista de las figuras frontales, he considerado aquellas en las que aparece un cubo, pero el trazado original presenta errores en la construcción de la perspectiva que impiden determinar con precisión los puntos de fuga, por lo que las posiciones obtenidas resultan algo inciertas. A pesar de ello, la distancia

interpupilar obtenida es muy adecuada, mientras que la distancia de observación resulta algo lejana para las condiciones normales de lectura.

Como se trata de perspectivas de plano del cuadro vertical, la restitución se ha efectuado obteniendo tres puntos de fuga; dos corresponden a las aristas horizontales del cubo, mientras que el otro corresponde a la dirección de una de las diagonales de la base del cubo. Luego, se ha dibujado el arco capaz de 45° , definido por el segmento que tiene por extremo los puntos de fuga $F1$ y $F2$, y el arco capaz de 90° , definido por el segmento que une los puntos de fuga $F1$ y $F3$; la intersección de estos dos arcos determina el punto de vista.

En las figuras que han de contemplarse frontalmente, se debería procurar que la línea de horizonte estuviera centrada con respecto a la lámina o se provocarían distorsiones perceptivas, pues el observador tiende a colocar su centro a la altura de los ojos.

14.2.2. El álbum de anaglifos de Francisco Herrera Oria

El segundo libro analizado es el *Álbum de anaglifos geométricos para el estudio de la geometría métrica en el espacio*, publicado en 1920, por el español Francisco Herrera Oria, hermano del Cardenal Ángel Herrera Oria.

Francisco estuvo muy relacionado con la Asociación Católica de Propaganda, fundada y presidida por su hermano Ángel, quien había

impulsado la creación de la Editorial Católica en 1911, lo que sin duda le facilitaría la publicación de un libro de estas características.

Se trata de un libro muy poco conocido del que se conservan muy pocos ejemplares. La tirada no debió ser muy numerosa, pues el propio autor se encargó de vender y suministrar la obra; en el libro aparece la siguiente nota: "*Los pedidos de albums a casa del autor...*" y se dan dos direcciones; la casa del autor en Santander y otra que, como he podido comprobar, corresponde a la Iglesia del Oratorio de Gracia, situada en la Gran Vía de Madrid.

En las páginas iniciales se proporcionan las indicaciones de cómo han de contemplarse los anaglifos (Fig. 14.18) y también se describe someramente su funcionamiento y ventajas (Fig. 14.19).

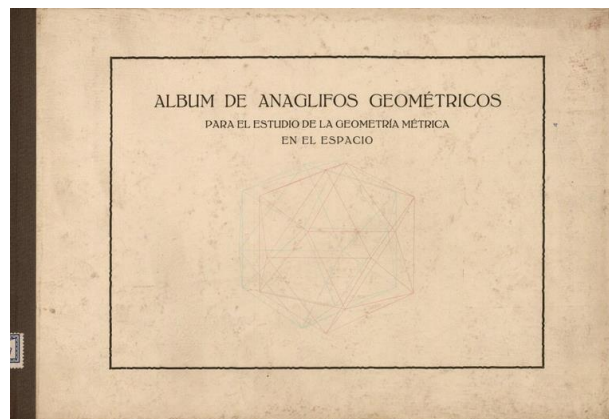


Fig. 14.17. F. Herrera, 1920, *Álbum de anaglifos geométricos*

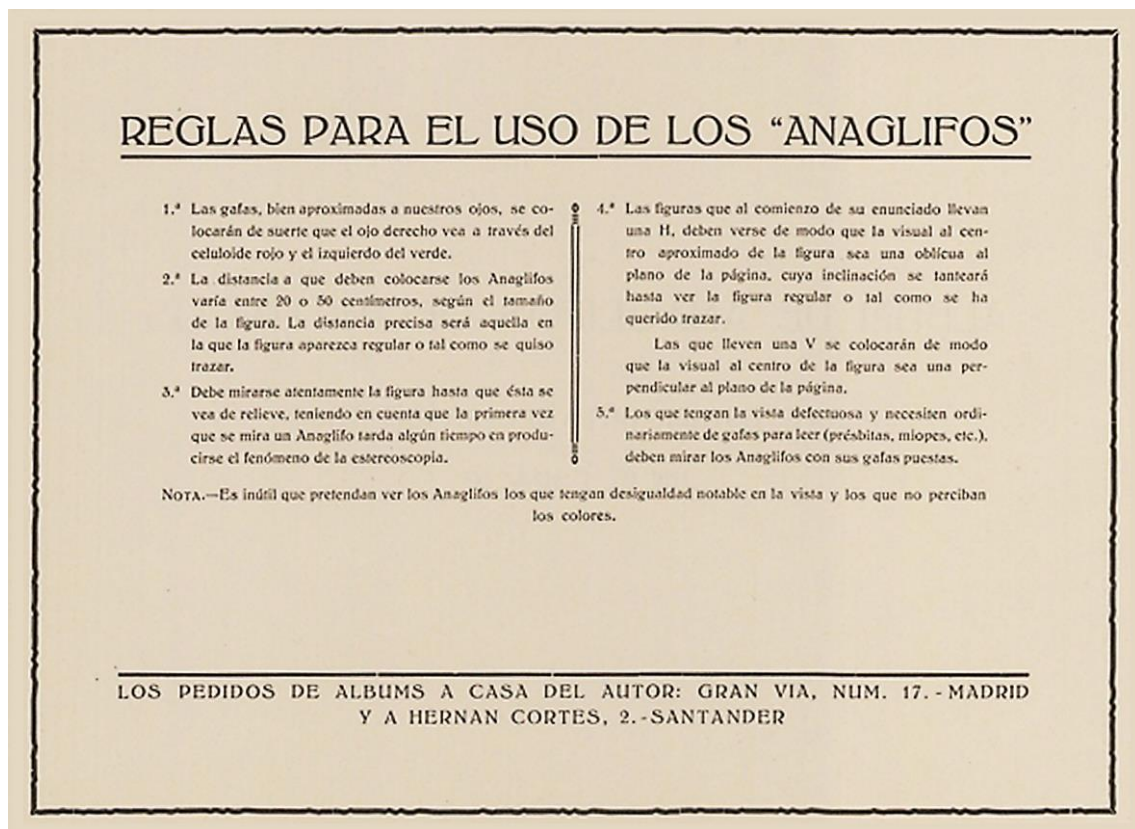


Fig. 14.18. Notas explicativas del autor acerca de la visualización de las figuras. (Herrera, 1920)

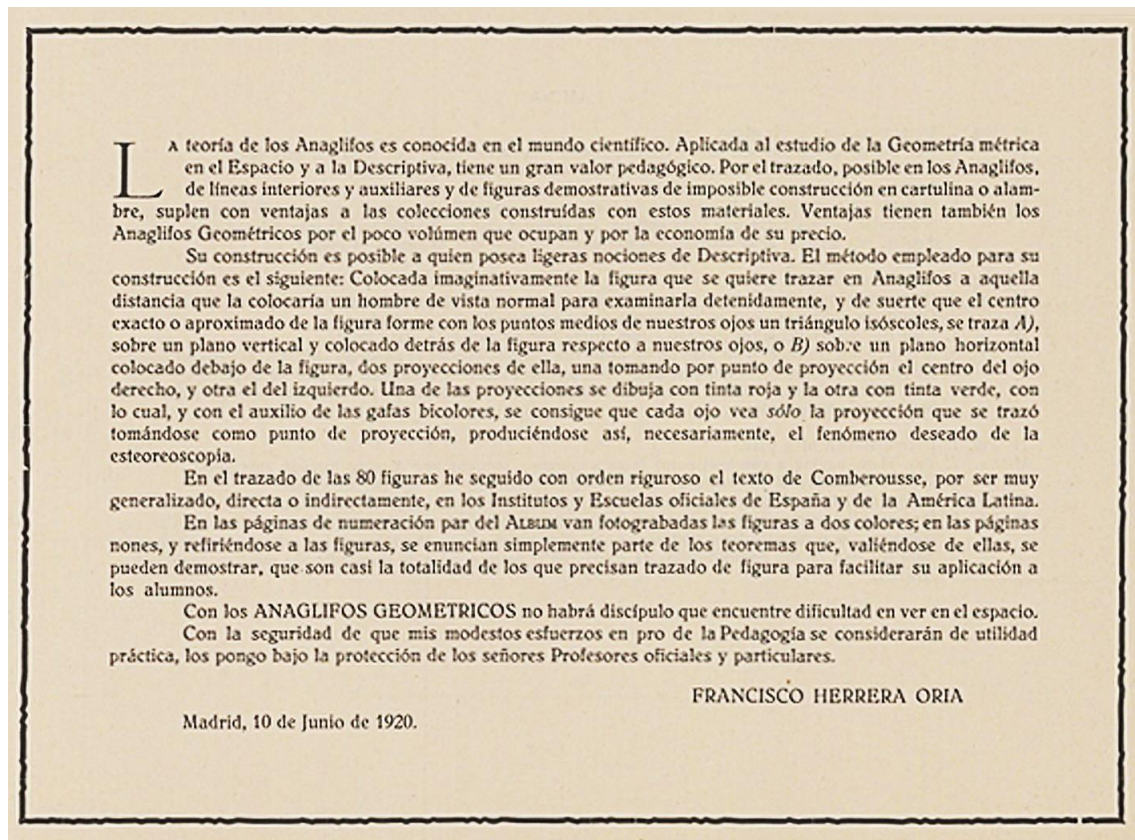


Fig. 14.19. Reseña de autor al funcionamiento de los anaglifos y sus ventajas. (Herrera, 1920)

El álbum consta de 78 figuras estereoscópicas cuyos pies de figuras están redactados en castellano, francés e inglés. El autor especifica que las figuras siguen con orden riguroso el texto de Comberousse (*Traité de géométrie élémentaire*, escrito por Eugene Rouché y Charles de Comberousse, en 1865, traducido al castellano en 1878), por ser el más difundido entre los institutos y escuelas oficiales de España y América Latina. El ejemplar al que he podido acceder no conservaba las gafas originales, por lo que no he podido realizar una valoración de la calidad de filtrado, pero las gafas originales disponían de un filtro rojo para el ojo derecho y verde para el izquierdo.

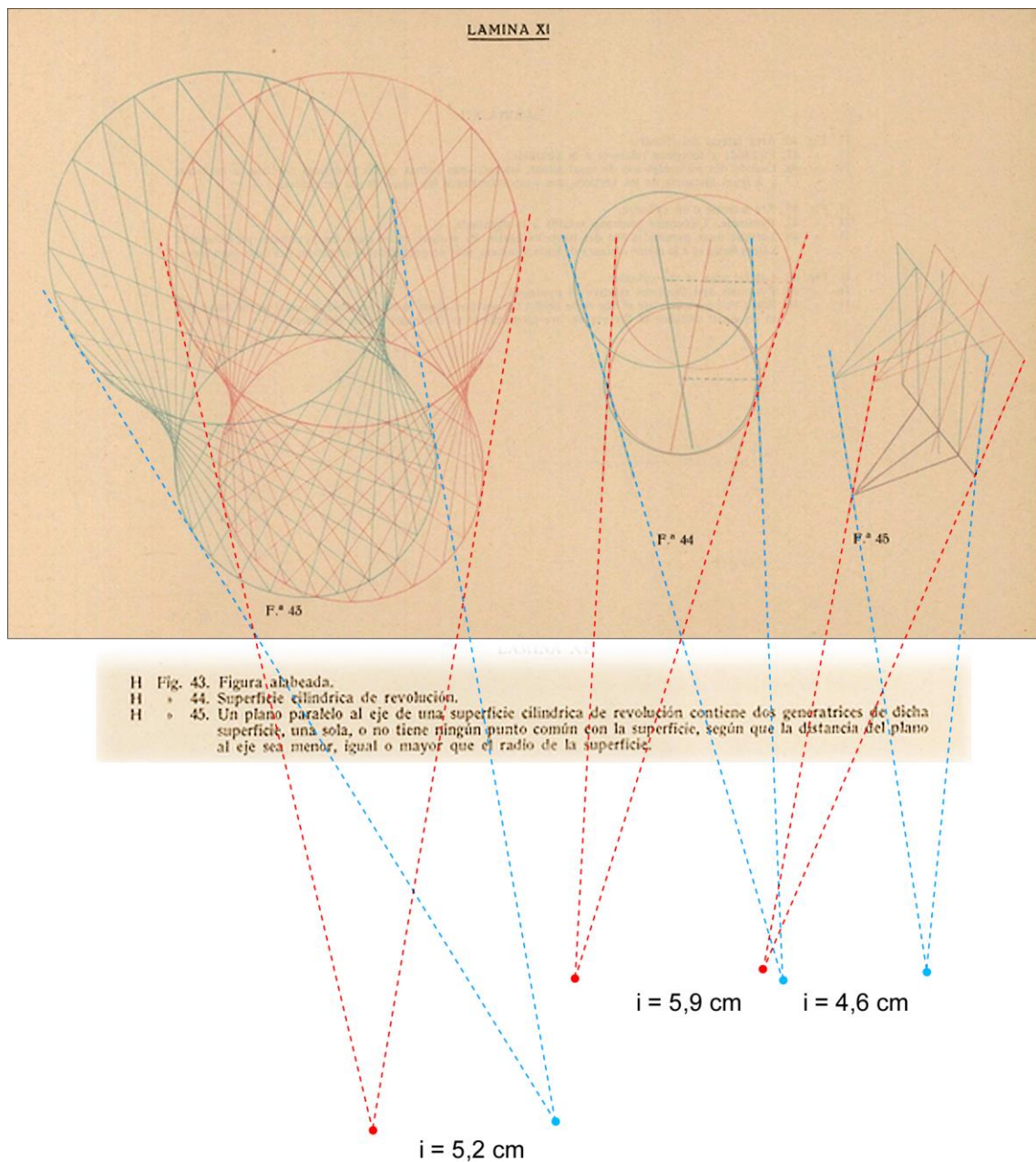


Fig. 14.20. Restitución de los puntos de vista, en planta, y distancias interpupilares. Pedro Cabezos

El libro recuerda en muchos aspectos al libro de Vuibert; en él se combinan los anaglifos convencionales con los anamórficos y en los pies de figura se utiliza la misma denominación (H) y (V) para distinguirlos. Las figuras que aparecen en una misma página han sido dibujadas de forma aislada, por lo que el espectador debería cambiar su posición para apreciar cada figura correctamente. En la Fig. 14.20 se han restituido los puntos de vista en planta y las distancias interpupilares, prolongando dos líneas verticales en el espacio, que confluyen en el punto principal de la perspectiva. Las diferencias pueden deberse a un cambio de escala en el proceso de maquetación.

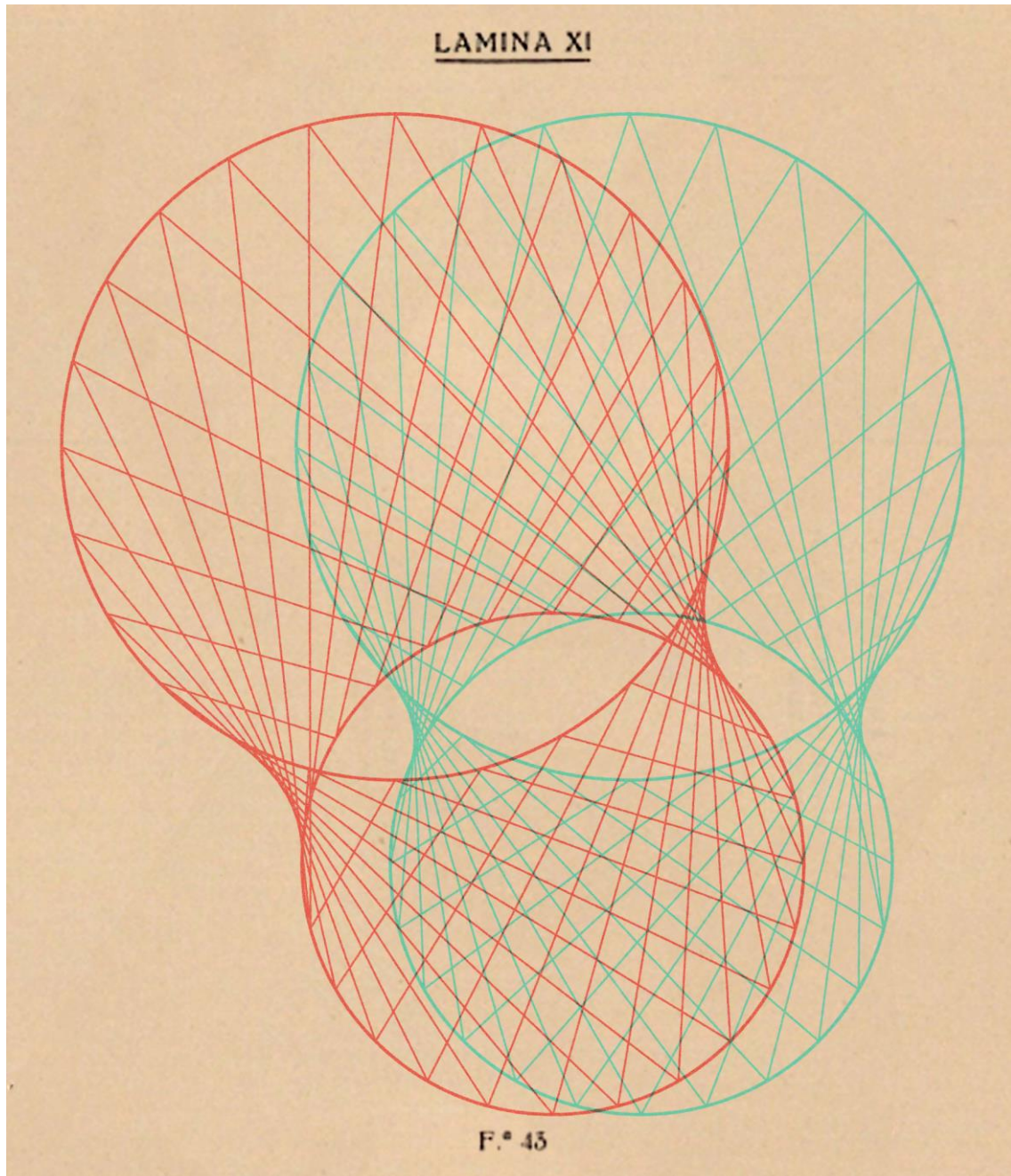


Fig. 14.21. Anaglifo anamórfico de un Hiperboloide. Tintas optimizadas. Adaptado de Herrera (1920)



La Fig. 14.21 muestra, a tamaño natural, una de las figuras anamórficas del libro, que ha sido restaurada y adaptada a los filtros rojo/cian. Puede verse que el paralaje máximo es bastante elevado y sobrepasa con creces los límites de confort estudiados, por lo que puede resultar algo difícil de fusionar. En Vuibert la figura percibida descansa sobre el plano del cuadro, sin embargo, Herrera prefiere que la figura levite sobre este lo que conduce, en este caso, a un exceso de paralaje, pero el paralaje es adecuado en la mayoría de las figuras (88,5%).

El efecto de relieve conseguido es bueno (Fig. 14.22), a pesar de que la perspectiva de los dibujos no tiene el rigor geométrico que debiera, pues se detectan incongruencias cuando se analizan sus puntos de fuga.

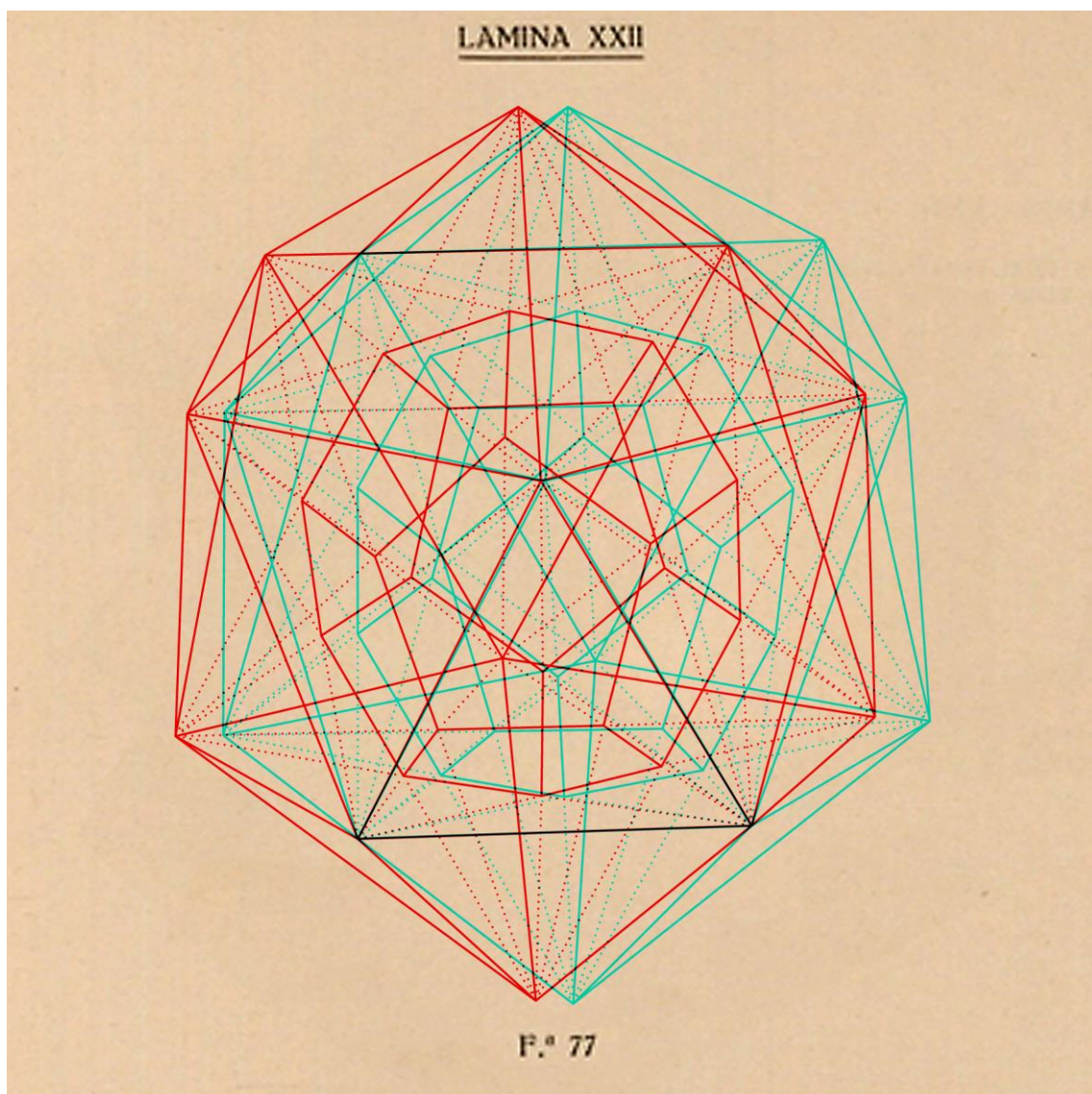



Fig. 14.22. Dodecaedro regular estrellado de 3ª especie inscrito en un icosaedro regular
Tintas optimizadas. Adaptado de Herrera (1920) 

14.2.3. Las láminas estereoscópicas de Gianni y Mario Gliozzi

Los italianos Gianni y Mario Gliozzi publicaron varios libros de texto de geometría para los diferentes niveles educativos, algunos de ellos con anaglifos, como el manual de geometría para la enseñanza secundaria titulado *Elementi di Geometria*, de 1929, o *Tavole di Anaglifi Geometrici*, del mismo año, que comprendía un conjunto de 20 láminas estereoscópicas independientes, que servían de complemento a la enseñanza de la geometría en la escuela media inferior. También publicaron un tercer libro llamado *Geometria Elementare*.

Son ejemplares muy raros y difíciles de conseguir, pero finalmente pude adquirir un ejemplar de *Tavole di anaglifi Geometrici*, con el que he podido realizar este análisis. Lamentablemente el ejemplar no conservaba las gafas originales y no he podido realizar el estudio cromático, pero éstas utilizaban el formato azul/rojo.

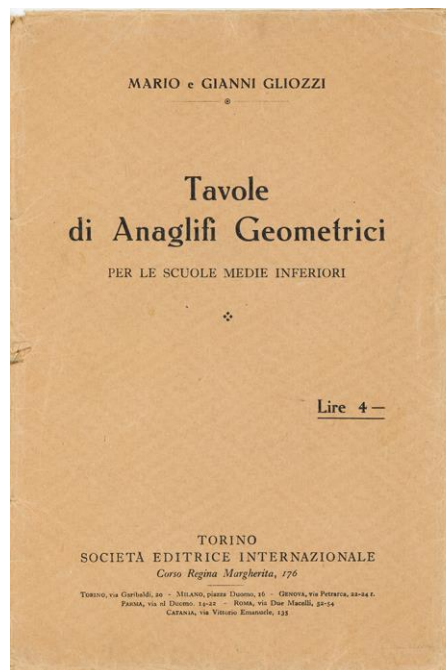


Fig. 14.23. Gianni & Mario Gliozzi, 1929, *Tavole di Anaglifi Geometrici*

En las 20 láminas aparecen un total de 38 figuras estereoscópicas frontales. En la primera lámina, los autores establecen las condiciones de visualización, diciendo que las láminas deben verse frontalmente y a unos 30 cm de distancia y añaden que, si se cambia la orientación de la lámina, el objeto se verá distorsionado y que, cuanto mayor sea el tiempo de observación, mejor será el efecto de relieve percibido.

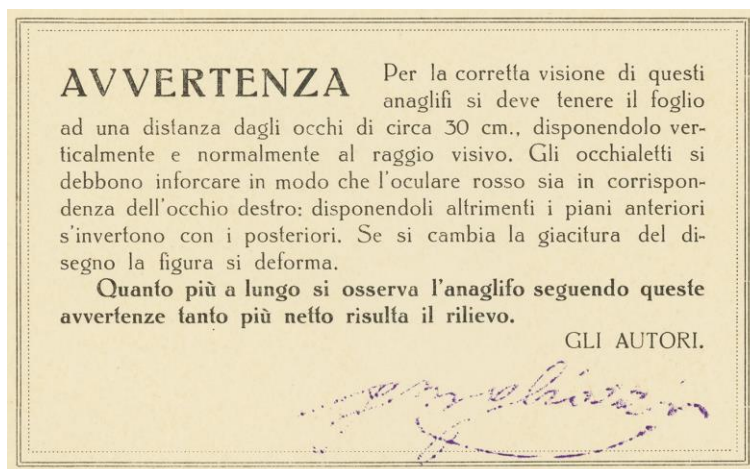


Fig. 14.24. Condiciones de visualización. (Gliozzi, 1929)

Al igual que sucedía en las publicaciones anteriores, las figuras tienen siempre paralaje negativo, para que los modelos se perciban por delante del plano del papel, lo que provoca paralajes elevados en alguna de las figuras.

El límite de paralaje cómodo negativo, para la distancia de observación recomendada por los autores (30 cm), es de 16 mm y el paralaje máximo se mantiene por debajo de este límite en la mayoría de las figuras (74%), pero el paralaje excesivo del resto de figuras pueden resultar incómodo para algunos espectadores.

El estudio geométrico para restituir los puntos de vista pone de manifiesto incorrecciones de perspectiva en los trazados, al igual que ocurría en las publicaciones anteriores, por lo que la posición de los puntos de vista restituidos es bastante aproximada; no obstante, los resultados son congruentes con las condiciones de visualización establecida por los autores y con la distancia interpupilar media.

El procedimiento de restitución es análogo al empleado previamente, a partir de los puntos de fuga del cubo que aparece en una de las figuras y el trazado de los arcos capaces de 45° y 90°, cuya intersección determina los puntos de vista (Fig. 14.25).

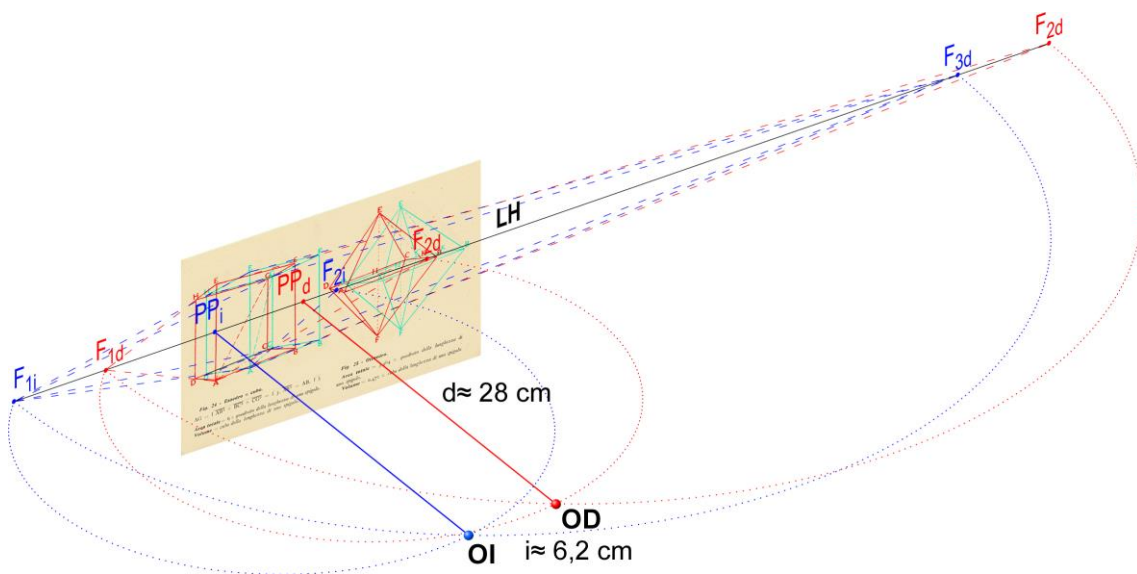


Fig. 14.25. Restitución de los puntos de vista a partir de las fugas del cubo. Pedro Cabezas

A continuación, se muestran dos de las figuras que aparecen en una de las láminas de esta colección. El efecto estereoscópico que producen es muy intenso, porque las diferencias de paralaje son elevadas. Los valores máximos están por encima del límite de confort, lo que podría ocasionar incomodidad visual en algunos espectadores.

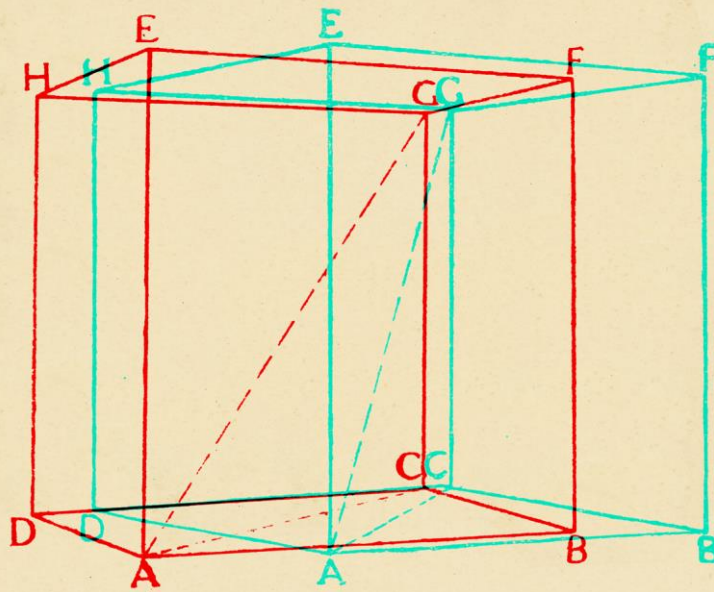


Fig. 24 - Esaedro o cubo.

$$AG = \sqrt{AB^2 + BC^2 + CG^2} = \sqrt{3 \cdot AB^2} = AB \cdot \sqrt{3}$$

Area totale = 6 × cuadrato della lunghezza di uno spigolo.

Volume = cubo della lunghezza di uno spigolo.

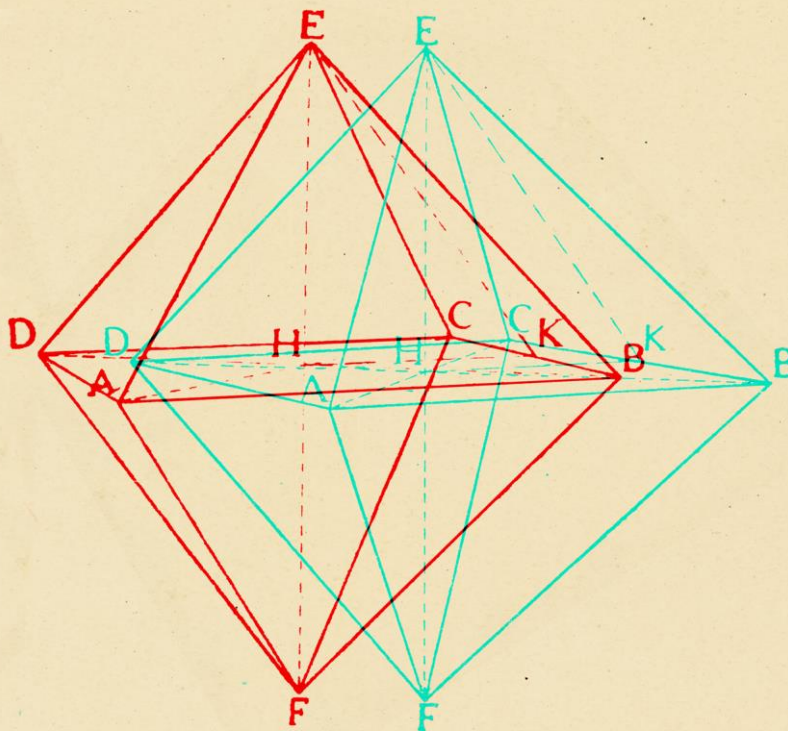



Fig. 25 - Ottaedro.

Area totale = 3,464 × cuadrato della lunghezza di uno spigolo.

Volume = 0,471 × cubo della lunghezza di uno spigolo.

Fig. 14.26. Cubo y octaedro. Tintas optimizadas. Adaptado de (Glozzi, 1929) 

14.2.4. Los anáglifos en negro de José Estevan Clavillar

El coronel de ingenieros José Estevan Clavillar publica en 1935 un conciso artículo en el Memorial de Ingenieros del Ejército (Estevan, 1935), acerca de lo que él denomina *anáglifos en negro*. Ese mismo año publica también un cuaderno con 4 láminas que contienen 9 pares estereoscópicos de figuras geométricas (poliedros regulares) más uno fotográfico. El coronel utiliza el nombre *anáglifo* por resultar más popular que imagen estereoscópica, pero en realidad sus dibujos son pares preparados para verse mediante visión libre cruzada.

Lo más interesante del artículo es que, para facilitar al espectador la visión libre, propone utilizar lo que él llama *estereoscopio sin lentes*, que puede construirse con papel o cartulina utilizando la plantilla que él mismo aporta (Fig. 14.29).

He de confesar que hasta que encontré este artículo yo era incapaz de conseguir ver en relieve mediante visión libre cruzada, pero gracias al sencillo estereoscopio del Coronel Estevan y a sus indicaciones, pude adquirir esta habilidad en cuestión de segundos.

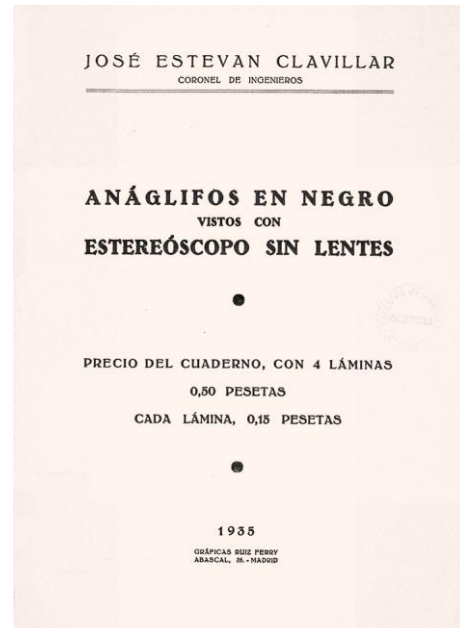


Fig. 14.27. J. Estevan, 1935, Anáglifos en negro vistos con estereoscopio sin lentes

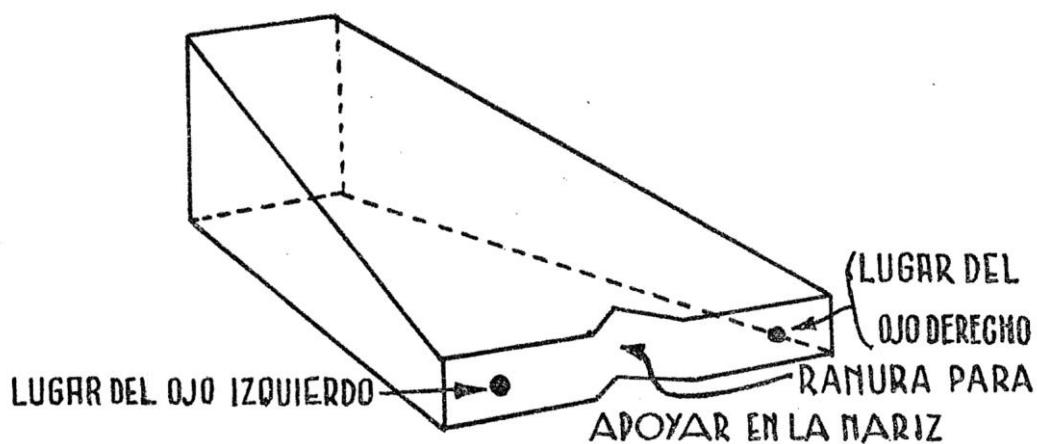


Fig. 14.28. Estereoscopio montado. (Estevan, 1935)

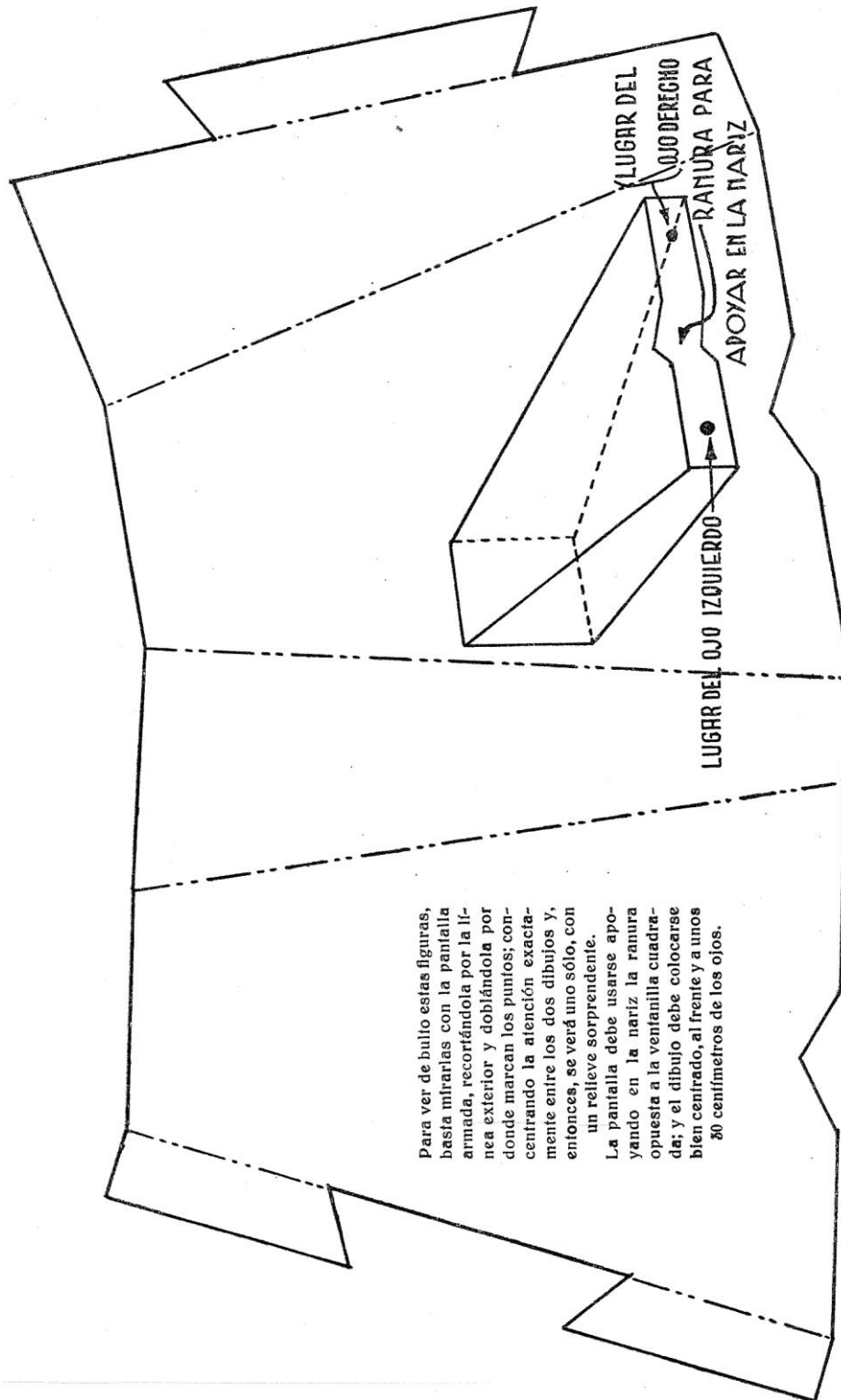


Fig. 14.29. Plantilla a escala natural del estereoscopio sin lentes. (Estevan, 1935)

Este estereoscopio se basa en los mismos principios que los instrumentos para visión libre descritos por Wheatstone, pero su construcción resulta mucho más simple.

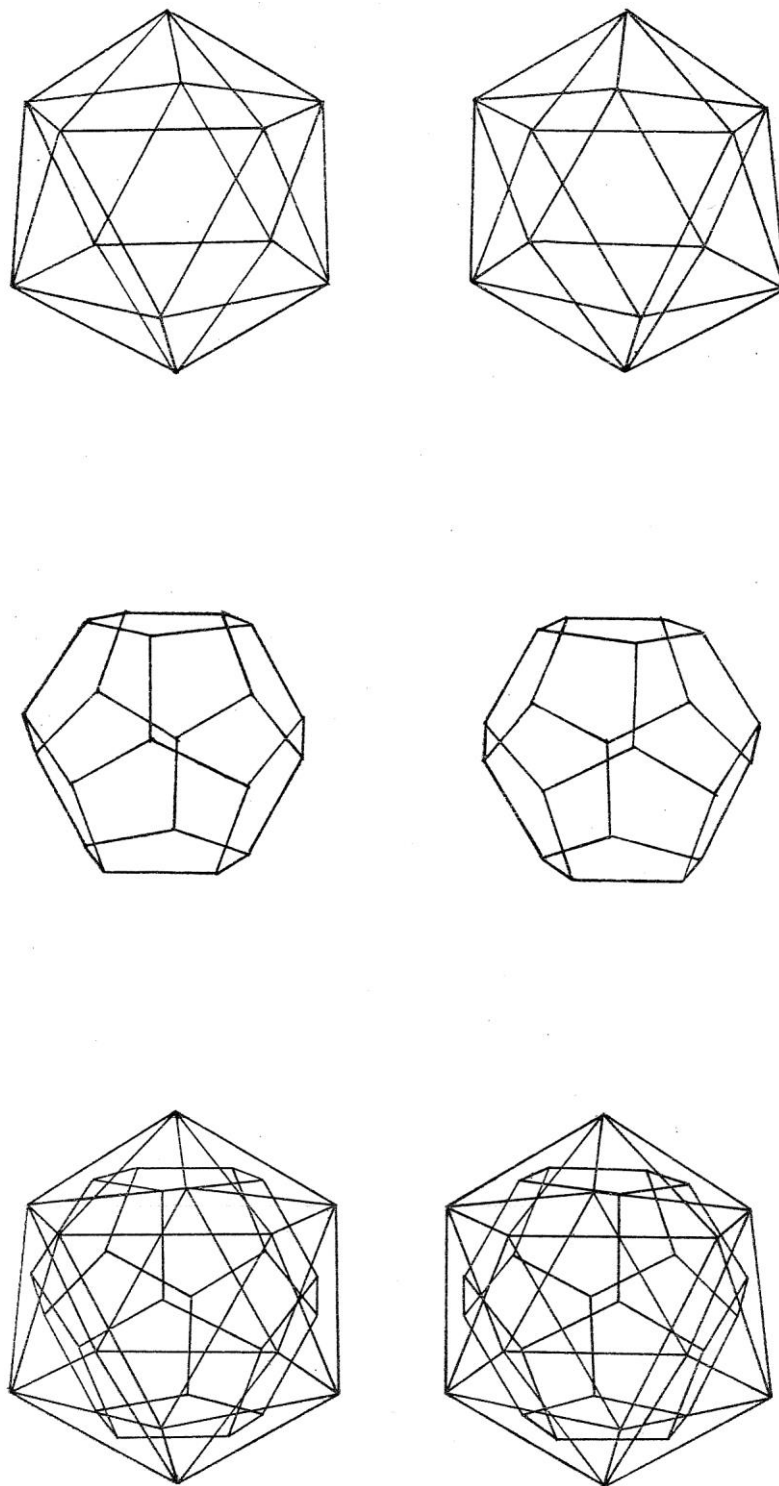


Fig. 14.30. Pares estereoscópicos de poliedros regulares para visualizar con la ayuda del estereoscopio sin lentes. (Estevan, 1935)

La Fig. 14.30 muestra, a tamaño natural, una de las láminas del cuaderno; para su visualización el autor proporciona las siguientes instrucciones:

“Para ver de bulto estas figuras, basta mirarlas con la pantalla armada, recortándola por la línea exterior y doblándola por donde marcan los puntos; centrando la atención exactamente entre los dos dibujos y, entonces, se verá uno solo con un relieve sorprendente.

La pantalla debe usarse apoyando en la nariz la ranura opuesta a la ventanilla cuadrada; y el dibujo debe colocarse bien centrado al frente y a unos 30 centímetros de los ojos”

(Estevan, 1935:6)

El estereoscopio está diseñado de forma que cuando se mira a su través, se limita el campo de visión al espacio que deja libre el hueco cuadrado de 35x35 mm y al converger la mirada es posible fusionar el par y apreciar el relieve.

La siguiente figura muestra un esquema con el funcionamiento visual del estereoscopio sin lentes del Coronel Estevan; su diseño logra que cada ojo vea sólo la imagen del par que le corresponde, evitándose así las imágenes residuales laterales que se producen en la visión libre.

Para lograr la fusión de las imágenes, el observador debe converger los ejes ópticos, lo que puede resultar dificultoso para algunos observadores, pero no cabe duda que este estereoscopio facilita en gran medida el aprendizaje de la visión cruzada y en cuanto uno ha adquirido esta habilidad, ya es posible prescindir del él.

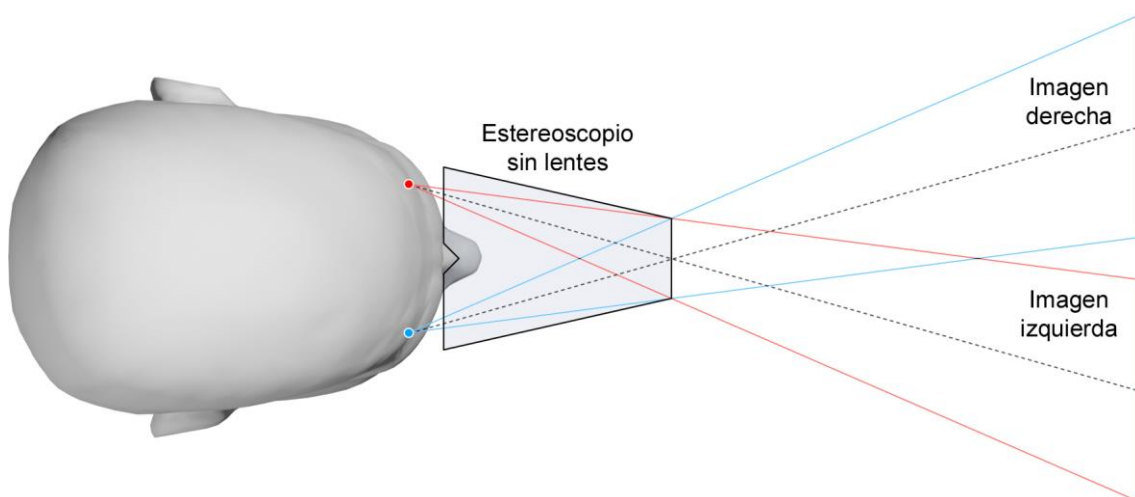


Fig. 14.31. Funcionamiento del estereoscopio sin lentes del Coronel Estevan. Pedro Cabezos

14.2.5. Mathematische Raumbilder. La perfección alemana

El Primer libro alemán de geometría con anaglifos que he podido analizar es *Mathematische Raumbilder*, publicado en 1938, por los matemáticos Otto Köhler, Ulrich Graf y Curt Calov. Los artículos publicados por Ulrich Graf (Graf, 1938) (Graf, 1939) (Graf, 1940) y (Graf,1941) y por Curt Calov (Calov, 1935) y (Calov,1937), indican que ellos fueron quienes más experimentaron con la estereoscopia.

Ulrich Graf fué un brillante matemático e ingeniero alemán, que ejerció como profesor en la Universidad Técnica de Danzig, actualmente Gdansk (Polonia). Curt Calov trabajó en el Ministerio de la Aviación de Berlín, realizando mapas estereoscópicos (Lorenz, 2012).

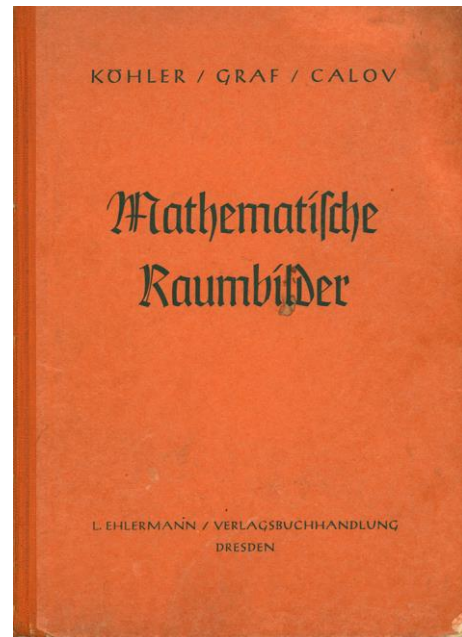


Fig. 14.32. O. Köhler, U. Graf, C. Calov, 1938. *Mathematische Raumbilder*

Cuando tuve por primera vez este libro entre mis manos y empecé a ojearlo, me quedé absolutamente maravillado de la calidad global de esta obra. La precisión de los dibujos y el mimo con el que han sido trazados es loable. También me sorprendió la calidad de la impresión, pues los dibujos parecían estar como el primer día.

Las gafas aportadas eran comercializadas por la empresa alemana Carl Zeiss, para visualizar anaglifos realizados a partir de fotografías estereoscópicas aéreas. Estas gafas empleaban filtros de color rojo/azul, con la disposición moderna, es decir, rojo a la izquierda y azul a la derecha, y tienen unas características de filtrado bastante similares a las actuales. En las gafas hay una inscripción en la que puede leerse: tras medio minuto, la imagen aparecerá en relieve.

El proceso de impresión fue impecable, la elección de las tintas y el color de fondo, empleado tan sabiamente, logran que el filtrado sea excelente, lo que considero un aspecto muy destacable de esta publicación, pues cuando se imprimen los anaglifos directamente sobre el fondo blanco del papel, se produce un contraste fondo/figura muy fuerte que dificulta enormemente el filtrado. Ya vimos soluciones como la empleada por Vuibert, consistente en disminuir la intensidad de las tintas, pero, en este caso, al usar un fondo de color anaranjado pálido, se reduce el contraste lo necesario para que el *ghosting* resulte imperceptible. Según Lorenz (2012), el método de impresión empleado había sido patentado en 1933 por el Dr. Frederick Stier.

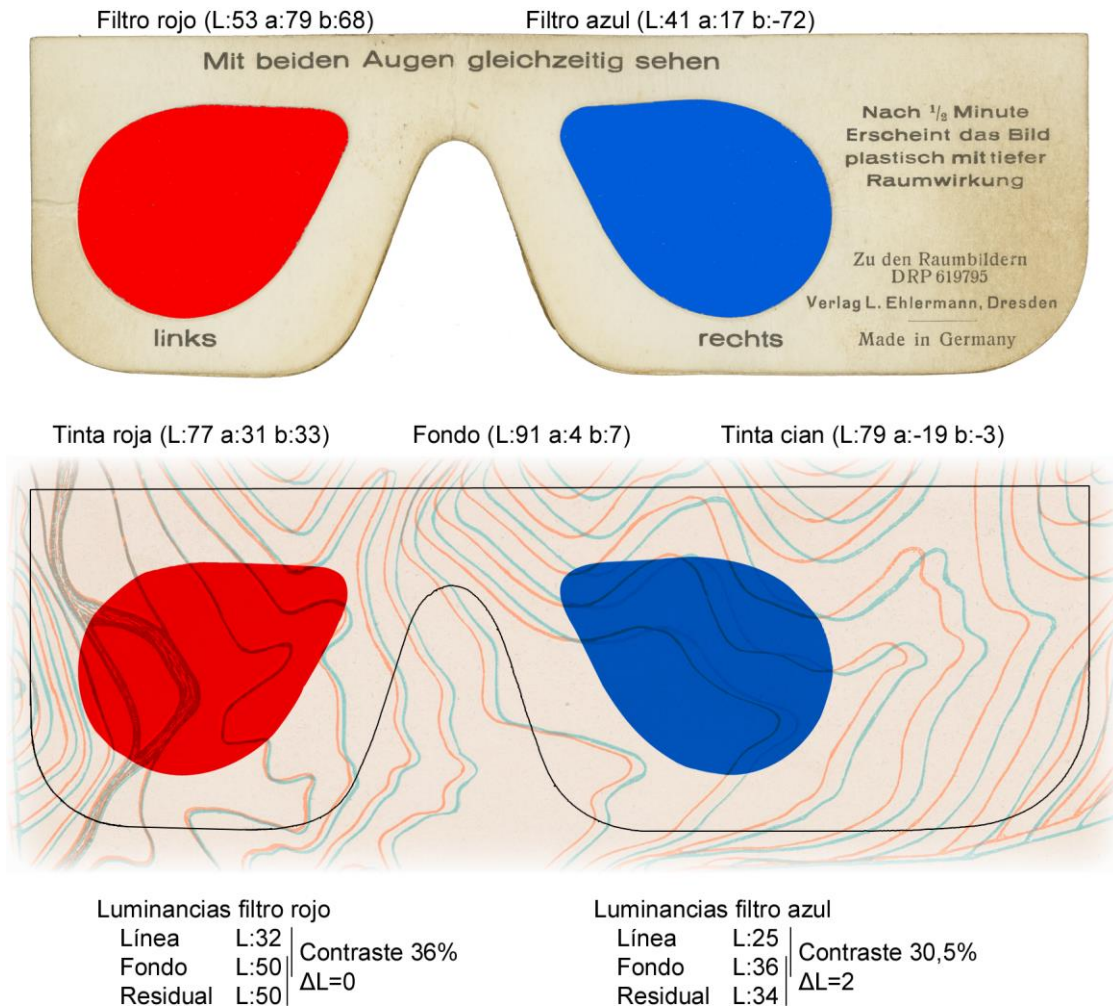


Fig. 14.33. Análisis colorimétrico y de filtrado con las gafas originales. Pedro Cabezos

Al inicio del libro se hace una pequeña introducción histórica en la que se menciona a Wheatstone, Rollmann, los descubrimientos de Ducos du Hauron y el libro de Vuibert. También se hace referencia al cuaderno con 50 anaglifos de Perregaux & Weber (1914), que fue la primera publicación alemana con anaglifos, de la que, de momento, me ha sido imposible conseguir un ejemplar para su análisis.

En el libro se explica muy bien el funcionamiento de la estereoscopia y la restitución visual de los puntos en el espacio (Fig. 14.34). Graf también describe, posteriormente, en uno de sus artículos (Graf, 1941), el procedimiento matemático para conseguir, punto a punto, las dos proyecciones necesarias.

La primera edición de este libro contaba con 24 figuras y la segunda 32. En este libro todos los anaglifos son anamórficos y las condiciones de visualización se definen en la parte superior de las figuras, especificando las distancias que definen la posición de ojo cíclope y el ángulo de observación, según el esquema de la Fig. 14.35.

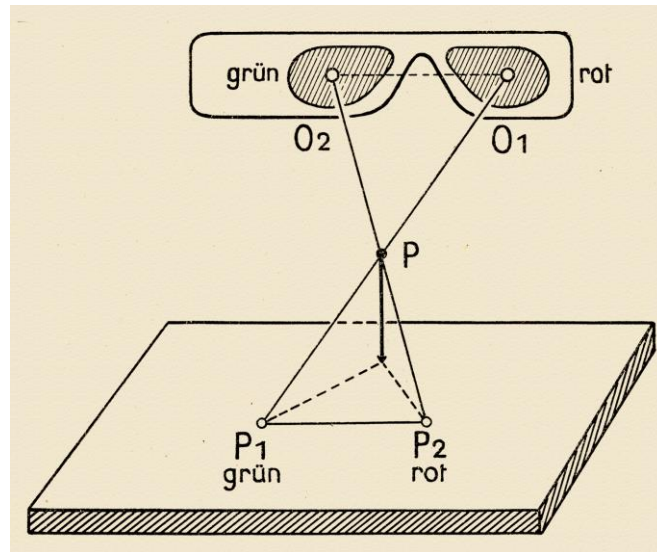


Fig. 14.34. Restitución visual del punto en el espacio a partir de sus proyecciones (Köhler, Graf & Calov, 1938)

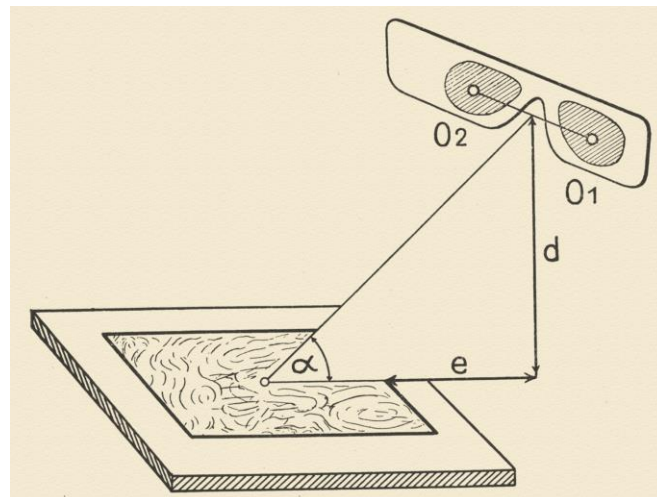


Fig. 14.35. Esquema para ilustrar los parámetros que definen la posición del espectador (Köhler, Graf & Calov, 1938)

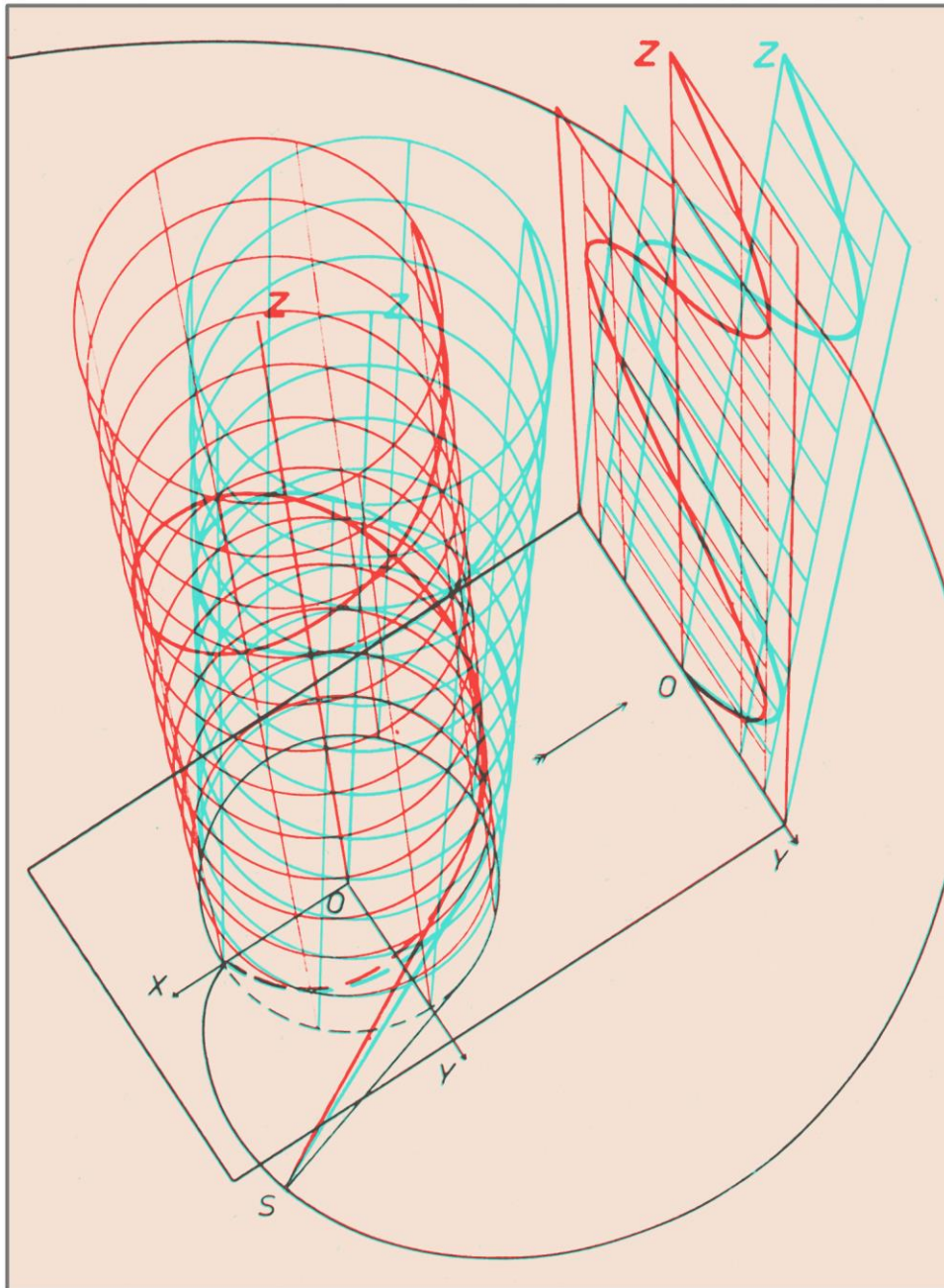
Los pies de figura están traducidos al inglés, francés, italiano y castellano y únicamente se muestra una figura por página ya que el formato del libro es reducido (16,5 x 23 cm).

Al restituir los puntos de vista de los dibujos, he podido comprobar la coincidencia total con la posición expresada por los autores, que han considerado una distancia base de 6,5 cm. La mayoría de los dibujos son complejos y los autores emplean con gran acierto la valoración de línea para distinguir los elementos principales de los secundarios e incluso se representan las sombras propias y arrojadas en una de las figuras. El efecto estereoscópico conseguido es extraordinario y el paralaje máximo se mantiene dentro de los límites de confort en un 84,4% de las figuras.

A continuación, se muestran varias de las figuras que aparecen en el libro; préstese atención a los parámetros de visualización (d, e, α), expresados en la parte superior de cada figura.

Nr. 30

$d = 37,0 \text{ cm}$ $e = 26,8 \text{ cm}$ $\alpha = 45^\circ$



Helical line and sine line

Hélice et sinusóide

Schraubenlinie und Sinuslinie

Elice e sinusóide

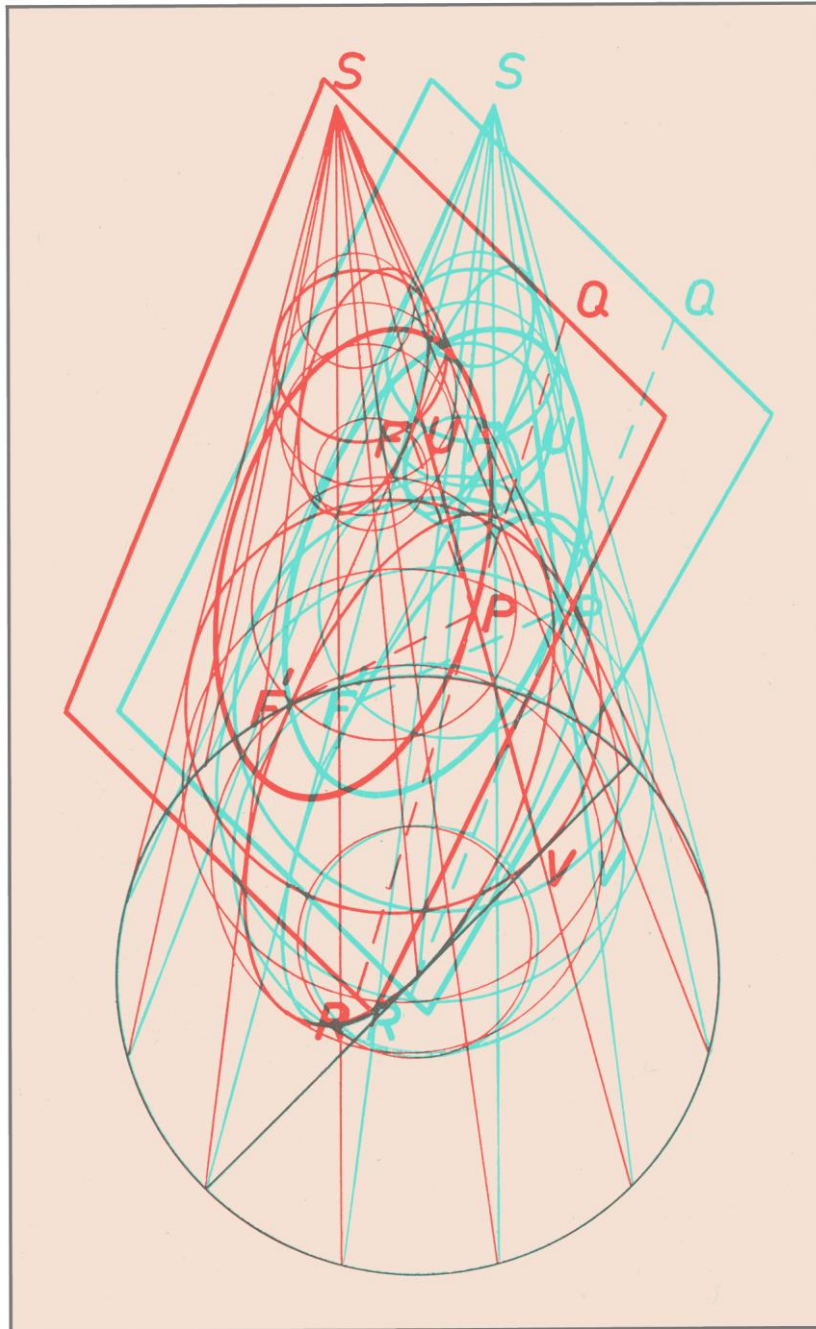
Helivide y sinusóide

Fig. 14.36. Hélice y Sinusóide. Tintas optimizadas. Adaptado de (Köhler, Graf & Calov, 1938)



$d = 40,8 \text{ cm}$ $e = 31,1 \text{ cm}$ $\alpha = 45^\circ$

Nr. 17



Ellipse as a conic section

L'ellipse comme section conique

Die Ellipse als Kegelschnitt

L'ellipse come sezione conica

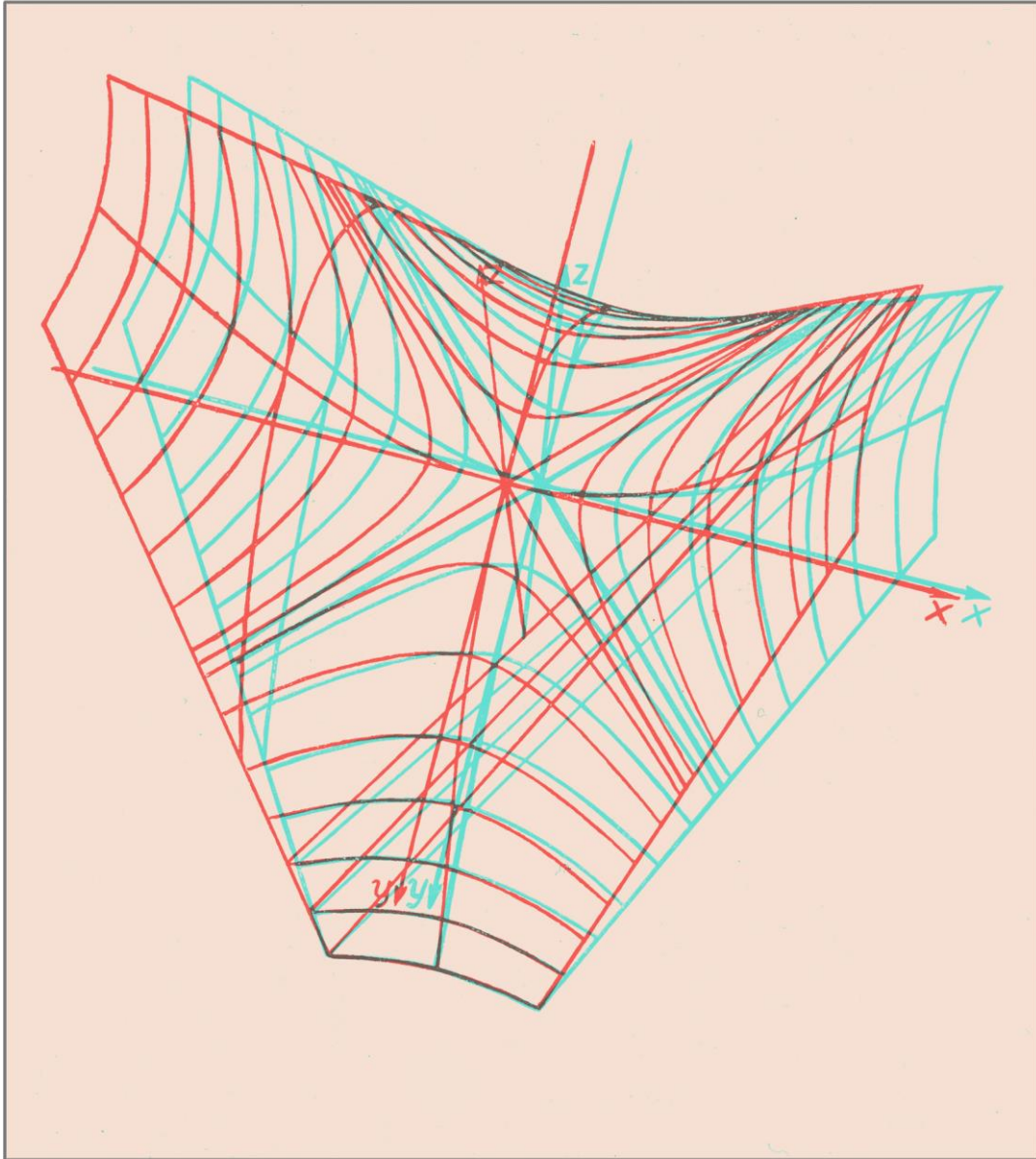
Elipse como sección cónica

Fig. 14.37. Teorema de Dandelin. Tintas optimizadas. Adaptado de (Köhler, Graf & Calov, 1938)



$d = 41,8 \text{ cm}$ $e = 20,7 \text{ cm}$ $\alpha = 55^\circ$

Nr. 21



The hyperbolic paraboloid

Le hyperbolique paraboloid

Das hyperbolische Paraboloid

Il iperbolico paraboloid

hiperbólico

Fig. 14.38. Paraboloides Hiperbólicas. Tintas Optimizadas. Adaptado de (Köhler, Graf & Calov, 1938)



Dado que todos los anaglifsos de esta publicación son anamórficos, me ha parecido interesante realizar una conversión del último ejemplo mostrado para que pueda ser visto frontalmente.

La conversión es posible mediante una doble transformación de perspectiva, que consiste en rectificar la imagen desde la posición de cada punto de vista, de forma que el rayo principal forme con la imagen el ángulo α , definido en las condiciones de visualización ($\alpha = 55^\circ$, en este caso). Con las dos imágenes rectificadas se ha montado un nuevo anaglifo que debe contemplarse frontalmente a una distancia de aproximadamente 46 cm (Fig. 14.39).

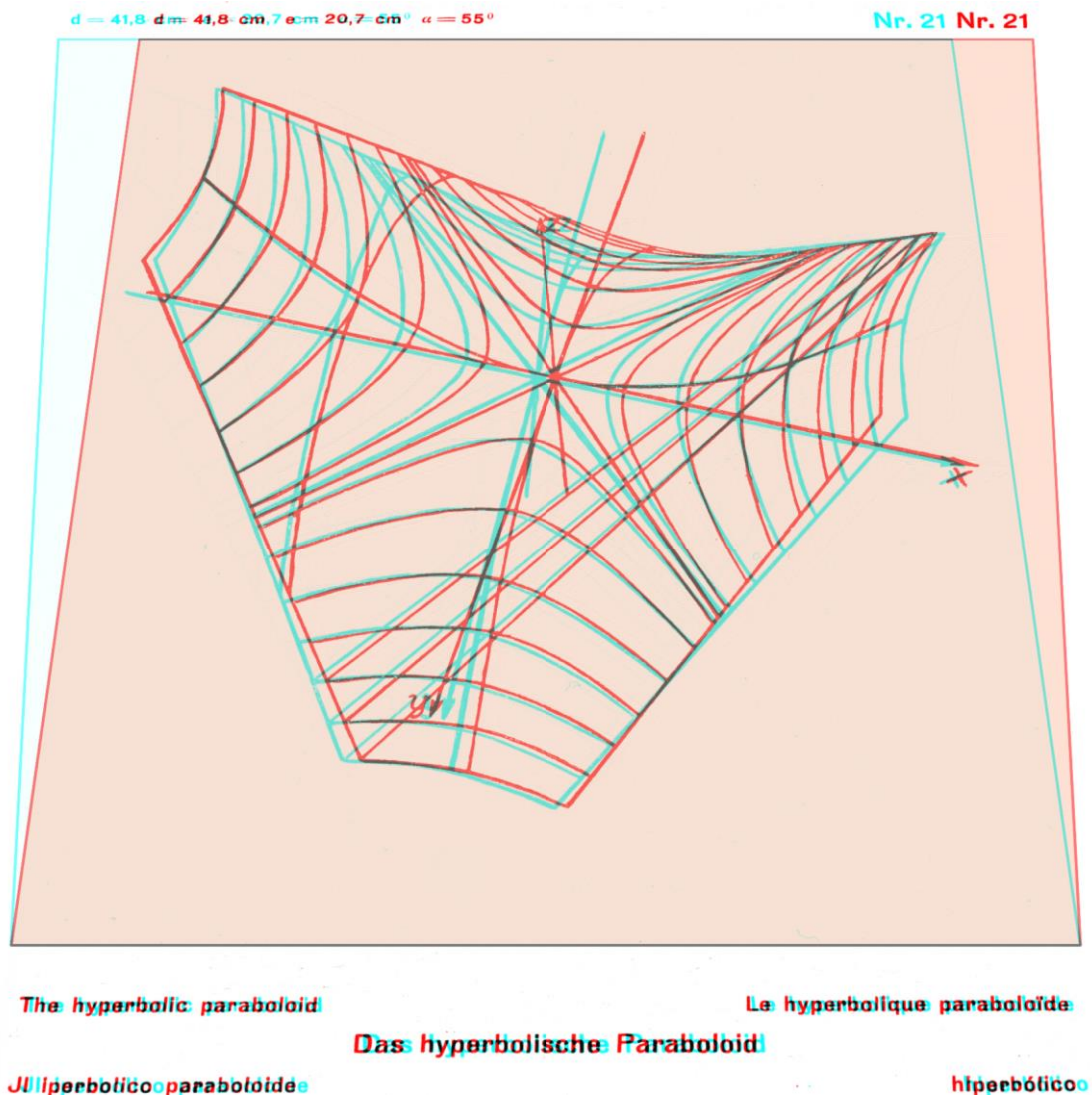


Fig. 14.39. Conversión del anaglifo anamórfico anterior para su visionado frontal. Pedro Cabezos



14.2.6. Geometría Descriptiva y sus aplicaciones de Ángel Taibo

Ángel Taibo Fernández (1902-1962) fue un ingeniero industrial guipuzcoano, Profesor Titular de Geometría Descriptiva en la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid, que acabó su vida en Argentina realizando grandes proyectos como la electroquímica de Mendoza (Navas, 1977).

Su libro *Geometría Descriptiva y sus aplicaciones* ha sido uno de clásicos de referencia en la docencia de la Geometría Descriptiva en España desde su publicación en 1943 y todavía se encuentra a la venta.

A muchos de los que conozcan este libro les puede parecer extraño que lo incluya en este estudio, pues seguramente no recordarán que este libro tuviera imágenes estereoscópicas, pero en realidad sí que las tuvo; pero sólo en el tomo II de la primera edición de 1943, titulado curvas y superficies, que incluyó un anexo de 8 láminas con figuras estereoscópicas.

En el texto no se hace alusión alguna a estas imágenes estereoscópicas ni a su construcción; todo parece indicar que el libro fue pensado y escrito para prescindir de ellas, tal como sucedió con las ediciones posteriores. Esto se debió a los problemas que tuvo el Profesor Taibo a la hora de conseguir las gafas necesarias para la visualización. Finalmente pudo conseguirlas, para esta edición, gracias a la empresa alemana Carl Zeiss, a la que el autor dedica este agradecimiento:

*“El autor se complace en hacer constar su agradecimiento a la Casa **ZEISS AEROPOTOGRAPH, de Jena**, por su desinteresada colaboración al solucionarle la insuperable dificultad con que ha tropezado en la adquisición de las gafas para anaglifos”*

(Taibo, 1943:442)



Fig. 14.40. Ángel Taibo (1902-1962)

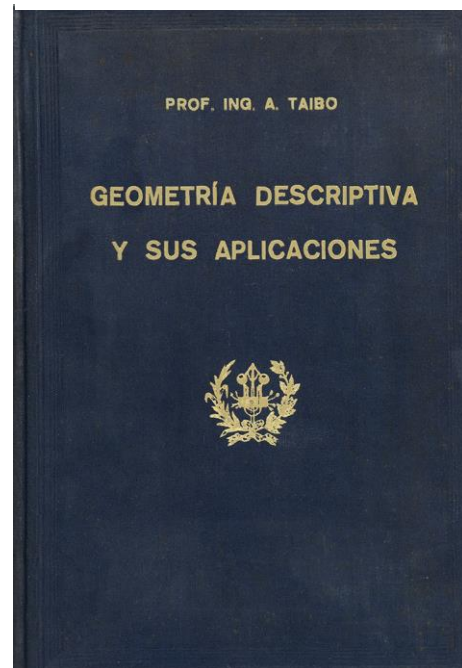


Fig. 14.41. A. Taibo, 1943, *Geometría Descriptiva y sus aplicaciones*

La precisión de los dibujos es bastante buena y no hay *ghosting* visible, gracias a la baja saturación de las tintas, que habrán perdido algo de intensidad debido al paso del tiempo, lo que difumina el efecto estereoscópico por la falta de contraste producida (Fig. 14.42).

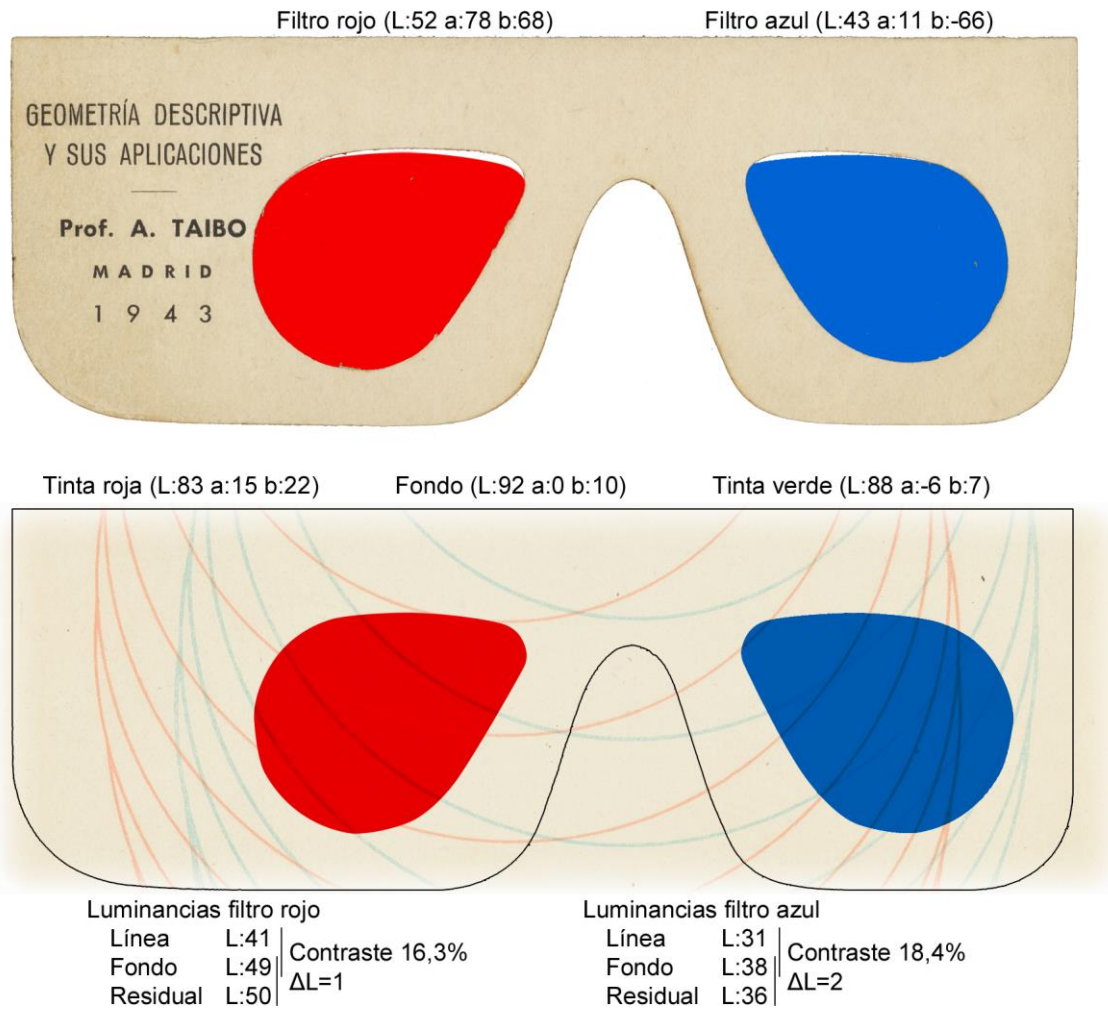


Fig. 14.42. Análisis colorimétrico y de filtrado con las gafas originales. Pedro Cabezos

Cada lámina contiene una figura anamórfica, al igual que sucedía en el libro anterior. Las condiciones de visualización se definen en una nota aclaratoria en la que se indica que los ojos del observador se sitúan 35 cm por encima del plano de la lámina y a 40 cm del borde inferior, con la lámina colocada horizontalmente. El análisis de los límites de paralaje revela que la mitad de las láminas tienen un paralaje adecuado, mientras que el resto pueden resultar, a algunos espectadores, algo molestas o difíciles de fusionar.

El estudio de la posición de los puntos de vista en planta, se realiza de igual modo que en los casos anamórficos anteriores, hallando los puntos de fuga de dos líneas verticales en el espacio, que determinan el punto principal de cada una de las proyecciones cónicas e indican la posición del espectador en planta.

La Fig. 14.43 muestra el análisis gráfico efectuado en tres de las láminas del libro, en las que pueden tomarse como referencia las proyecciones de algunas líneas verticales en el espacio. Con ello he podido comprobar que la posición en planta restituida no se corresponde con la posición aconsejada y que las distancias bases son discordantes.

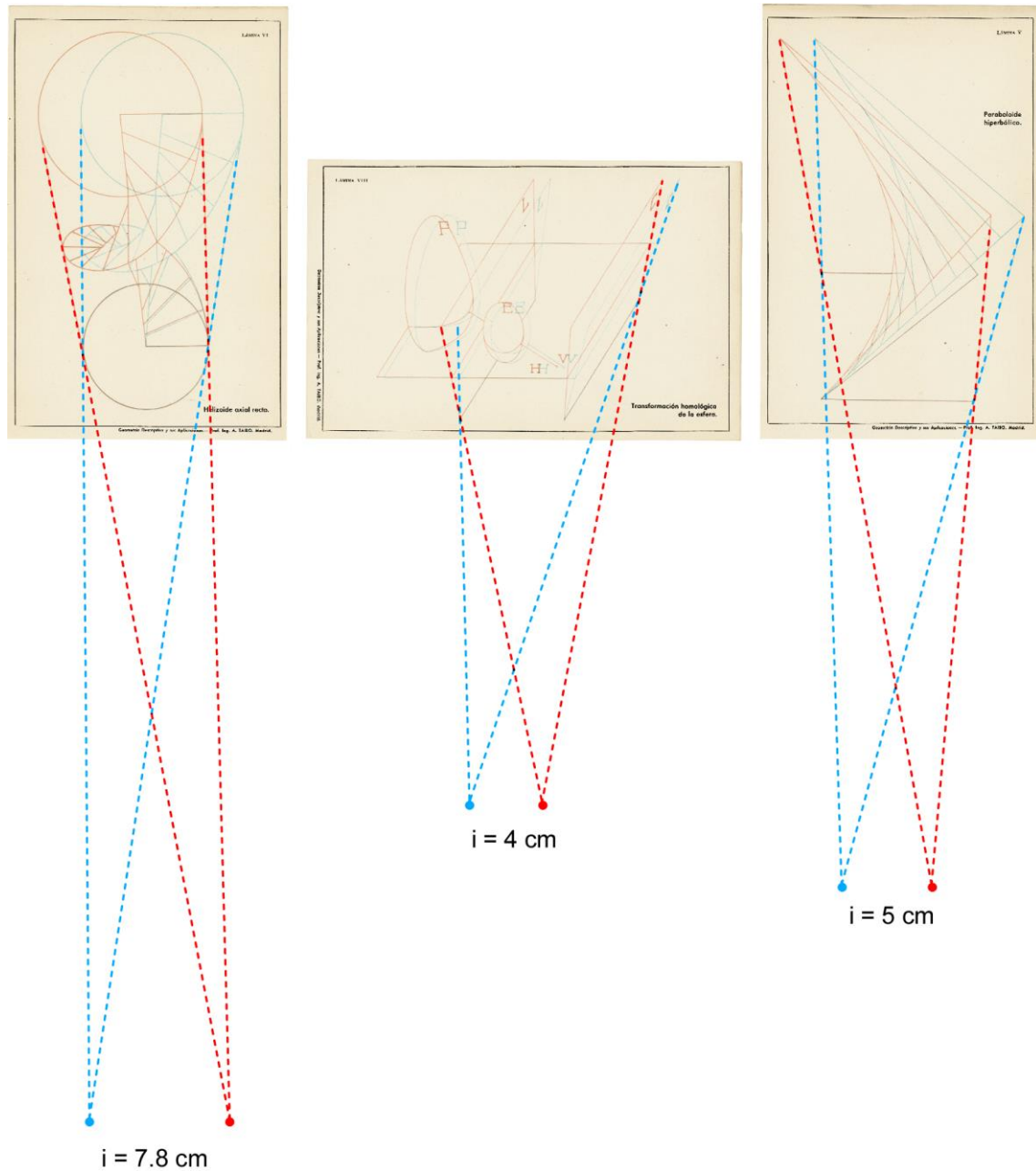


Fig. 14.43. Restitución de la posición del espectador en planta y de la distancia base de tres de las láminas del libro. Pedro Cabezos

Esta discordancia no significa que se hayan establecido unas condiciones distintas para cada lámina, sino que sugieren un cambio de escala de los dibujos a la hora de la impresión, hecho que resulta más evidente cuando se comparan, con precisión, los

grosos de línea, en los que se aprecian variaciones que justificarían el cambio de escala.

Para corroborar esta teoría, se ha efectuado un escalado de cada una de las láminas para recuperar el tamaño original de los dibujos (Fig. 14.44). El factor de escala ha sido calculado de modo que la distancia base restituida fuera igual a la distancia interpupilar media (6,5 cm). A falta de conocer la cota de los puntos de vista, por no disponer de datos para ello, al tomar como referencia el borde inferior de cada una de las láminas, parece claro que el autor habría considerado siempre las mismas condiciones de toma. En la parte superior de cada lámina se ha indicado el factor de escala aplicado, expresado en porcentaje.

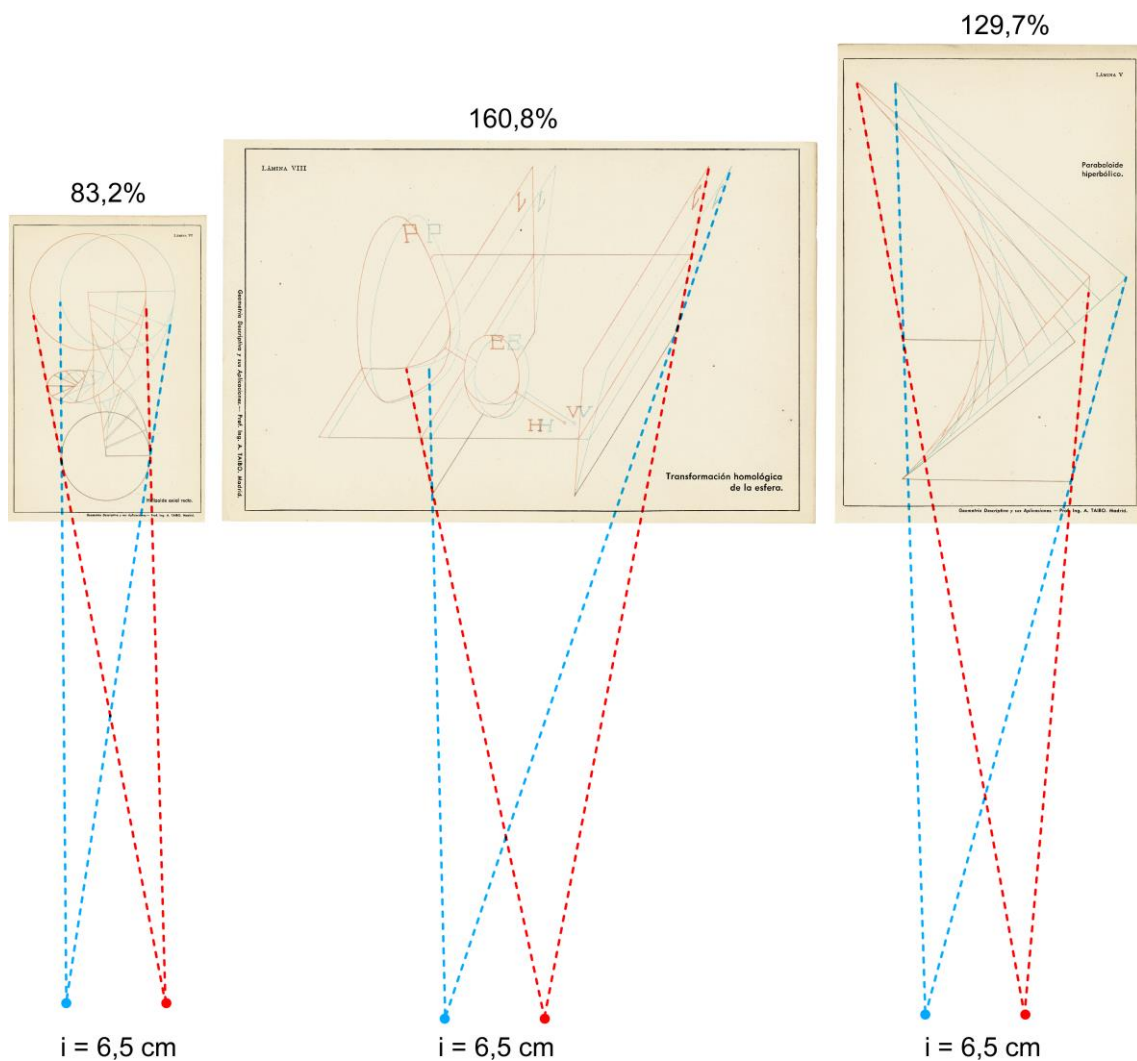


Fig. 14.44. Escalado de cada una de las láminas para igualar la base restituida con la distancia interpupilar media. Pedro Cabezos

El hecho de que las figuras no se visualicen con el tamaño adecuado lleva implícito distorsiones perceptivas, como ya vimos en el capítulo anterior, pero dada su magnitud pueden pasar inadvertidas al espectador.

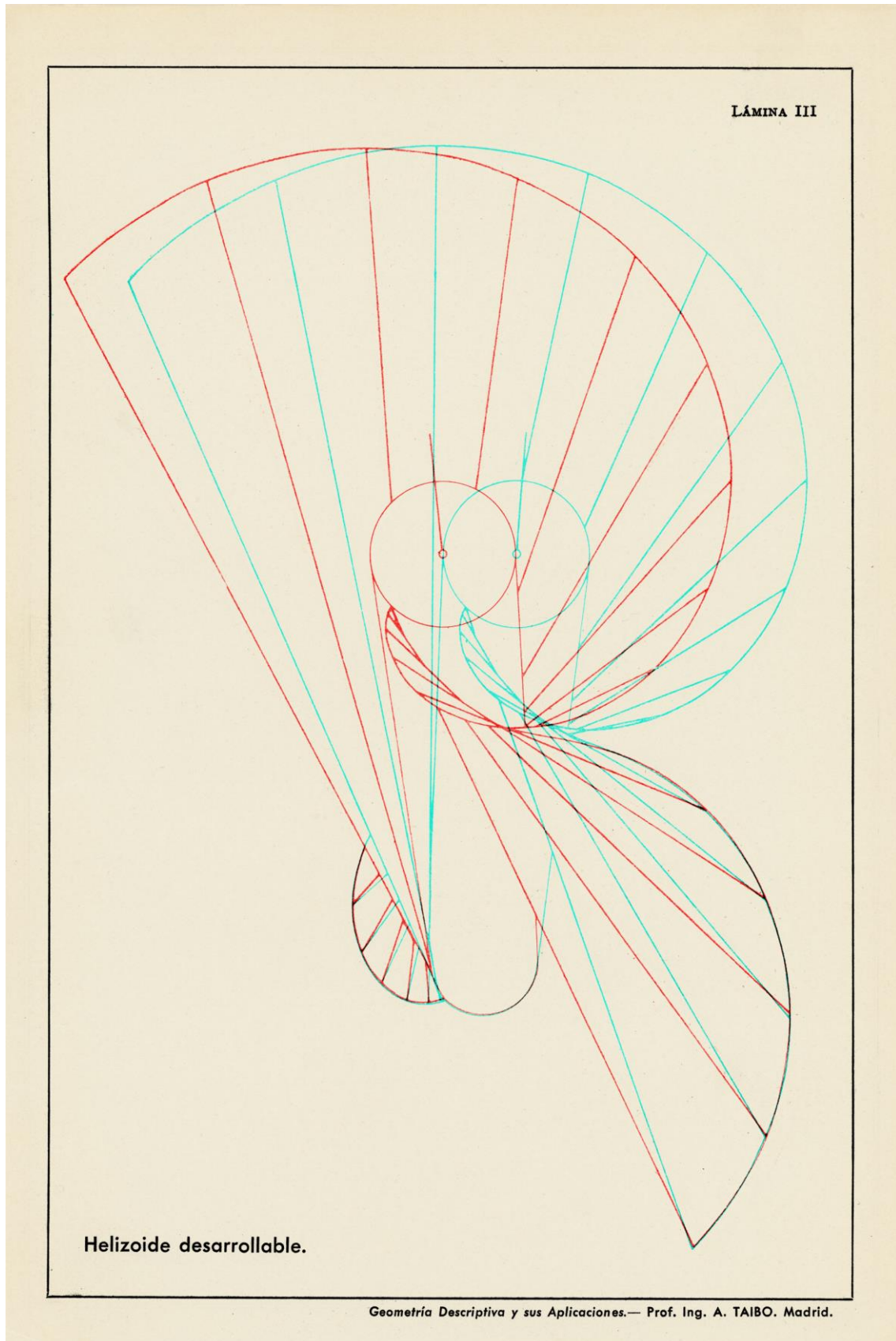



Fig. 14.45. Helicoide desarrollable. Tintas optimizadas. Adaptado de (Taibo, 1943) 

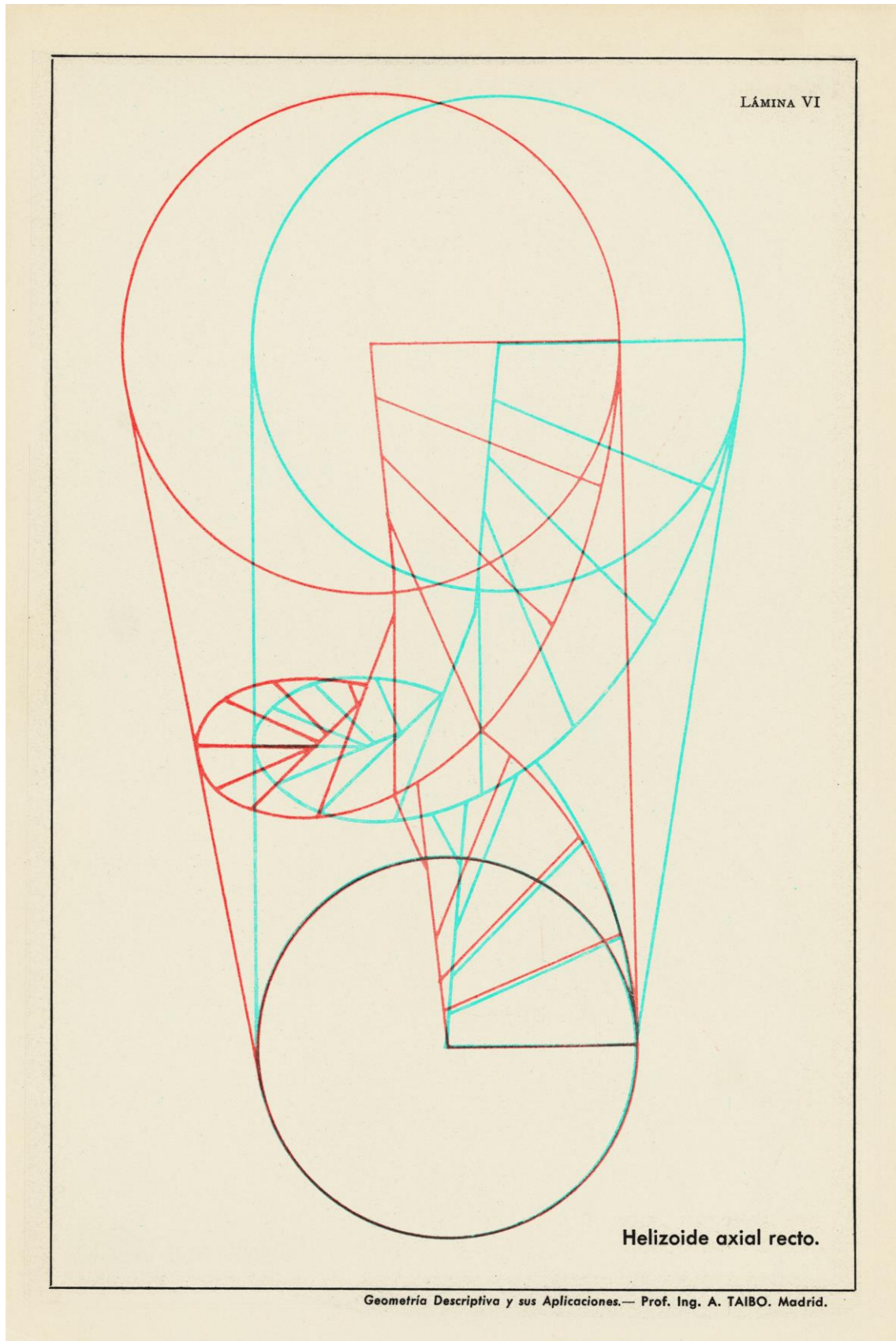



Fig. 14.46. Helicoide axial recto. Tintas optimizadas. Adaptado de (Taibo, 1943) 

14.2.7. John T. Rule. La practicidad americana

John T. Rule fue profesor de Geometría Descriptiva en el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Durante la década de los 40, ya mostraba figuras estereoscópicas a sus alumnos mediante el innovador sistema de luz polarizada *Vectograph*, desarrollado por Polaroid. Rule había escrito en 1938 un artículo sobre dibujos estereoscópicos (Rule, 1938), que incluye, con ligeras modificaciones, en el apéndice III de su libro *Descriptive Geometry*, publicado en 1946, junto con su compañero Earle F. Watts.

En apenas 20 páginas, Rule ofrece al lector una visión muy práctica y clara del problema estereoscópico, empezando por aclarar que las condiciones de visualización determinan la construcción de las imágenes del par y que una trasgresión de escala o paralaje induce a distorsiones perceptivas. También expone el procedimiento clásico para dibujar una proyección cónica a partir de las proyecciones ortogonales de la figura, pero propone un interesante método para construir la segunda perspectiva. Dado que en un par estereoscópico los puntos homólogos tienen una diferencia de paralaje horizontal, bastará determinar el paralaje para poder situar los puntos de la segunda perspectiva, a partir de la primera. Para ello construye la curva de separación mediante el sencillo procedimiento gráfico que muestra la Fig. 14.48.

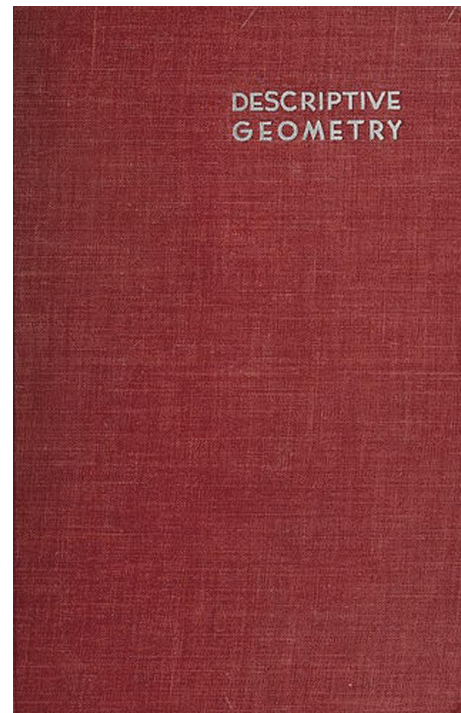


Fig. 14.47. Watts & Rule, 1946, *Descriptive Geometry*

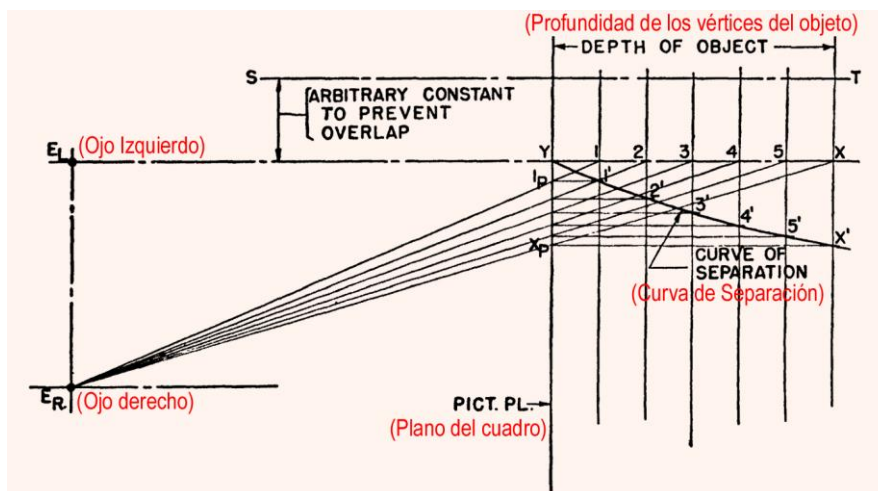


Fig. 14.48. Curva de separación para determinar el paralaje entre puntos homólogos. (Watts & Rule, 1946)

Con la curva se puede obtener la segunda perspectiva tal como muestra la Fig. 14.49.

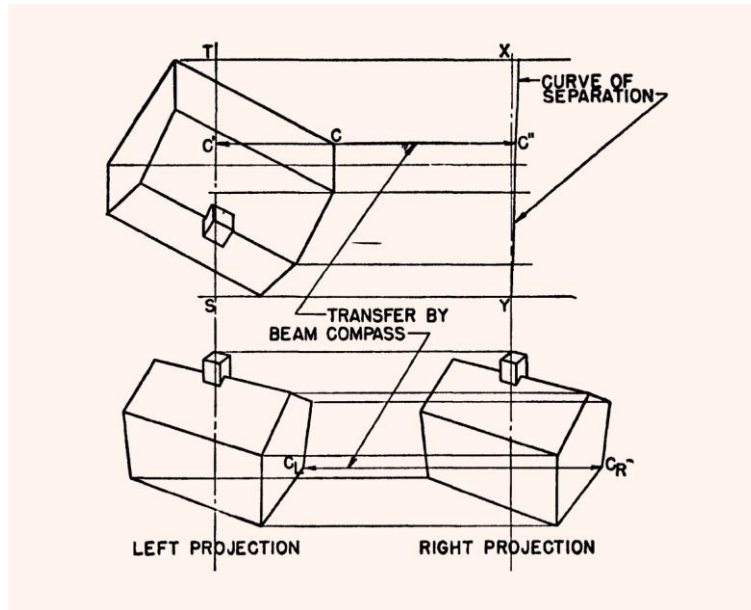


Fig. 14.49. Construcción de la segunda perspectiva mediante la curva de separación (Watts & Rule, 1946)

Rule también idea y patenta en 1939 un aparato para dibujar figuras estereoscópicas, a partir de un modelo real al que se hace referencia mediante un brazo telescópico articulado (Fig. 14.50).

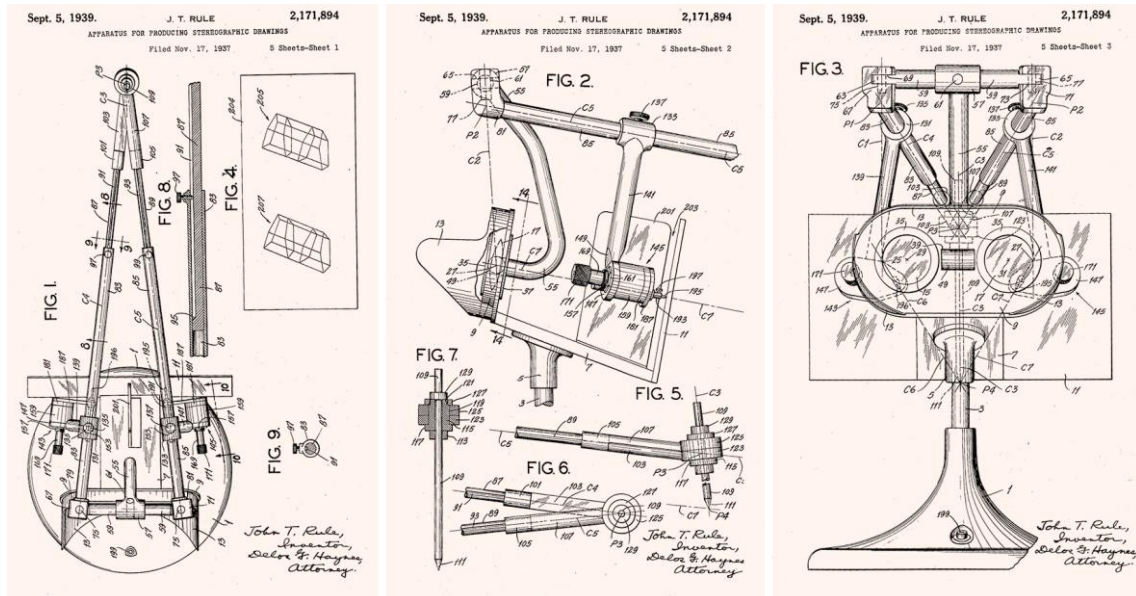


Fig. 14.50. John T. Rule, 1939, Patente US2171894A de aparato para producir imágenes estereoscópicas

En el libro sólo aparecen tres figuras estereoscópicas muy sencillas, de una pirámide y una esfera. Con ellas Rule quiere hacer entender que la corporeidad de las superficies planas se percibe bien mediante sus aristas de contorno, pero, en el caso de superficies curvas, su volumen estereoscópico no quedaría definido sólo por su

contorno aparente, sino que se deben incluir más líneas de la superficie para concretarlo, tales como generatrices, en el caso de cono y cilindro, o paralelos y meridianos, en el caso de la esfera.

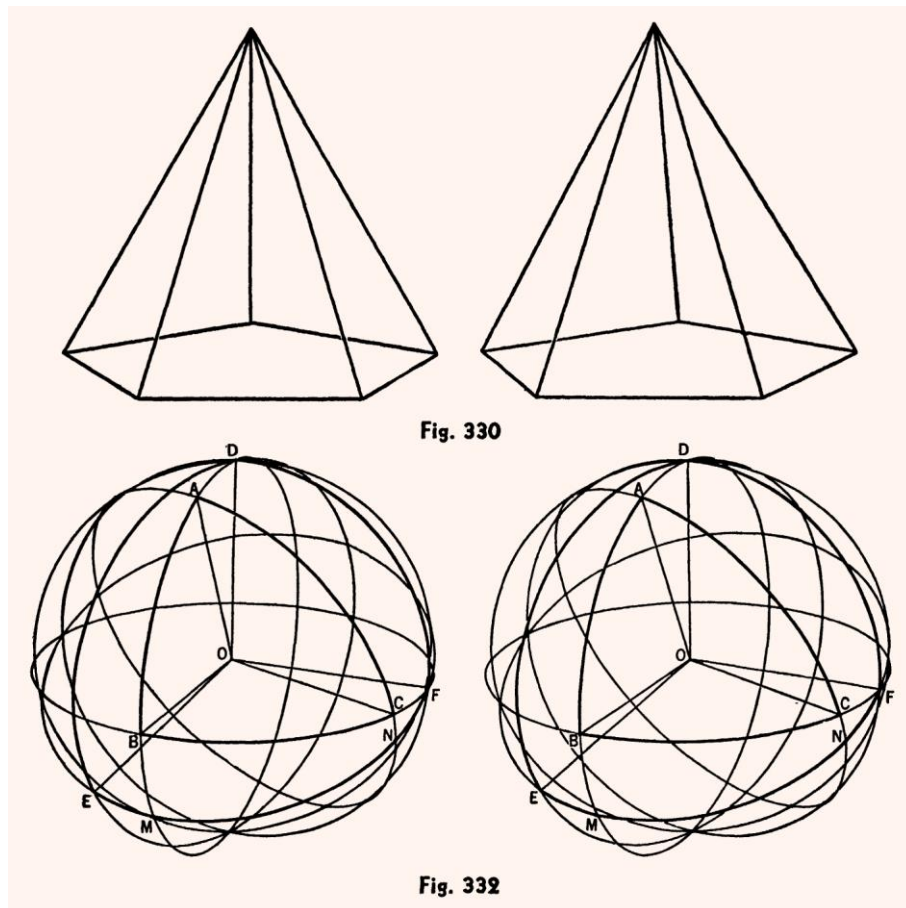


Fig. 14.51. Figuras estereoscópicas de pirámide y esfera (Watts & Rule, 1946)

Entre las recomendaciones prácticas que proporciona Rule, se encuentra la de evitar posiciones de la figura que den lugar a planos vistos de canto, pues ello dificulta el emparejamiento con sus homólogos en la otra vista, así como evitar los errores de alineación que pudieran provocar paralajes con componente vertical.

También proporciona unas pautas acerca de la valoración y representación de las líneas ocultas, en las que dice que si éstas se representan con un grosor de línea menor, las superficies tienden a percibirse como semitransparentes e indica que él prefiere que se perciban como totalmente transparentes, es decir, utilizando el mismo tipo de línea (Fig. 14.51), o bien, que las superficies se perciban totalmente opacas, al prescindir de las líneas ocultas.

14.2.8. Ernst Schörner, el continuador de la escuela alemana

Ernst Schörner (1910-1994), fue profesor del Oskar Von Miller Polytechnikum de Berlín y sustituyó a C. Calov, coautor de *Mathematische Raumbilder*, en el Ministerio de Aviación, tras su muerte repentina.

Schörner publicó tres libros de geometría con anaglifos, su primera obra es una colección de 4 cuadernillos denominada *Mathematische Plastoskop-Modelle*, publicados en 1948, en un formato similar a las láminas de los hermanos Gliozzi, es decir, como un apoyo a las nociones geométricas que se estudiaban en la escuela, pero con al estilo heredado de *Mathematische Raumbilder*.

Sus otros dos libros, (Schörner, 1960) y (Schörner, 1977), abarcan un temario teórico más amplio con anaglifos que están muy en la línea de los que aparecen en esta primera obra, pero con ligeras diferencias estilísticas y cambios en el proceso de impresión que comprobaremos más adelante.

Cada cuadernillo de *Mathematische Plastoskop-Modelle* tenía unas 15 láminas con anaglifos anamórficos. Las gafas que trae el cuadernillo tiene un tamaño de los filtros un tanto reducido y puede resultar algo incómodo mirar a través del hueco tan limitado, pero el filtrado que proporcionan es muy bueno (Fig. 14.53).

El autor utiliza un color de fondo parecido al de su predecesor alemán, pero se produce un desequilibrio entre los contrastes, debido al bajo nivel que se alcanza con el filtro rojo, lo que entorpece la percepción del relieve. Esto podría deberse a una decoloración de la tinta cian debida al paso del tiempo, por lo que es muy probable que este problema no se presentara en su estado primigenio.

Un detalle que resulta muy acertado de este libro es el esquema estereoscópico que proporciona el autor para definir las condiciones de visualización de las láminas; en él se establece que la separación de los ojos con respecto al borde inferior de la lámina debe ser de 250 mm y la altura de 320 mm (Fig. 14.54).

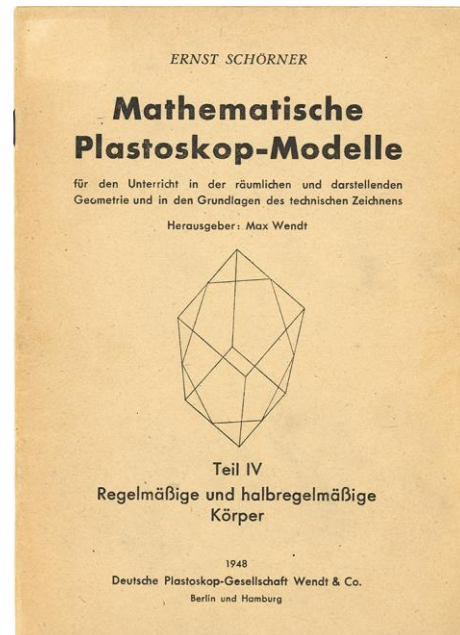


Fig. 14.52. Ernst Schörner, 1948 *Mathematische Plastoskop-Modelle*

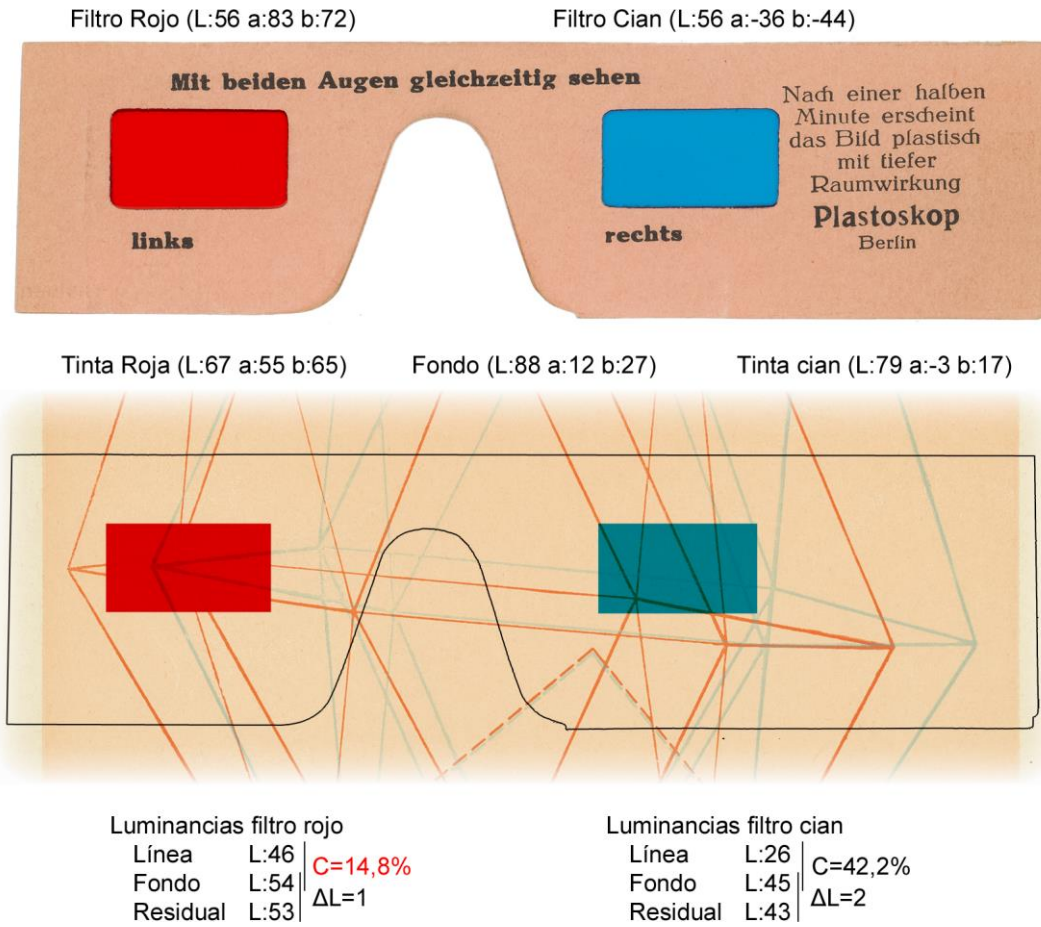


Fig. 14.53. Análisis colorimétrico y de filtrado con las gafas originales. Pedro Cabezos

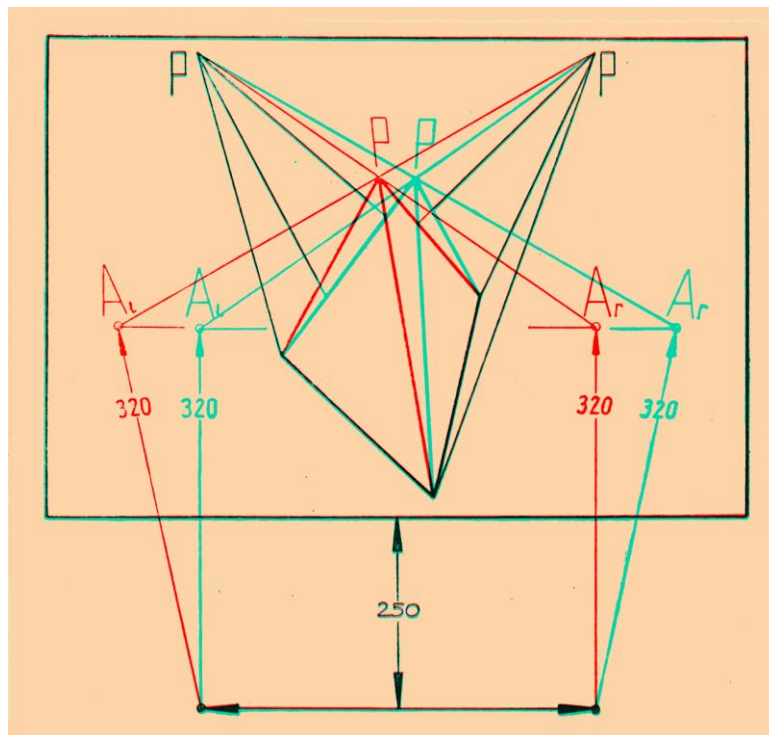


Fig. 14.54. Condiciones de visualización (Schörner, 1948)

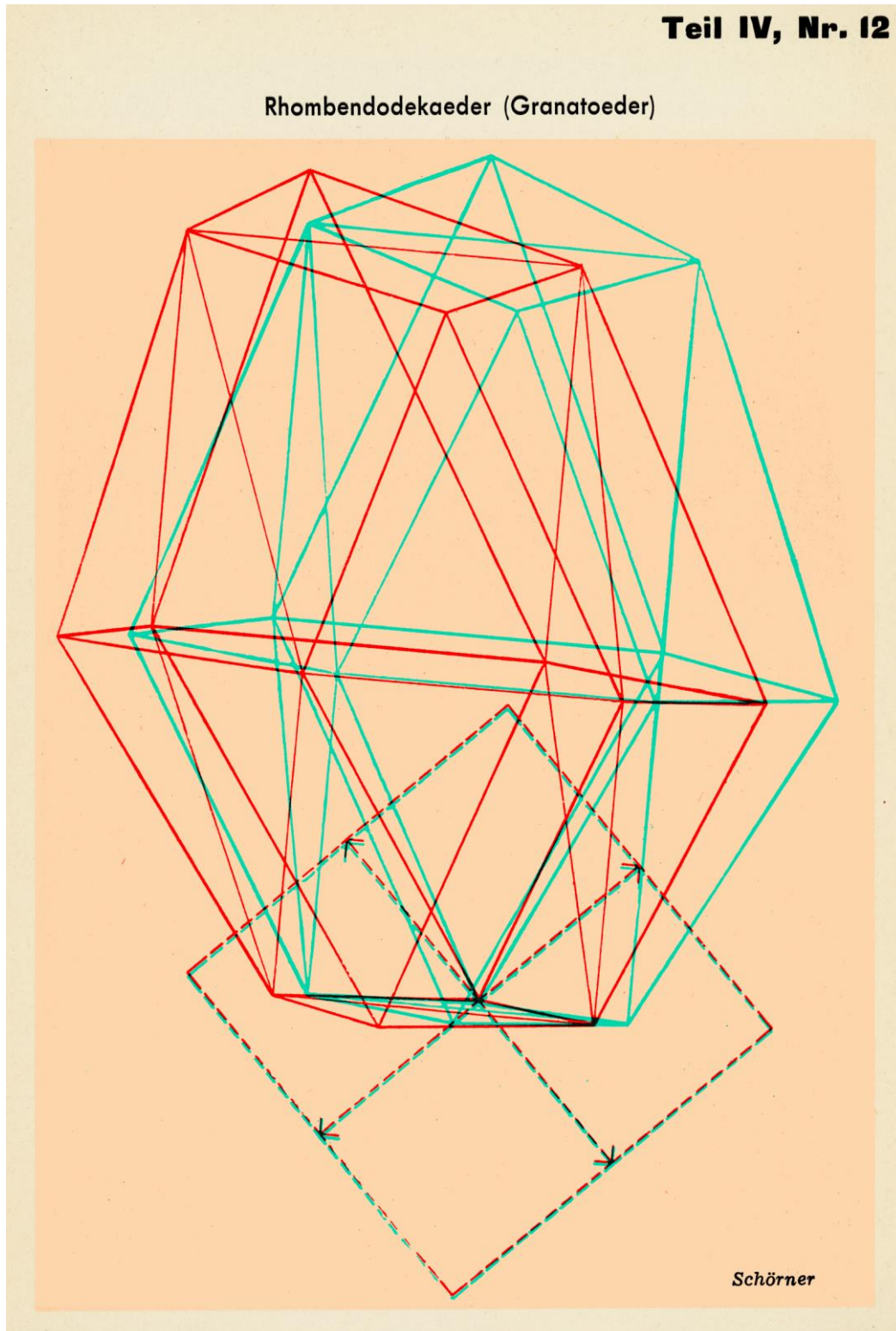


Fig. 14.55. Lámina original representando un Rombododecaedro.
Tintas optimizadas. Adaptado de (Schörner, 1948)



Los puntos de vista de los dibujos se corresponden con las condiciones de visualización establecidas y la precisión de los dibujos es bastante buena. En algunas

láminas se utilizan líneas a trazos para representar las líneas ocultas, pero esto puede dificultar la visión del relieve si los trazos no se corresponden en ambas imágenes. El paralaje se mantiene dentro de los límites de confort en 10 de las figuras (71,4%). Schörner evoluciona estilísticamente en *Raumbil-Lehrbuch der Darstellenden Geometrie*, publicada en 1960, que contiene 60 anaglifos anamórficos, con las mismas condiciones de visualización que su obra anterior.

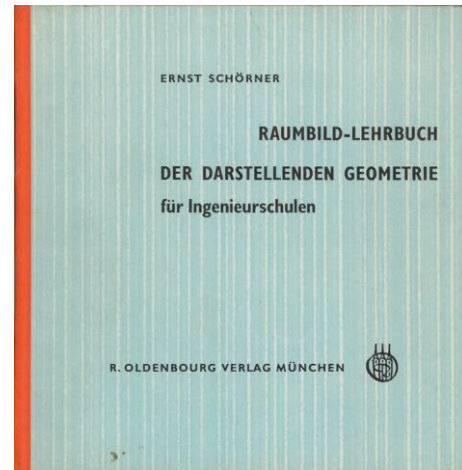


Fig. 14.56. Ernst Schörner, 1960 *Raumbil-Lehrbuch der Darstellenden Geometrie*

El color de fondo empleado en esta publicación es bastante singular, pues se trata de un color violáceo oscuro que produce un efecto de luminosidad invertida en los trazos, proporcionando un filtrado bien contrastado y sin *ghosting* visible.

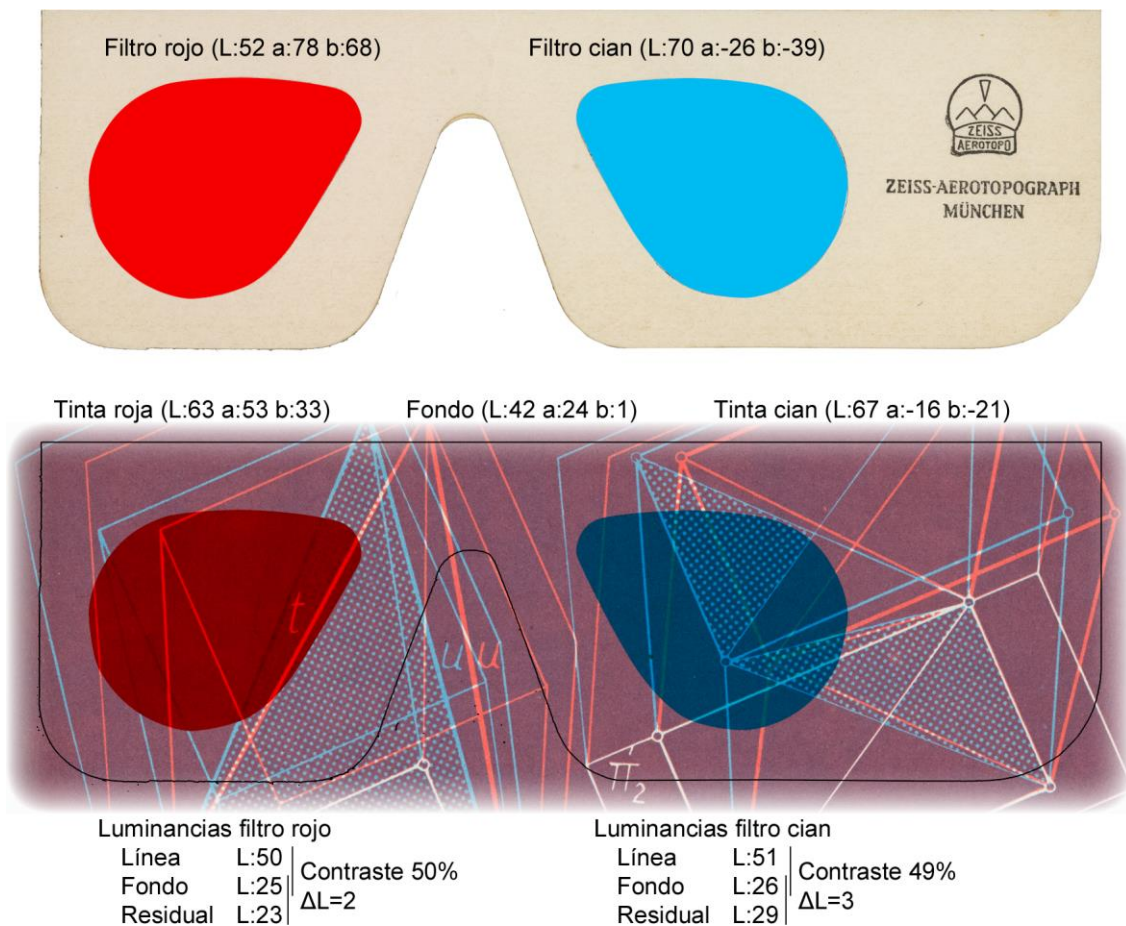


Fig. 14.57. Análisis colorimétrico de las láminas y del filtrado de las gafas originales. Pedro Cabezos

Schörner cuida mucho la valoración de la línea y utiliza tramas de puntos para destacar algunas superficies. Estas tramas sólo se dibujan en una de las imágenes del

par, a pesar de ello, pueden percibirse en el espacio gracias a las líneas de contorno que las delimitan. Un detalle sutil, pero elegante, es la manera de representar los vértices singulares con un trazo circular, cuyo vacío interior materializa el propio vértice. En el apartado del confort, 47 de las figuras cumplen los límites (78,3 %).

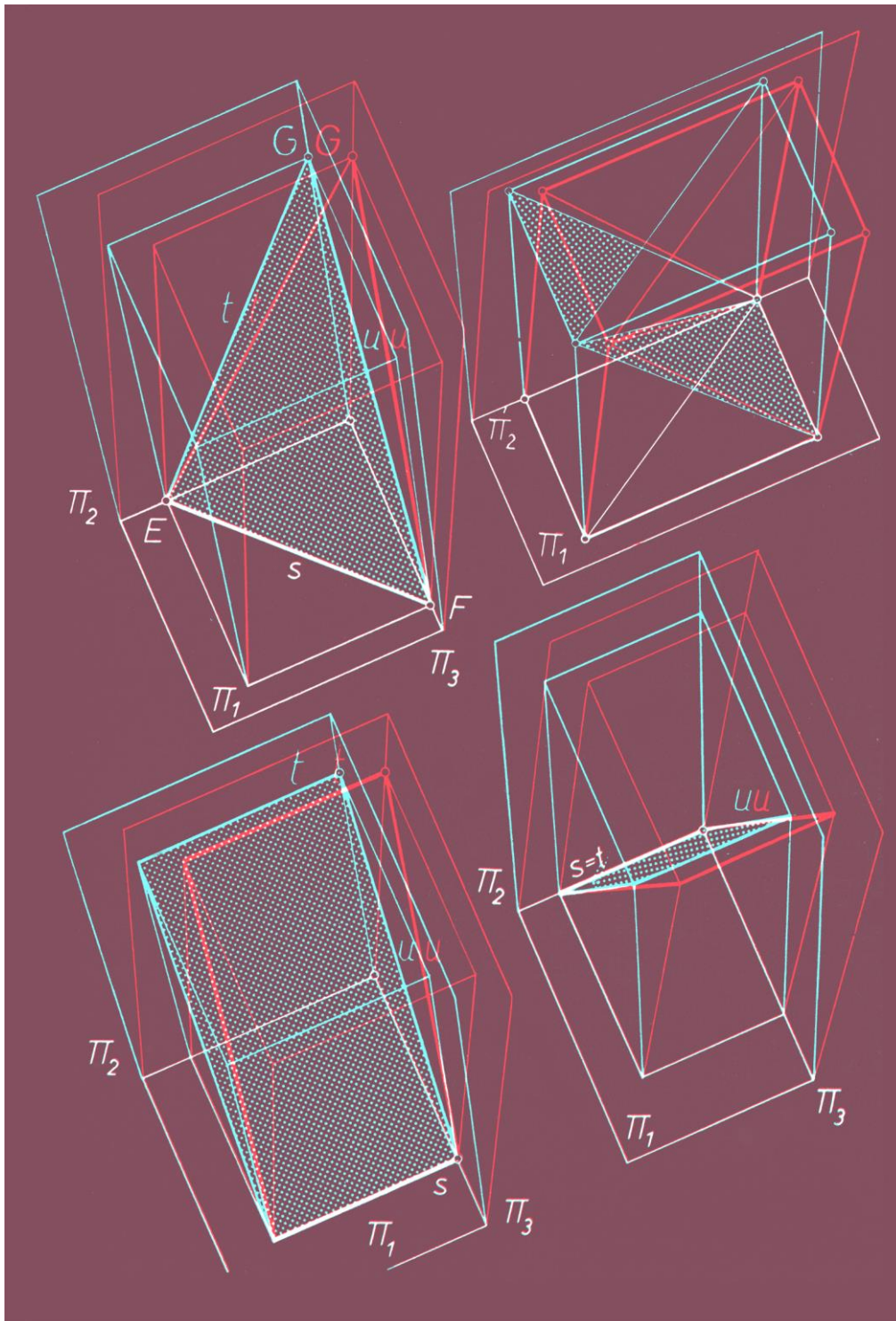



Fig. 14.58. Lámina original que representa las distintas posiciones de un plano en el espacio
Tintas optimizadas. Adaptado de (Schörner, 1960) 

Schörner, publica en 1977, su tercera obra titulada *Darstellende Geometrie Konstruktionsgrundlagen für Studium und Praxis*, con 60 anaglifos anamórficos, muchos de ellos repetidos de su obra anterior. En esta publicación se opta por cambiar el sistema de filtrado de las gafas por una combinación de filtros rojo/verde, lo que les obliga a realizar una ligera variación en los colores de las tintas, pero mantiene el color de fondo anterior.



Fig. 14.59. Ernst Schörner, 1977, *Darstellende Geometrie Konstruktionsgrundlagen für Studium und Praxis*

Este cambio produce un ligero aumento en el contraste, pero a costa de producir *ghosting* a través del filtro rojo. Pese a que el valor de ΔL es bastante alarmante, el color oscuro del fondo permite que éste sea tolerado sin menoscabar el efecto de relieve.

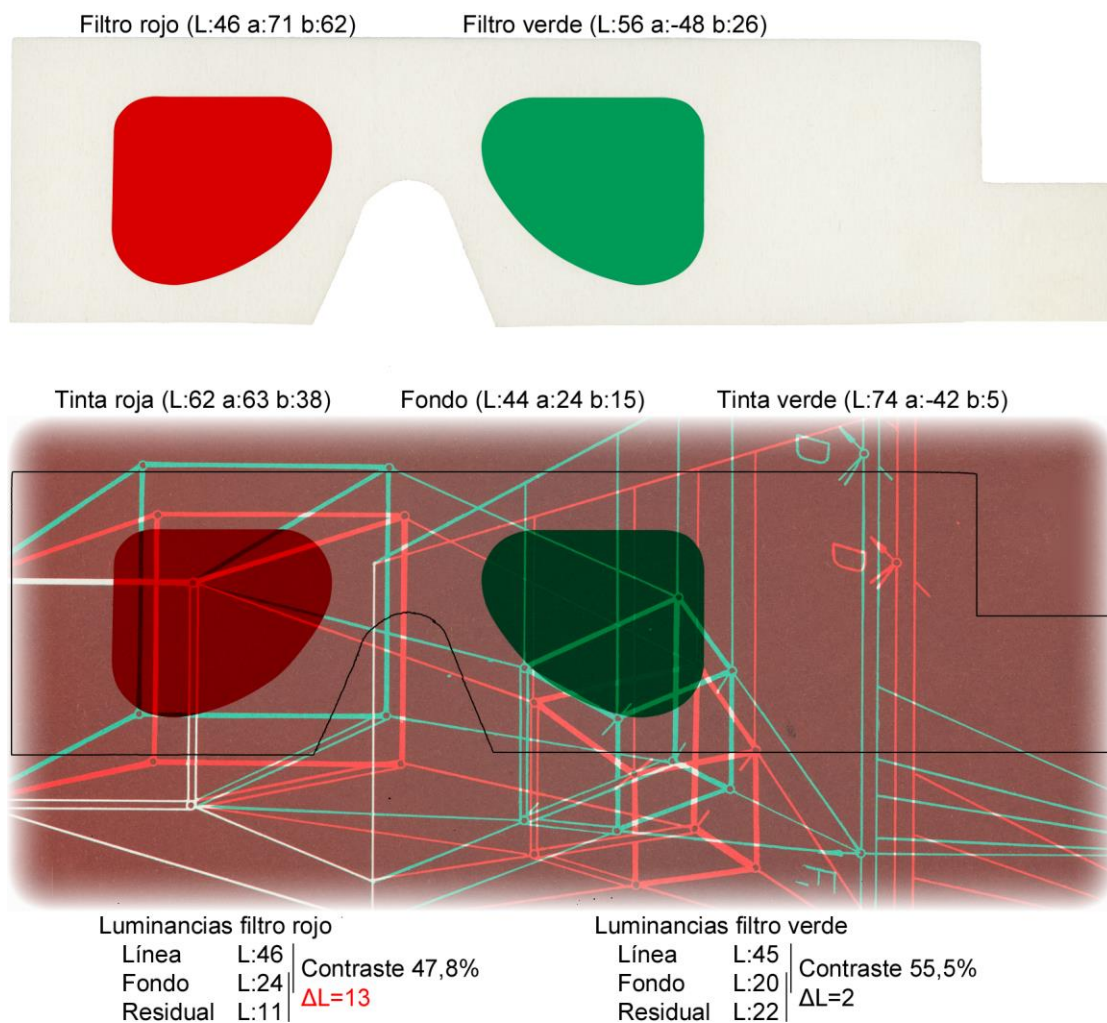


Fig. 14.60. Análisis colorimétrico de las láminas y del filtrado de las gafas originales. Pedro Cabezos

El paralaje se mantiene dentro de los límites de confort en 51 de las figuras (85 %).

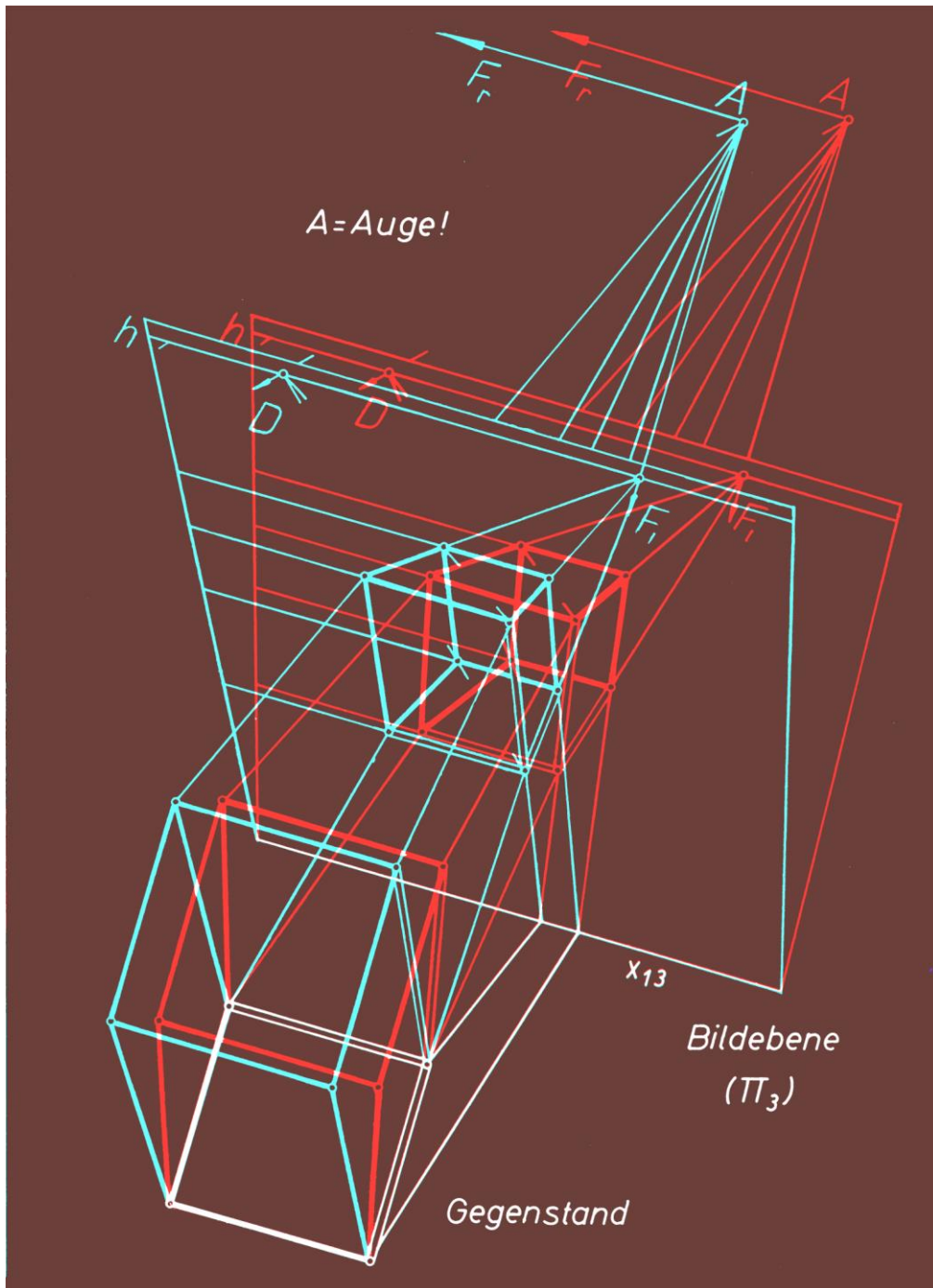


Fig. 14.61. Elementos de la perspectiva cónica. Tintas optimizadas. Adaptado de (Schörner, 1977)



14.2.9. Geometría Descriptiva con figuras estereoscópicas de Imre Pál

El profesor húngaro Imre Pál, publicó en 1959 la primera edición de su libro de Geometría Descriptiva titulado *Térláttatós ábrázoló mértan*, escrito en su lengua natal, posteriormente traducido al castellano, inglés, alemán, francés, eslovaco y ruso, convirtiéndose así en el libro de geometría con anaglifos más difundido de la historia. La versión tomada para el análisis ha sido la española, publicada en 1965 con el título *Geometría Descriptiva con figuras estereoscópicas*, adaptada por Julio Porcel Monleon.

Se trata de un completo manual de Geometría Descriptiva perfectamente ilustrado con 205 figuras estereoscópicas anamórficas. El autor comienza con una brevísimas reseña de los fundamentos de la visión estereoscópica mediante la técnica de los anaglifos y, a continuación, define las condiciones de visualización óptimas.

Un punto muy positivo del libro es que las figuras suelen tener un tamaño reducido, lo que provoca paralajes muy contenidos, casi siempre dentro de los límites de confort (98%). Otro aspecto destacable es que todas las figuras que aparecen en una misma página están realizadas para verse desde la misma posición, lo que evita distorsiones perceptivas en las figuras.

Este libro supuso un enorme esfuerzo gráfico, por la complejidad y la precisión con la que han sido realizadas sus innumerables figuras estereoscópicas, pero es un claro ejemplo de lo que puede suceder cuando el medio de reproducción falla y arruina el trabajo realizado. Por desgracia, la combinación tinta/filtros no fue la más acertada y el efecto de relieve queda empañado por el marcado efecto *ghosting*, que puede verse a través del filtro verde. Este no es un problema que pueda achacarse a la decoloración por el paso del tiempo, puesto que mi querido profesor de Geometría Descriptiva Don Felipe Soler Sanz, a quien

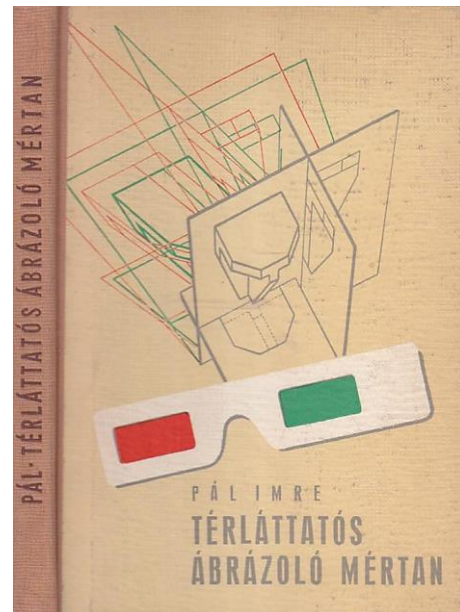


Fig. 14.62. Pál, Imre, 1959, *Térláttatós ábrázoló mértan*

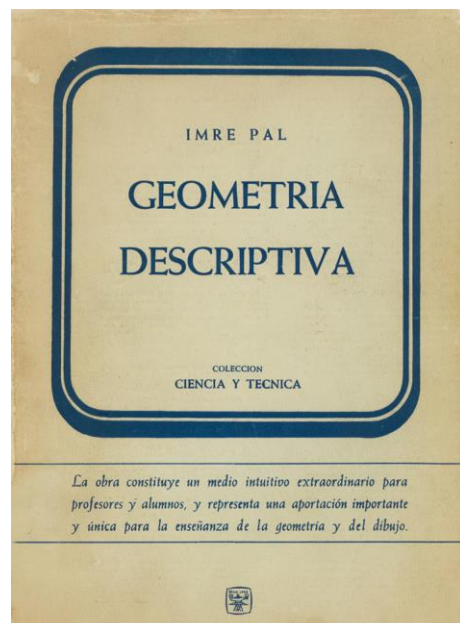


Fig. 14.63. Pál, Imre, 1965, adaptación al castellano de Julio Porcel Monleon

pertenece el libro, me comentó que, de nuevo, este efecto era todavía más notorio y que como el libro traía dos pares de gafas, se podía disminuir el *ghosting* al superponer ambas gafas de modo que se duplicara el filtro verde.

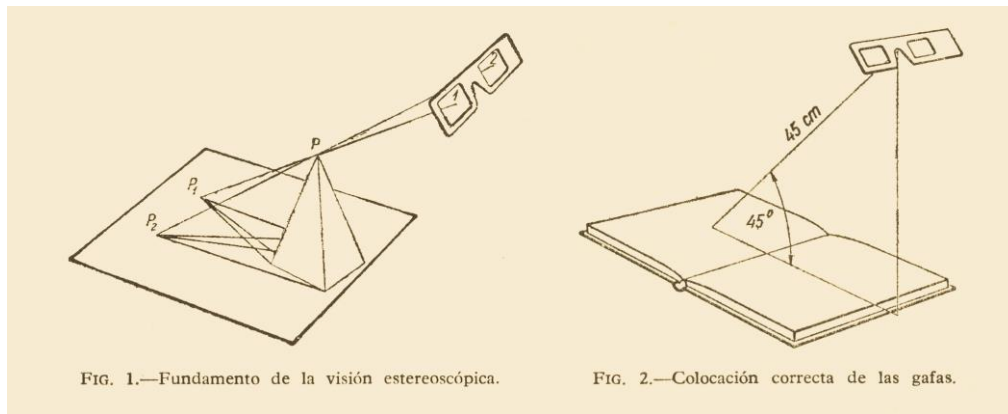


Fig. 14.64. Esquemas de restitución visual y definición de las condiciones de visualización (Pál, 1965)

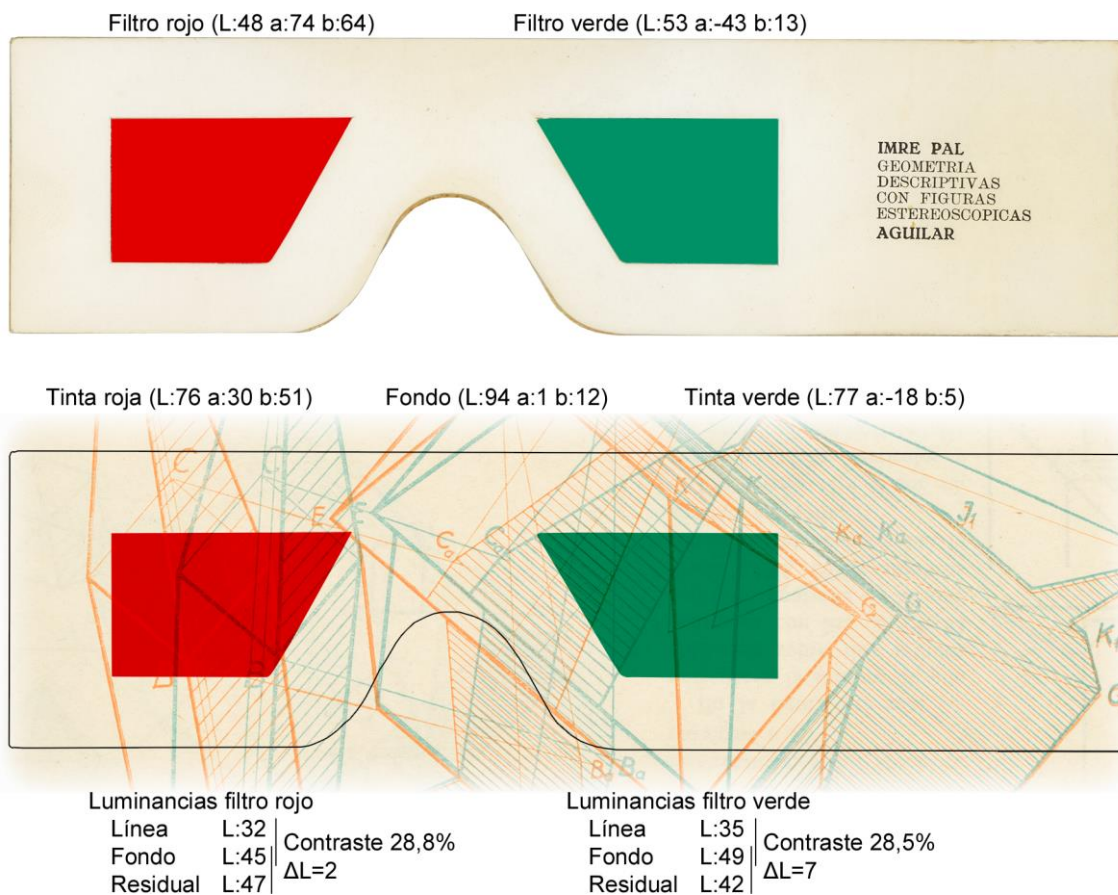


Fig. 14.65. Análisis colorimétrico de las láminas y del filtrado de las gafas originales. Pedro Cabezos

El análisis colorimétrico corrobora con cifras la impresión subjetiva del *ghosting*, proporcionando un valor $\Delta L = 7$, para el filtro verde. Además se pone de manifiesto que el contraste, aunque equilibrado, resulta algo pobre y resta viveza al efecto estereoscópico.

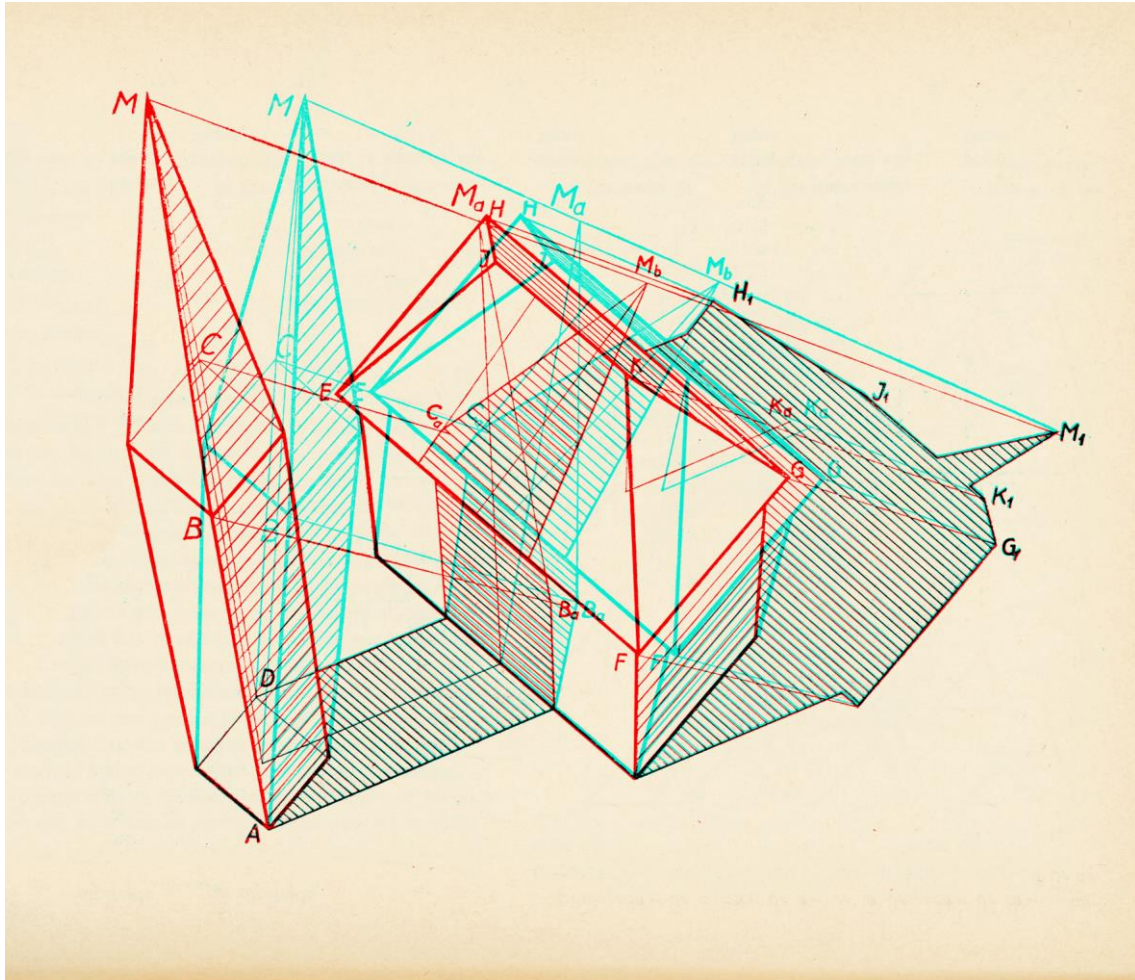



Fig. 14.66. Figura original con tintas optimizadas. Adaptado de (Pál, 1965) 

Imre Pál, realizó también los anaglifos del libro *Reguläre Figuren*, publicado en 1965 por su compatriota el matemático y geómetra László Fejes Tóth. Se trataba de 12 láminas independientes, anexadas al final del libro, que son de una calidad gráfica encomiable.

Es curioso que el autor de este libro no hiciera referencia alguna a las condiciones de visualización. Tras realizar un estudio gráfico para la restitución geométrica de los puntos de vista, he podido comprobar que el espectador debía colocarse a 24 cm del borde inferior de la hoja y a 32 cm de altura, lo que se corresponde con las condiciones de visualización que Pál había utilizado previamente.

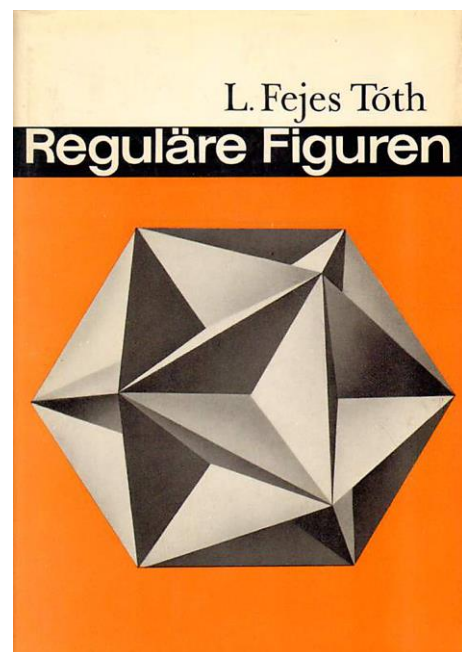


Fig. 10.67. László Fejes Tóth *Reguläre Figuren*

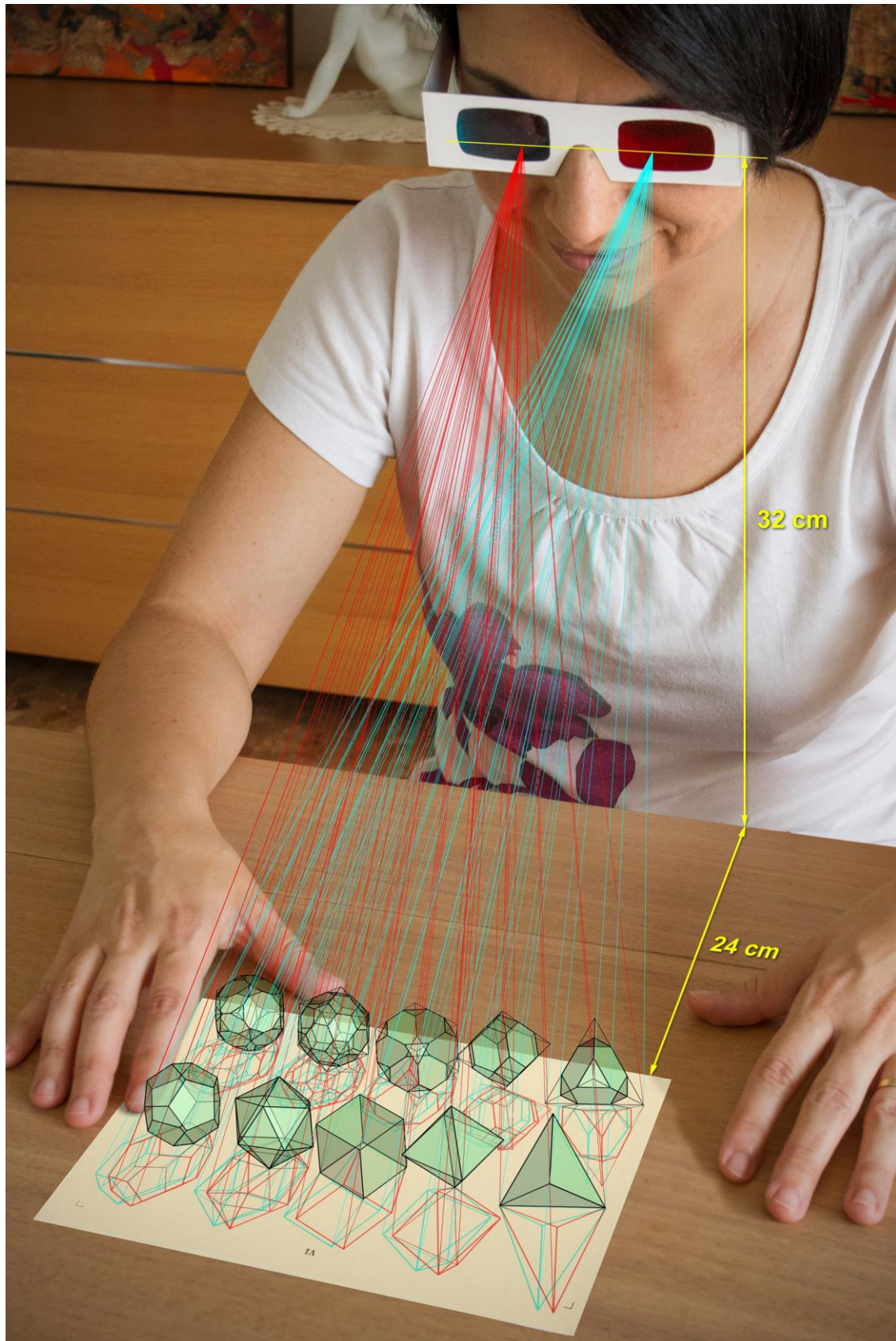


Fig. 14.68. Simulación de los modelos percibidos sobre una de las láminas originales de (Tóth, 1965) y situación idónea del espectador para evitar distorsiones. Pedro Cabezos

A continuación, se muestra la lámina mostrada en el esquema anterior, que se ha girado 90°, para no alterar su tamaño original, por lo que el espectador debe colocarse mirando frente al borde lateral derecho y a la distancia que se ha definido previamente.

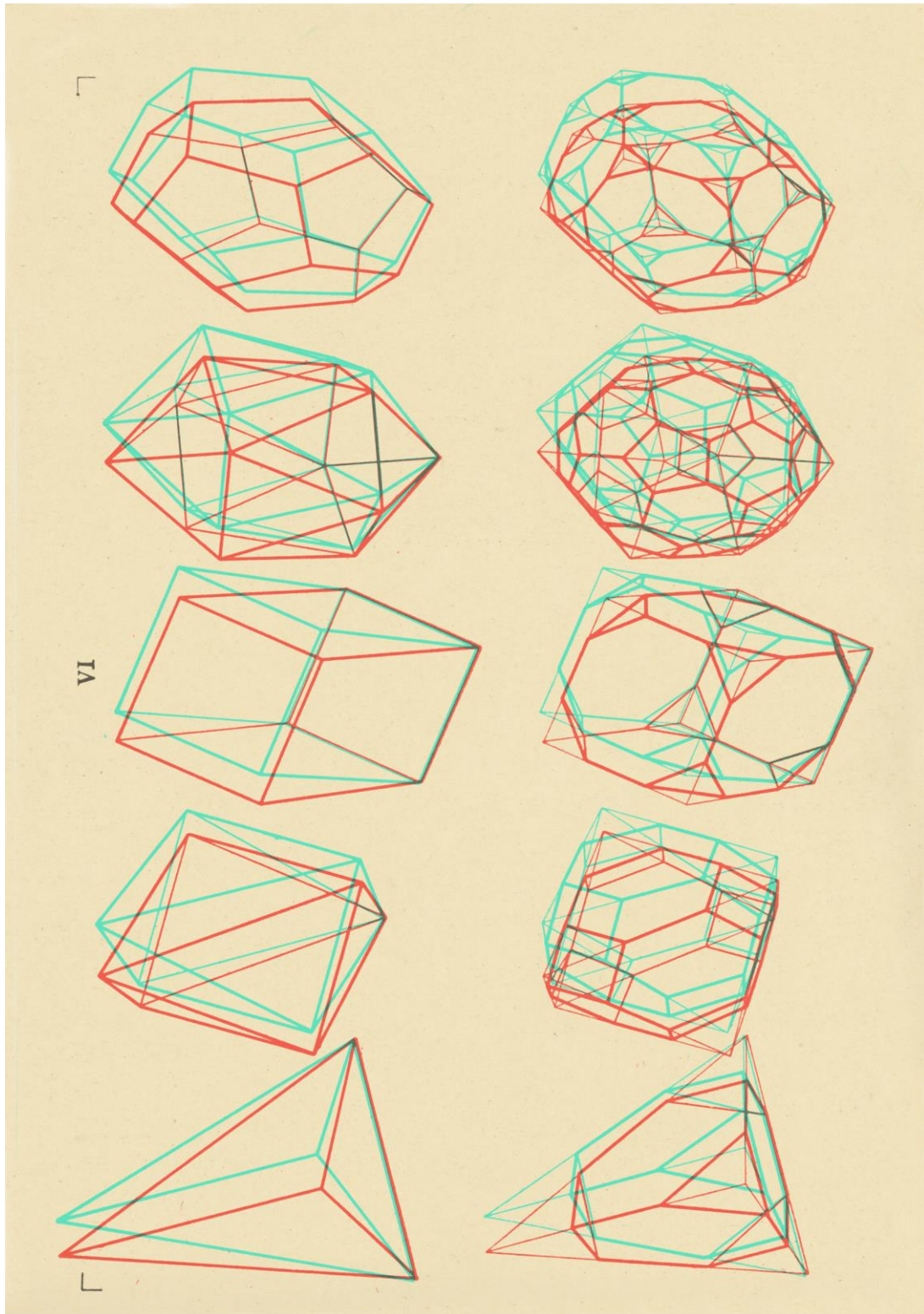


Fig. 14.69. Poliedros regulares y semiregulares con tintas optimizadas. Adaptado de (Tóth, 1965)



14.2.10. Las publicaciones de Helmut Mucke

Helmut Mucke, otro de los representantes de la escuela alemana, publica en 1961, *Anaglyphen zur Darstellenden Geometrie*, su primer libro ilustrado con anaglifos. Se trata de un conjunto de 28 figuras anamórficas en las que se presentan en el espacio diversos modelos geométricos y sus proyecciones ortogonales sobre un diedro.

El libro viene acompañado de un cuadernillo anexo, escrito por Hans Simon, en donde se explica sucintamente las características geométricas de cada una las figuras.

Las condiciones de visualización se expresan de forma muy parecida a sus predecesoras, especificando la altura de los ojos con respecto al papel, que es de 30 cm, y la separación con respecto al borde inferior de la lámina que en la mayoría de las láminas equivale a 20 cm, mientras que en otras laminas especificadas en el texto, equivale a 24 cm.

Esta obra conserva el rigor geométrico de sus compatriotas y los dibujos se corresponden exactamente con las condiciones establecidas por el autor. Además de ello, el paralaje se mantiene dentro de los límites de confort establecidos para sus distancias de observación, excepto en una de las figuras (96,5%).

Por desgracia, no se consigue reproducir correctamente el efecto estereoscópico por falta de contraste en el filtro rojo (11,3%). El estudio colorimétrico revela unos valores de contraste bajos y unos colores para las tintas que, lejos de ser complementarios, pertenecen a una misma familia de tonos anaranjados, uno de ellos muy intenso y próximo a los rojos, y el otro, poco saturado y bastante claro, que a simple vista aparenta ser un gris, por estar rodeado del color de fondo anaranjado. Todo ello apunta a un problema de decoloración de las tintas originales,

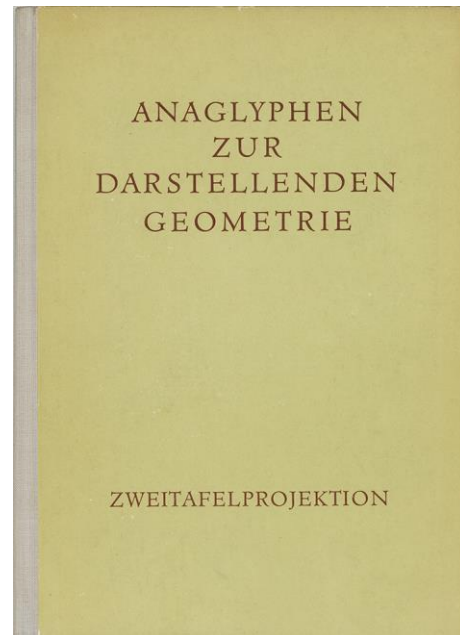


Fig. 14.70. Helmut Mucke, 1961, *Anaglyphen zur Darstellenden Geometrie*

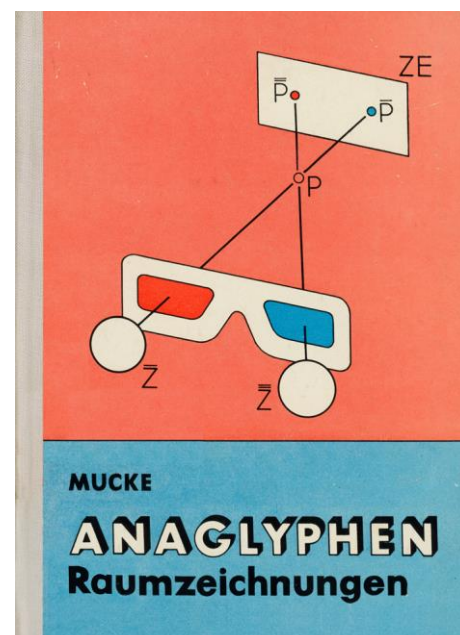


Fig. 14.71. Helmut Mucke, 1970, *Anaglyphen Raumzeichnungen*

por el paso del tiempo. Por fortuna, la optimización de las tintas que se ha realizado, nos permitirá valorar el efecto tridimensional logrado por sus dibujos

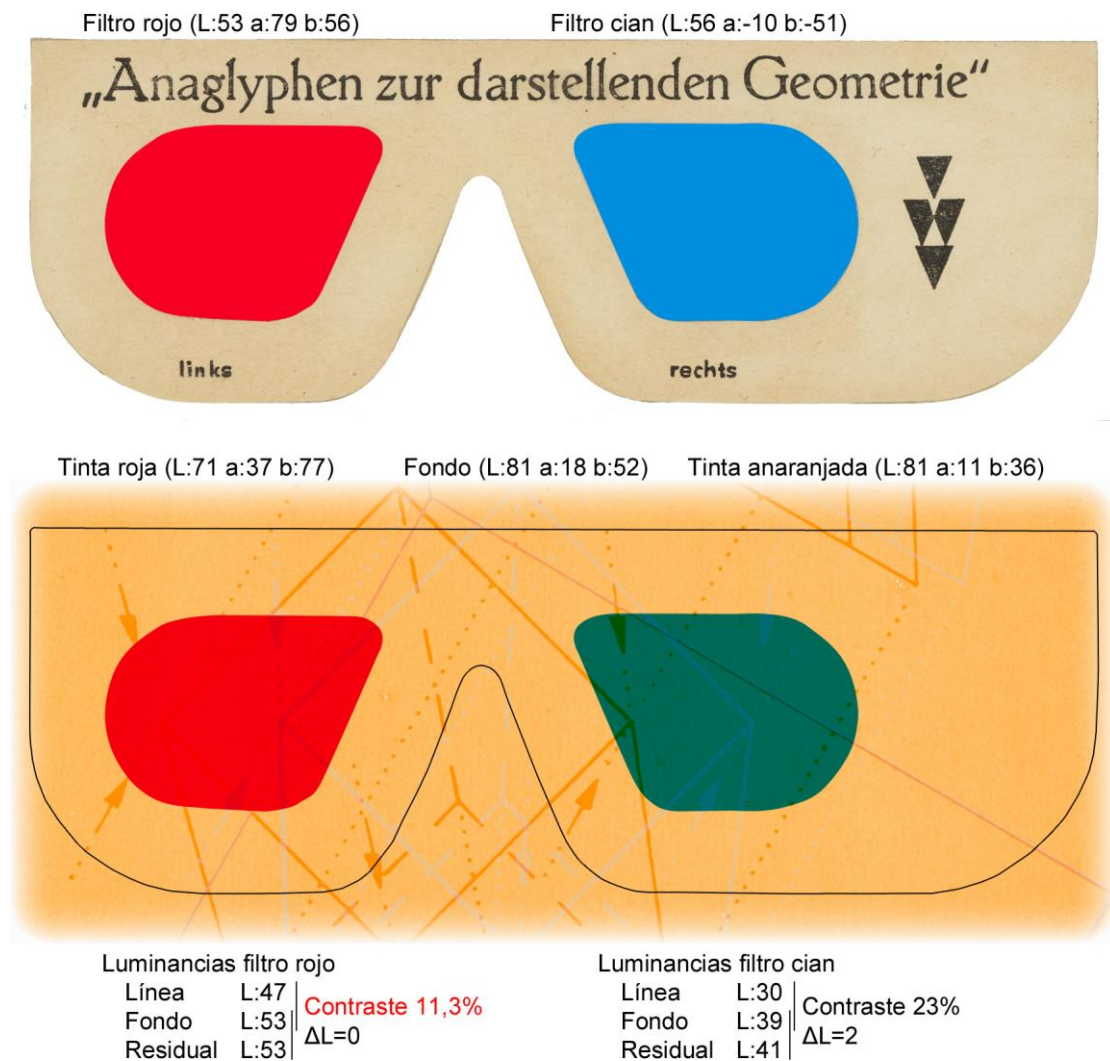


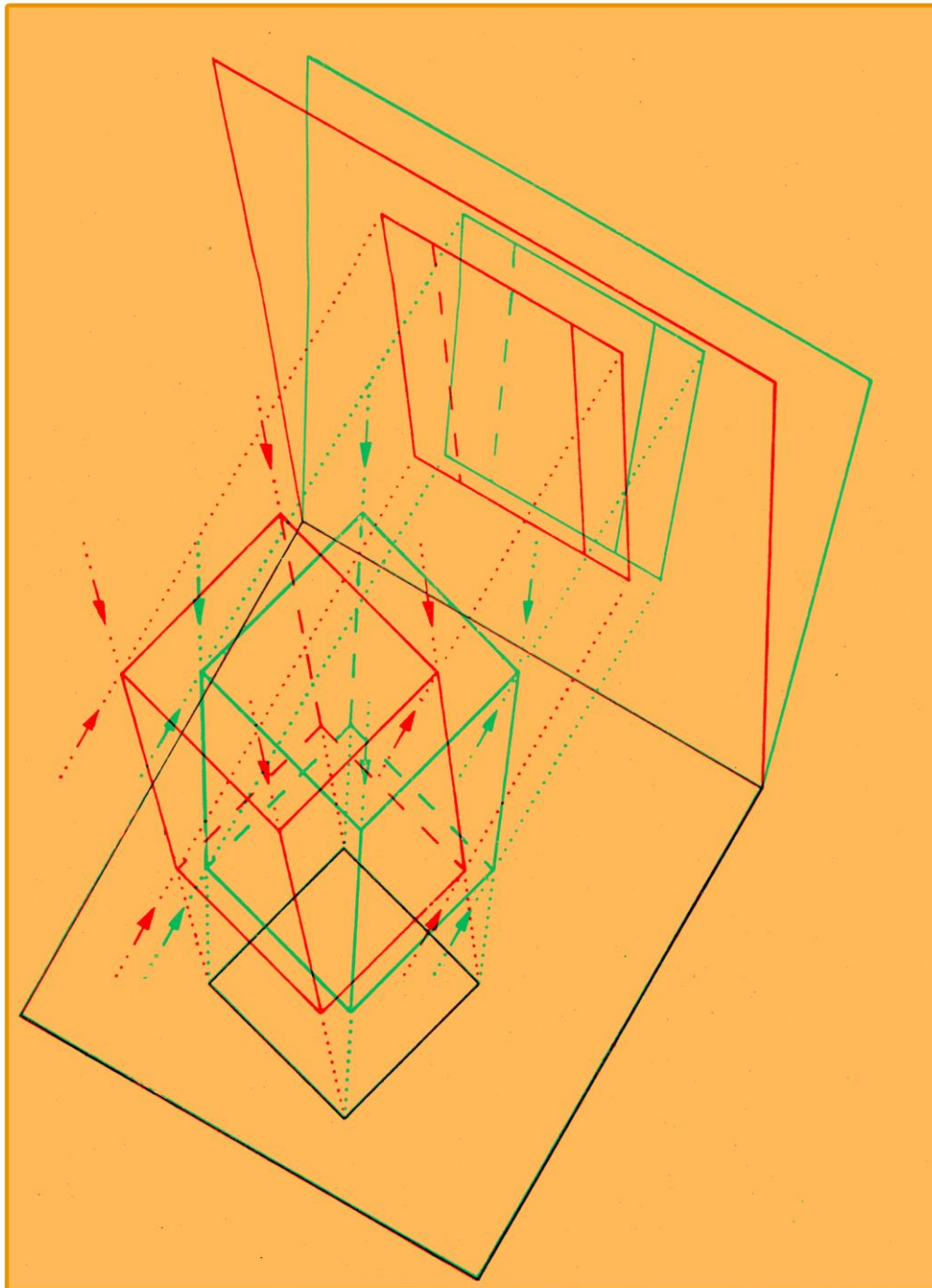
Fig. 14.72. Análisis colorimétrico de las láminas y del filtrado de las gafas originales. Pedro Cabezos

Mucke realizó posteriormente otras dos publicaciones con anaglifos, *Anaglyphen Raumzeichnungen*, de 1970, que incluye 59 anaglifos anamórficos en láminas independientes, impresas a dos caras, con interesantes explicaciones acerca de la construcción de los anaglifos y *Anaglyphen zur Struktur der Stoffe*, de 1973, con textos de G. Günzler y C. Fisher, que contiene 22 anaglifos anamórficos, dibujados por Mucke, para representar la estructura química de algunos materiales.

Mucke utiliza en estas publicaciones las mismas gafas y condiciones de toma que en su primera obra. También utiliza un esquema de colores prácticamente idéntico y se sigue detectando una deficiencia de contrastes. Como los análisis colorimétricos de estas publicaciones resultan muy similares al de la primera obra, sólo incluyo sus datos en la tabla resumen que aparece al final de este capítulo.

En lo que respecta al tema del confort, todas las figuras de estas dos obras se mantienen por debajo de los límites de paralaje y resultan 100% confortables.

A continuación, se muestra un ejemplo de cada uno de libros de Mucke, la optimización de las tintas corrige las deficiencias de contraste.



Tafel 3: Senkrechte Parallelprojektion

Fig. 14.73. Proyección cilíndrica ortogonal. Tintas optimizadas. Adaptado de (Mucke, 1961)



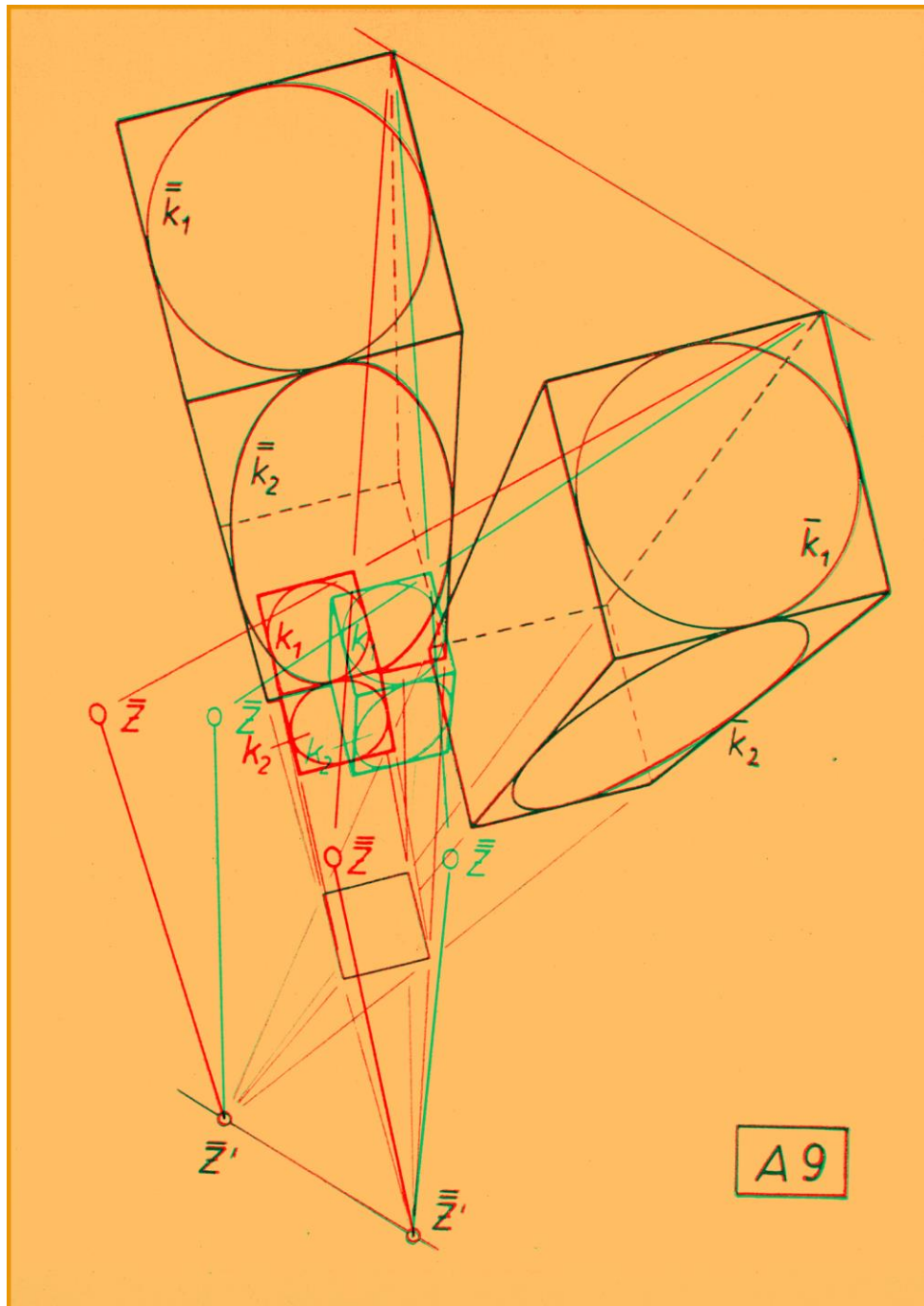


Fig. 14.74. Restitución visual de la figura a partir de una figura anamórfica. Tintas Optimizadas
Adaptado de (Mucke, 1970)



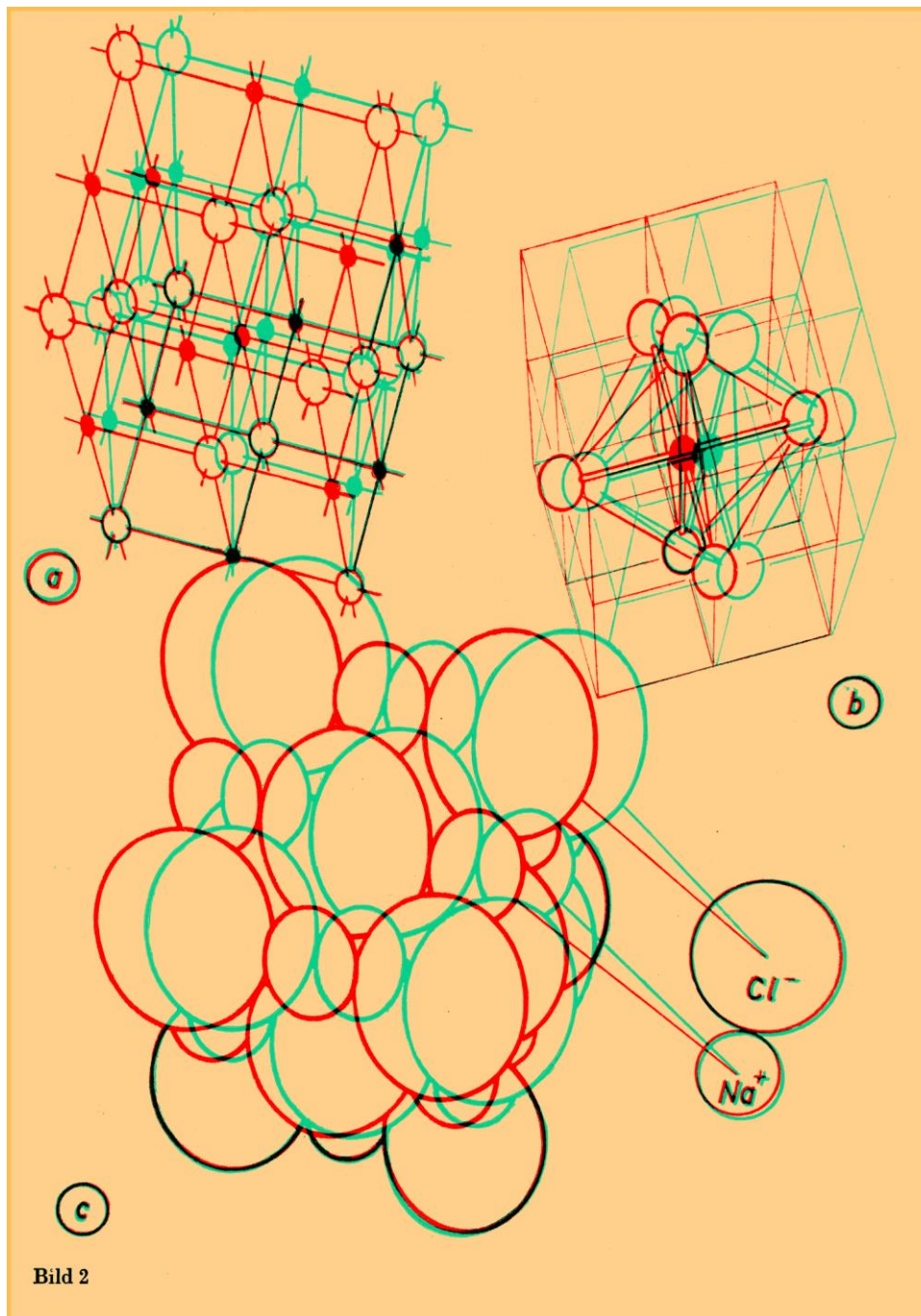


Bild 2

Fig. 14.75. Estructuras moleculares. Tintas optimizadas. Adaptado de (Mucke, Günzler & Fisher, 1973)



14.2.11. Dibujo Técnico con Dibujos Anaglíficos de José Pérez Sáez

José Pérez Sáez, ingeniero de minas y Catedrático de Dibujo Técnico en la ETS de Ingenieros de Minas de Madrid, publicó en 1969 el libro titulado *Dibujo Técnico con Dibujos Anaglíficos*, que contiene 109 anaglífos anamórficos.

En 1978, se publica una segunda edición de este libro en la que se reduce el número de anaglífos por motivos económicos. Este libro puede encontrarse también en algunos catálogos con el título de *Dibujo Geométrico. Dibujo técnico. Normalización y esquemas*.

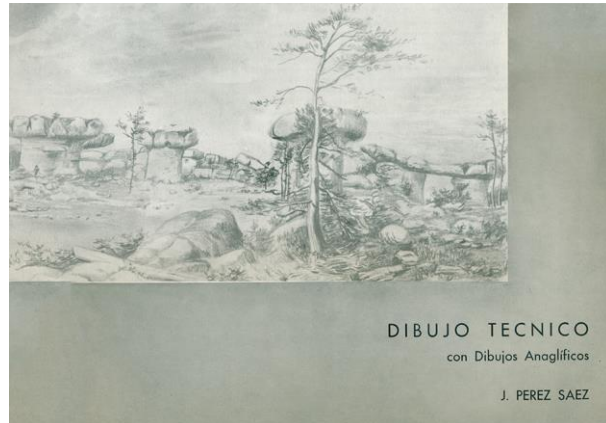


Fig. 14.76. J. Perez Saez, 1969, *Dibujo Técnico con Dibujos Anaglíficos*

Lo primero que me llamó la atención de este libro es que no se realizara ninguna indicación al lector acerca de la posición óptima de visionado, ni de que los anaglífos deban contemplarse oblicuamente, sino que únicamente advierte que, al colocarse las gafas, el filtro rojo debe quedar sobre el ojo izquierdo.

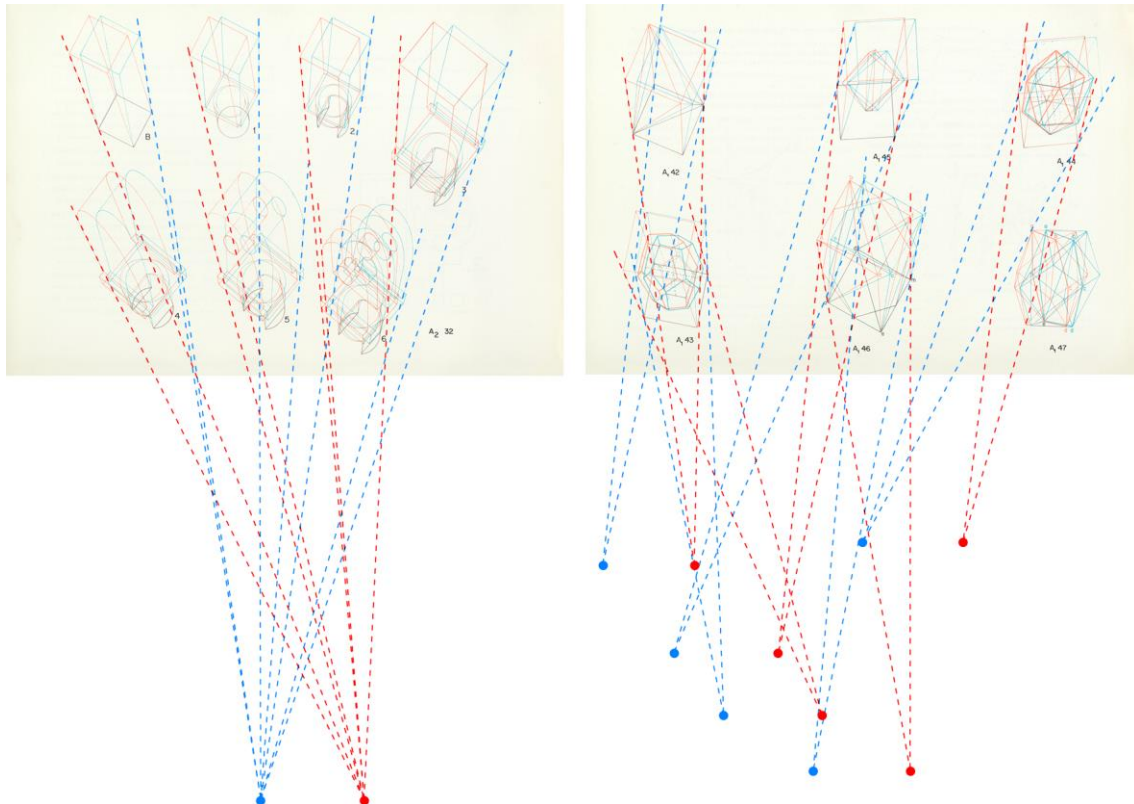


Fig. 14.77. Estudio de la posición en planta del espectador en páginas con varias figuras. Pedro Cabezos

Del estudio geométrico de los dibujos se desprende que la posición de los puntos de vista resulta algo errática, lo que explicaría la ausencia de indicaciones al respecto. En las páginas con varias figuras, el espectador debe encontrar la posición adecuada para cada una de ellas (Fig. 14.77, der.), pero hay excepciones en las que la posición del observador es única (Fig. 14.77, izda.). Cabe destacar que la distancia base y la altura de los puntos de vista sobre el papel permanecen constantes, siendo la distancia base de unos 6 cm y la altura sobre el papel de unos 30 cm.

En el libro se aprecia una dispersión en la calidad de los dibujos que podría deberse a la intervención de varios dibujantes; la mayoría de los trazados son correctos, pero algunas figuras presentan incorrecciones en una de las perspectivas que componen el anaglifo, lo que produce una distribución de paralajes incongruente. En una de las láminas se experimenta con la idea de generar pares estereoscópicos a partir de axonometrías isométricas, pero ello produce importantes distorsiones perceptivas. En lo concerniente al tema del confort, todas las figuras excepto una (99,9%) cumplen los límites de paralaje.

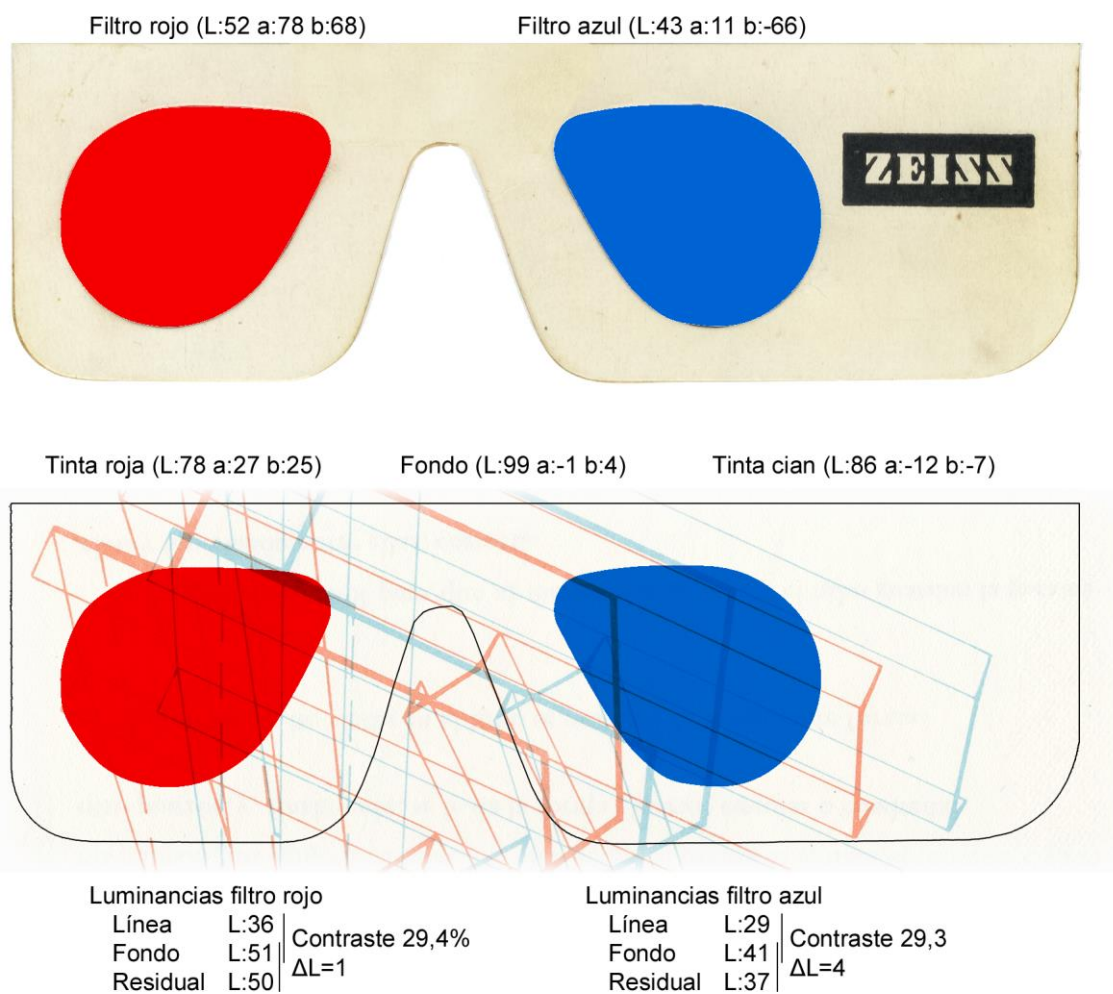


Fig. 14.78. Análisis colorimétrico de las láminas y del filtrado de las gafas originales. Pedro Cabezos

Las gafas suministradas son de la casa Zeiss y su combinación con las tintas de impresión produce un visible efecto *ghosting*, a través del filtro azul, lo que unido a un bajo contraste, dificulta la percepción del efecto estereoscópico.

A continuación, se muestra un ejemplo de esta obra con las tintas optimizadas y podremos observar correctamente su efecto. Para observar la figura sin distorsiones, la lámina debe colocarse horizontalmente y los ojos del espectador deben permanecer a unos 35 cm del borde inferior de la imagen y a unos 30 de altura.

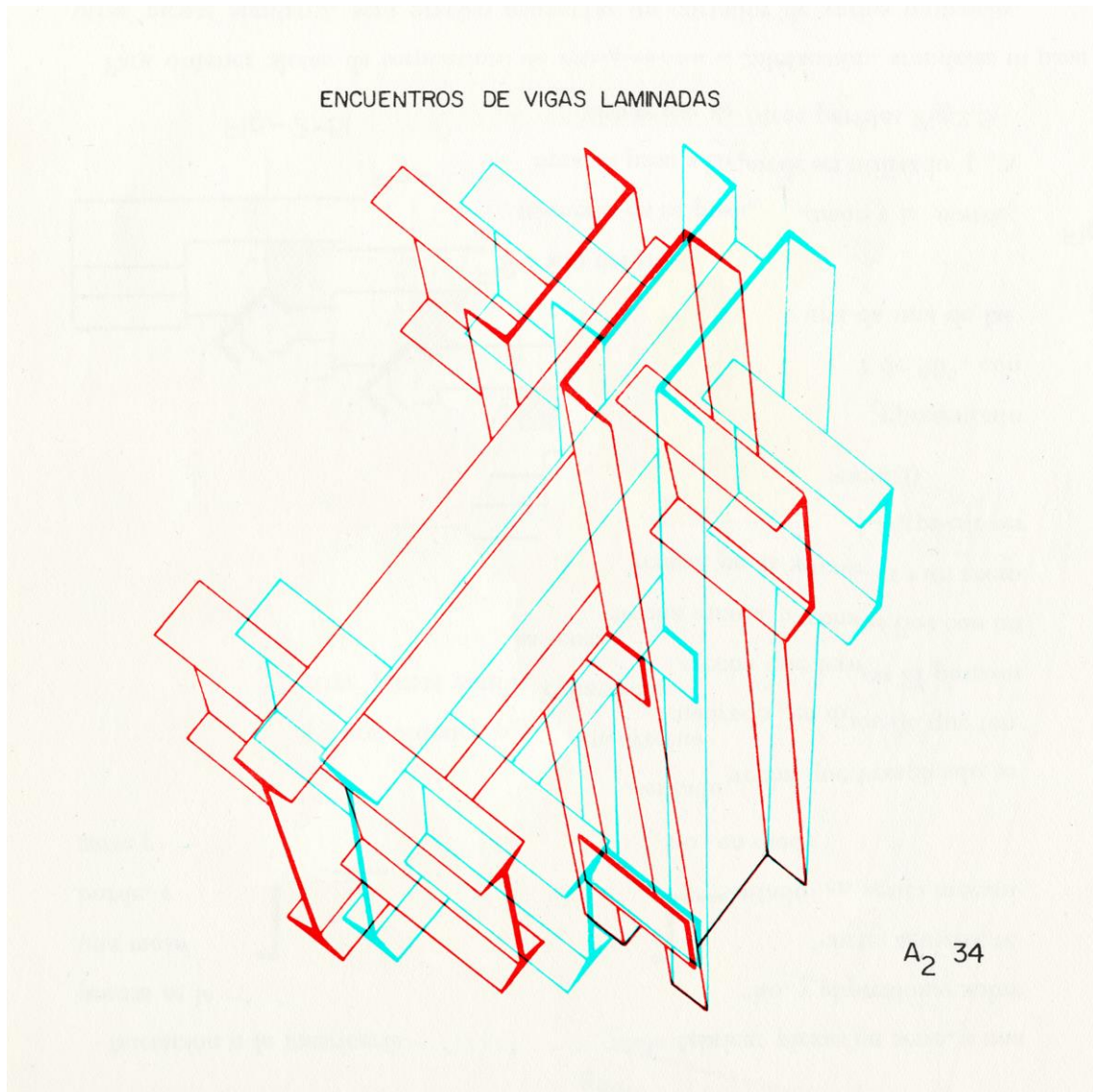


Fig. 14.79. Detalle de un nudo metálico. Tintas optimizadas. Adaptado de (Pérez, 1969)



14.2.12. Las figuras estereoscópicas de Rudolf Schmidt

Rudolf Schmidt, nacido en 1930, estudia Artes Plásticas en Alemania y Roma; cuando finaliza sus estudios compagina la pintura con la creación de imágenes estereoscópicas y en 1974 comienza a dar clases de Geometría Descriptiva en la Escuela Técnica Superior de Darmstadt. Fruto de este trabajo y de sus conocimientos de estereoscopia, publica en 1977 su libro *Darstellende Geometrie mit Stereo-Bildern*, traducido al castellano, en 1983, con el título de *Geometría Descriptiva con figuras estereoscópicas*.

Como ya comenté en la introducción, mi primer contacto con la estereoscopia vino a través de este libro, al que tengo un profundo cariño, pues todavía conservo muy vivo el recuerdo de la primera vez que pude contemplar su espectacular efecto estereoscópico, todavía más pronunciado para un niño de 10 años, cuya distancia interpupilar era menor que la de un adulto.

El libro es un manual de Geometría Descriptiva con un anexo que contiene 59 figuras estereoscópicas anamórficas. El autor señala verbalmente que las figuras deben de contemplarse oblicuamente con un ángulo de 45° y a unos 45 cm de distancia del pequeño cuadrado de referencia que viene representado en cada una de las láminas, para ayudar al observador a encontrar la posición idónea.

El trazado geométrico de las figuras es riguroso, la valoración de línea es exquisita y con ella se demuestra que un dibujo estereoscópico no tiene porqué materializarse mediante trazos gruesos. Los dibujos de Schmidt recuerdan a los de su compatriota Schörner, en la manera de representar los puntos singulares y en el uso de las tramas de puntos, si bien, Schmidt las representa en ambas imágenes del par, mientras que Schörner las representaba únicamente en una de ellas.

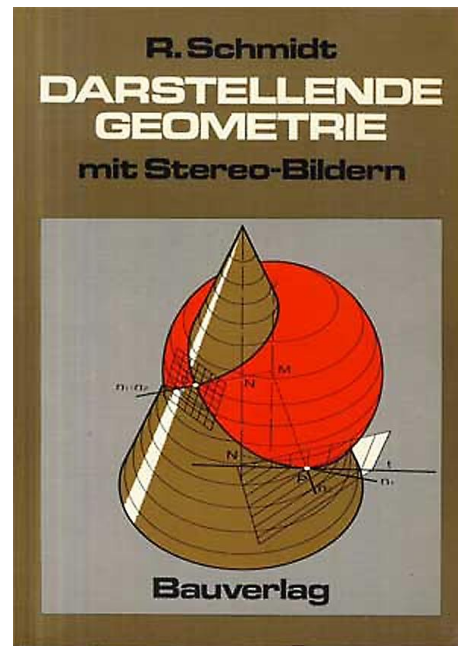


Fig. 14.80. Rudolf Schmidt, 1977, *Darstellende Geometrie mit Stereo-Bildern*

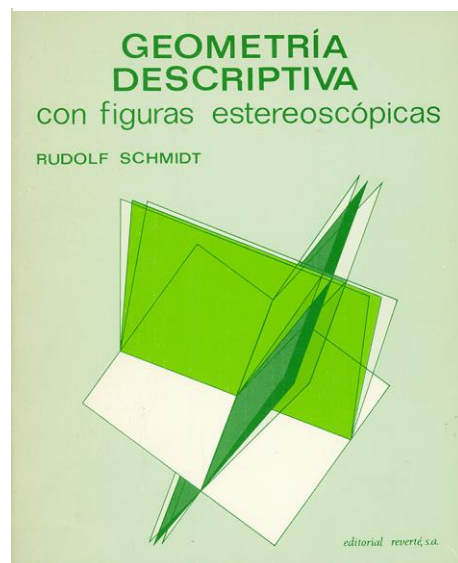


Fig. 14.81. Rudolf Schmidt, 1983, *Geometría descriptiva con figuras estereoscópicas*

Lo cierto es que ninguno de los libros que aparecen en este análisis supera la viveza y perfección del efecto estereoscópico conseguido por éste y es que la calidad del filtrado y la materialización de los dibujos son inmejorables.

El libro usa unas gafas con el sistema de filtrado rojo/verde y unas tintas de una viveza y saturación muy poco corrientes, que producen un excelente contraste y un *ghosting* prácticamente nulo, con el mérito añadido de haber mantenido el fondo blanco del papel y no otro color que ayudara a disimular el *ghosting*.

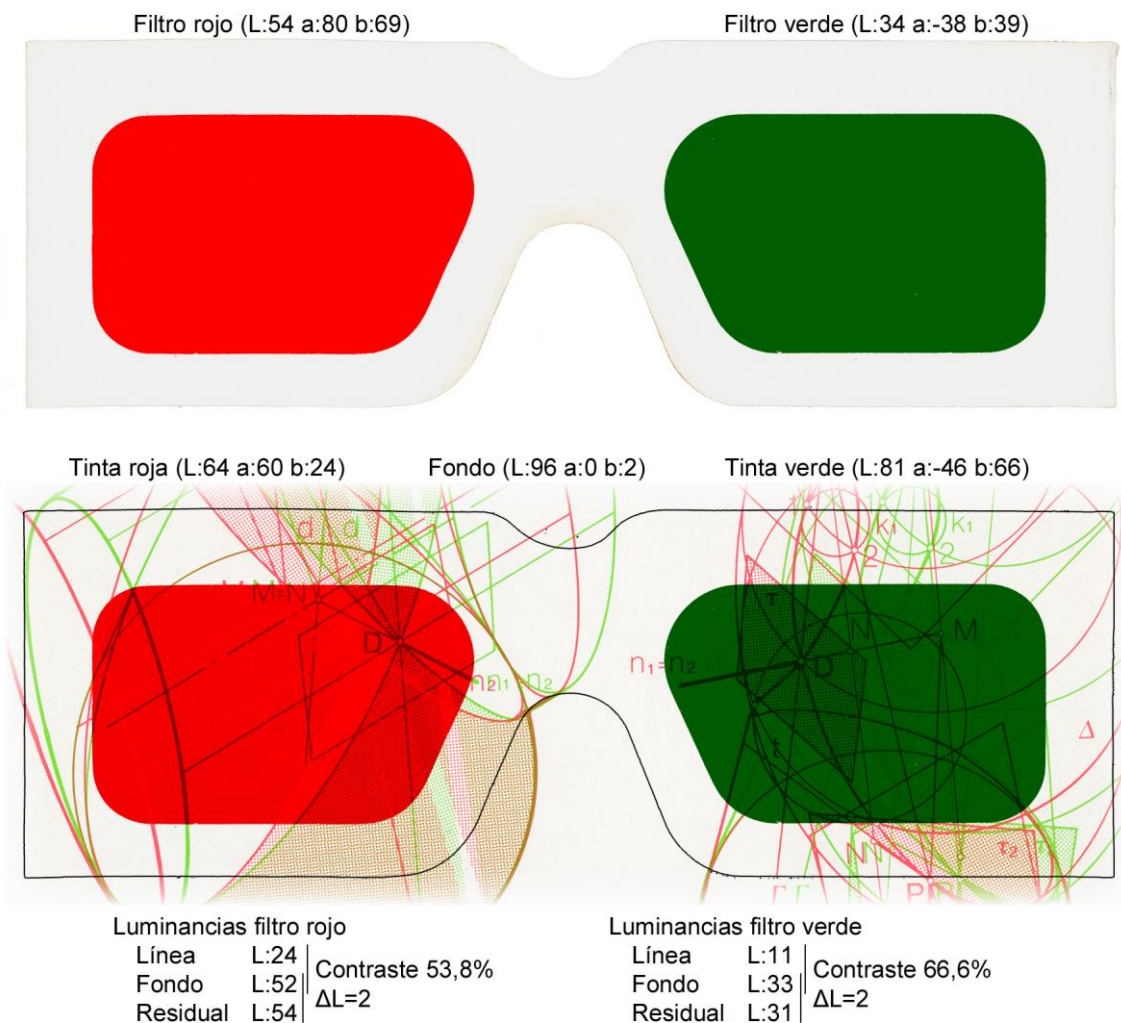


Fig. 14.82. Análisis colorimétrico de las láminas y del filtrado de las gafas originales. Pedro Cabezos

El secreto de este libro radica en el acierto de sus tintas tan singulares. Es conveniente señalar que en este tipo de publicaciones cada dibujo requiere una plancha de impresión propia con un color determinado por unos pigmentos especiales que, en este caso, sería imposible reproducir mediante ningún sistema de cuatricromía actual.

En los ejemplos mostrados a continuación, no se puede decir que se haya producido una optimización de las tintas, pues ya eran óptimas en su estado original, sino que

más bien se ha realizado una adaptación al sistema de filtrado rojo/cian que utilizan las gafas suministradas con la tesis.

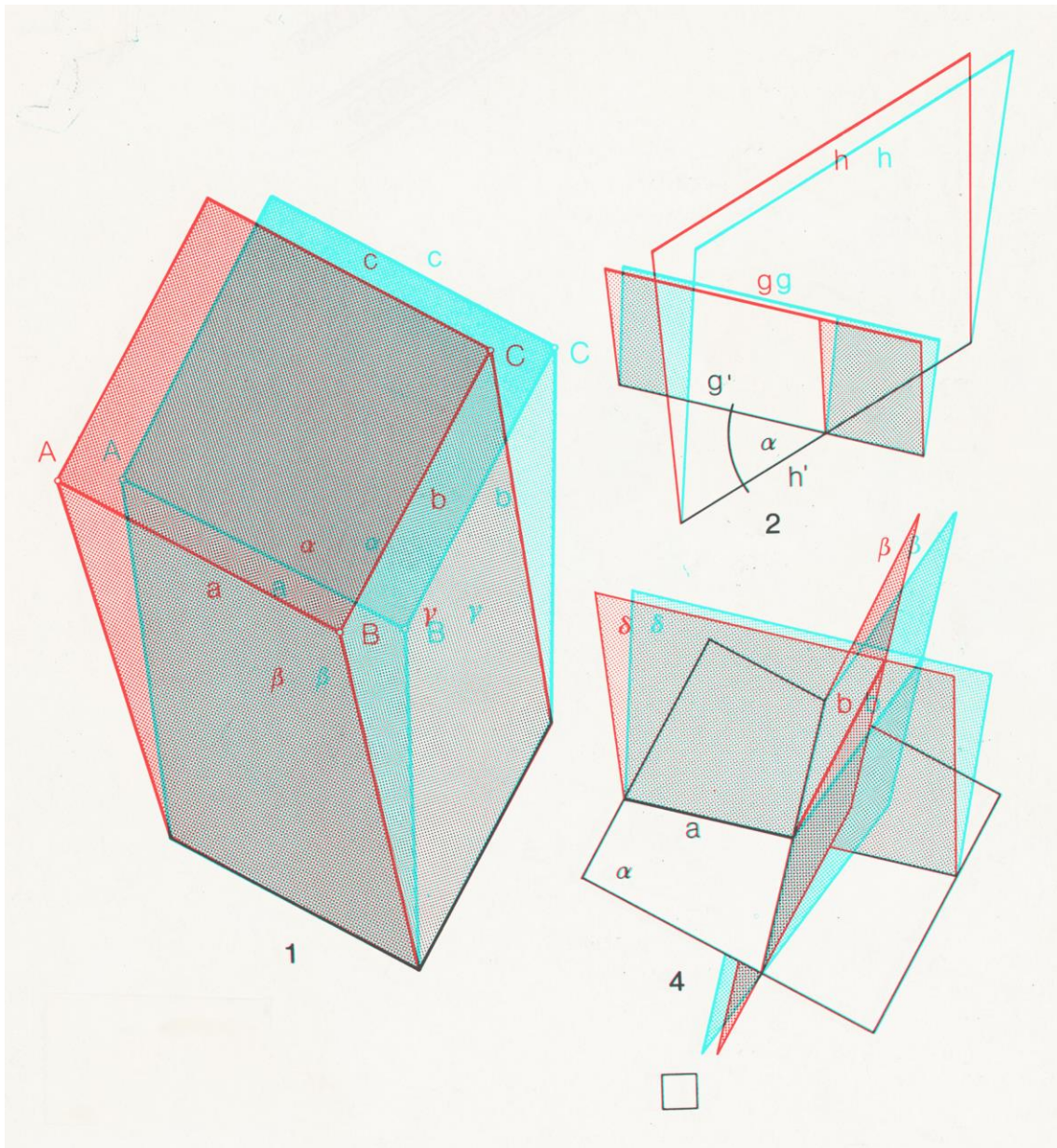


Fig. 14.83. Cubo e intersecciones entre planos. Tintas adaptadas. (Schmidt, 1983)



Obsérvese el cuadrado que aparece en la parte inferior de la Fig. 14.83, que debe ser tomado como la referencia a partir de la cual establecer la distancia y ángulo de observación establecidos por el autor.

En la mayoría de ocasiones, las figuras de una página están dibujadas para verse desde una posición única, pero hay casos en los que el autor establece una posición óptima para cada figura de una misma página.

El uso de las tramas de puntos enfatiza la corporeidad de los volúmenes y el efecto estereoscópico se ve acrecentado.

La gran mayoría de las figuras tienen un paralaje confortable (94.9%), salvo tres de ellas que lo superan ligeramente.

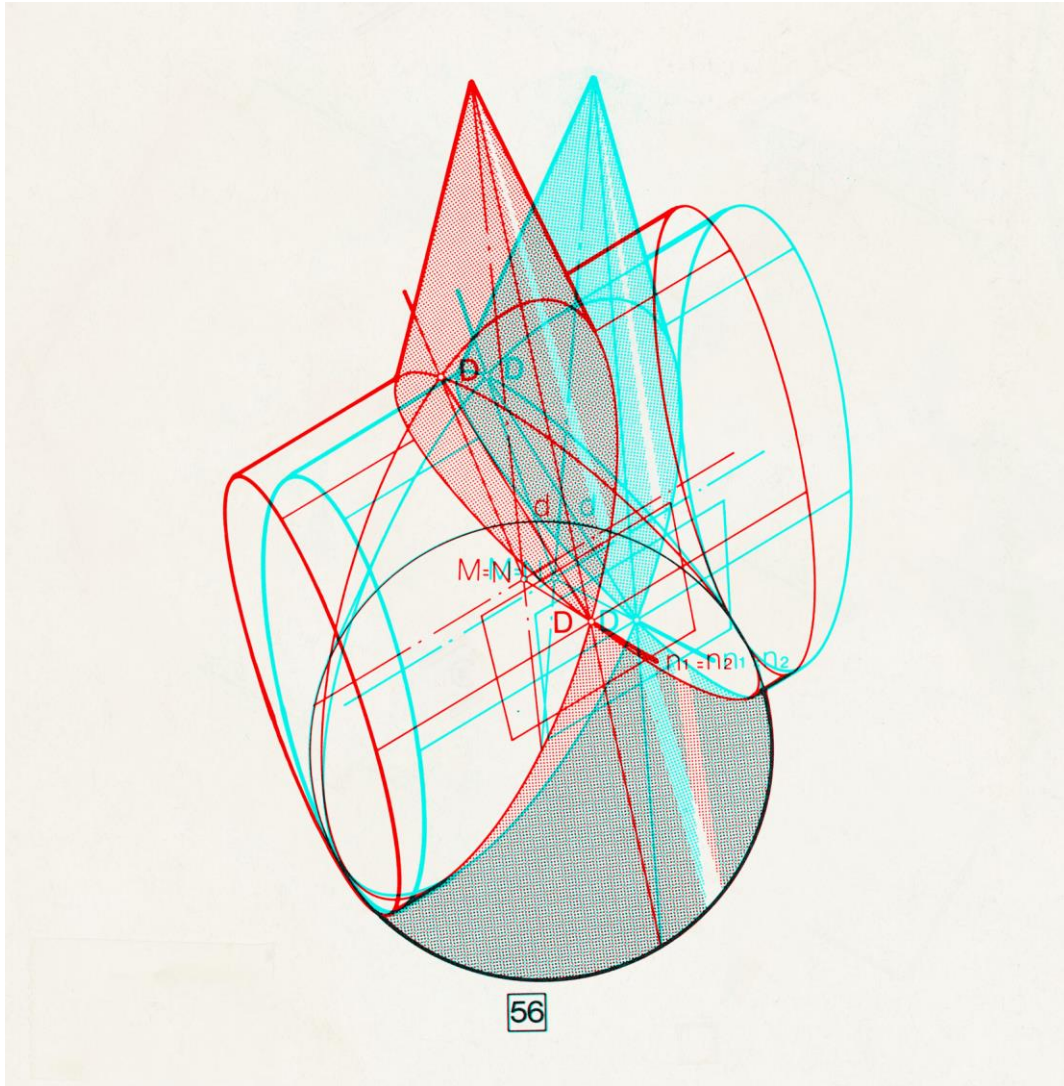


Fig. 14.84. Intersección entre cono y cilindro. Tintas adaptadas. (Schmidt, 1983)



14.2.13. Otra forma de ver el Sistema Diédrico de Santiago Martín et al.

Otra forma de ver el Sistema Diédrico, publicado en 2007 por varios autores encabezados por Santiago Martín, rompe un largo periodo de 30 años en el que la estereoscopia aplicada a los libros de geometría parecía haber caído en el olvido.

Resulta extraño que el auge de las nuevas tecnologías y el diseño informatizado, que nos proporciona

nuevas vías de expresión y facilita el dibujo de los pares estereoscópicas, no haya propiciado la aparición de más libros de esta índole.

El libro cuenta con 56 figuras estereoscópicas frontales, para las que no se especifica una distancia de observación determinada. Las figuras representan esquemas sencillos concernientes a la representación de elementos geométricos sencillos, rectas, puntos y planos a través del sistema diédrico.

Llama la atención la escasez de paralaje en todas de las figuras, lo que apunta hacia unas condiciones de toma que no se corresponden con las de visualización.

Los dibujos que configuran los anaglifos son perspectivas de plano del cuadro oblicuo y en ellas aparece siempre representado el primer diedro de proyección y, gracias a sus aristas de contorno, se pueden determinar los tres puntos de fuga necesarios para la restitución de los puntos de vista (Fig. 14.86).

Para ello se ha construido el triedro trirectángulo determinado por el triángulo de trazas de vértices $F1$, $F2$ y $F3$, que son los puntos de fuga de tres direcciones ortogonales en el espacio. El vértice de este triedro determina el punto de vista de la perspectiva.

Tras haber determinado la posición de los puntos de vista, se puede comprobar que la distancia base considerada es inferior a la interpupilar, lo que explica la escasez de paralaje de las figuras.

El desajuste entre la distancia base y las condiciones de visualización produce distorsiones perceptivas, pero es posible que los autores hayan preferido sacrificar la rigurosidad perceptiva en aras de obtener un mayor confort visual, pues el paralaje máximo de todas las figuras se mantiene por debajo de los límites de confort.

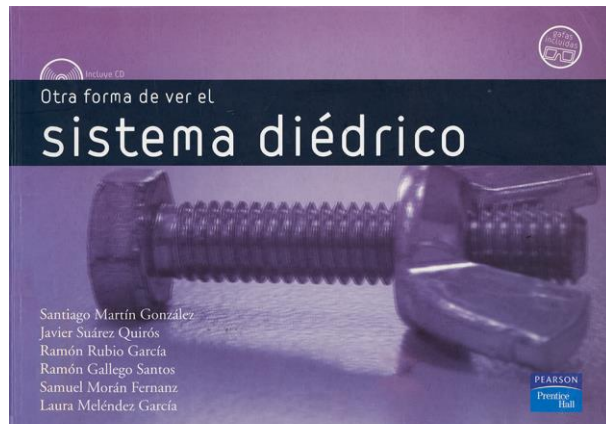


Fig. 14.85. Santiago Martín et al., 2007, *Otra forma de ver el Sistema Diédrico*

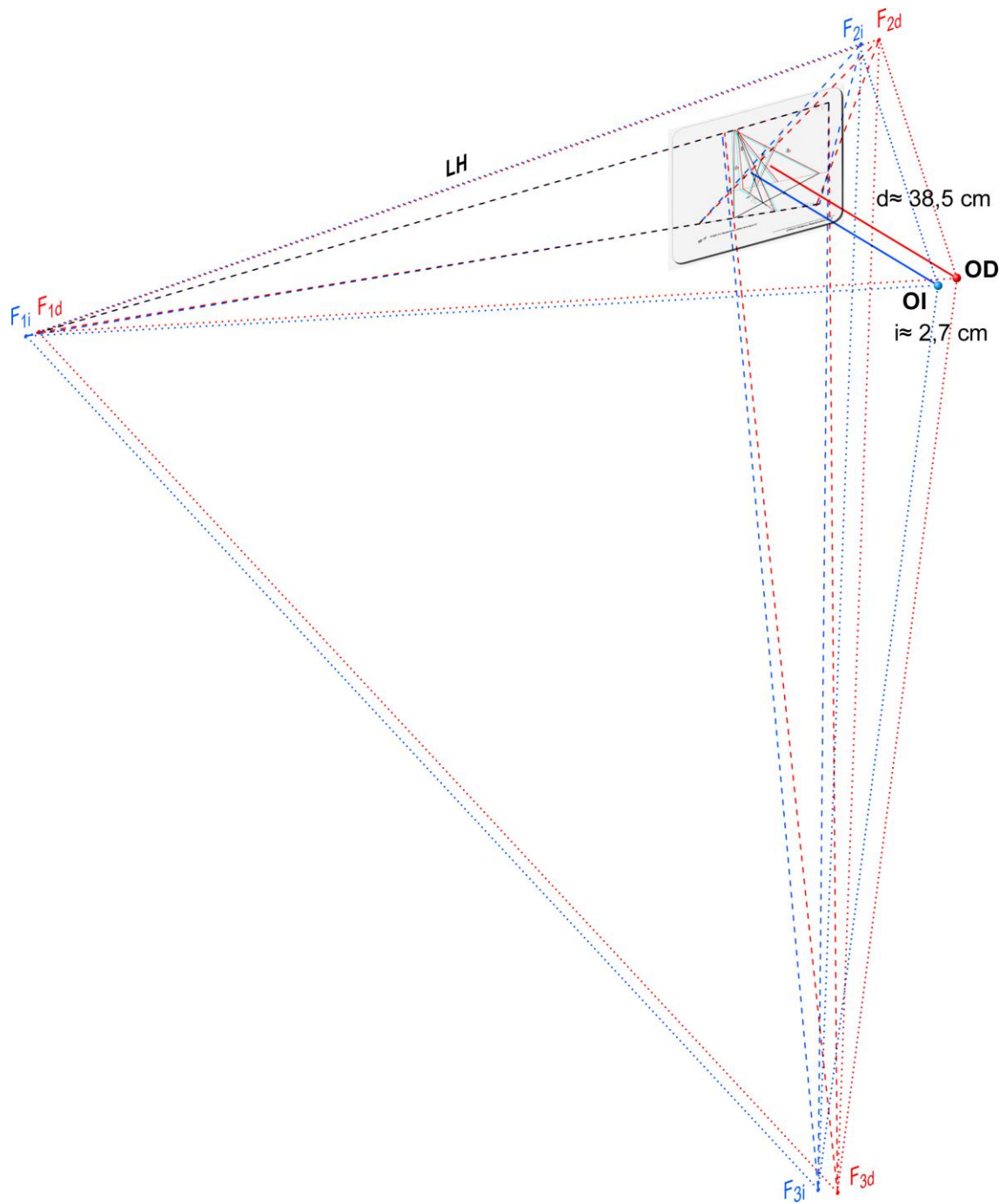


Fig. 14.86. Restitución de los puntos de vista mediante el triedro trirectángulo, determinado por los puntos de fuga de tres direcciones ortogonales en el espacio. Pedro Cabezos

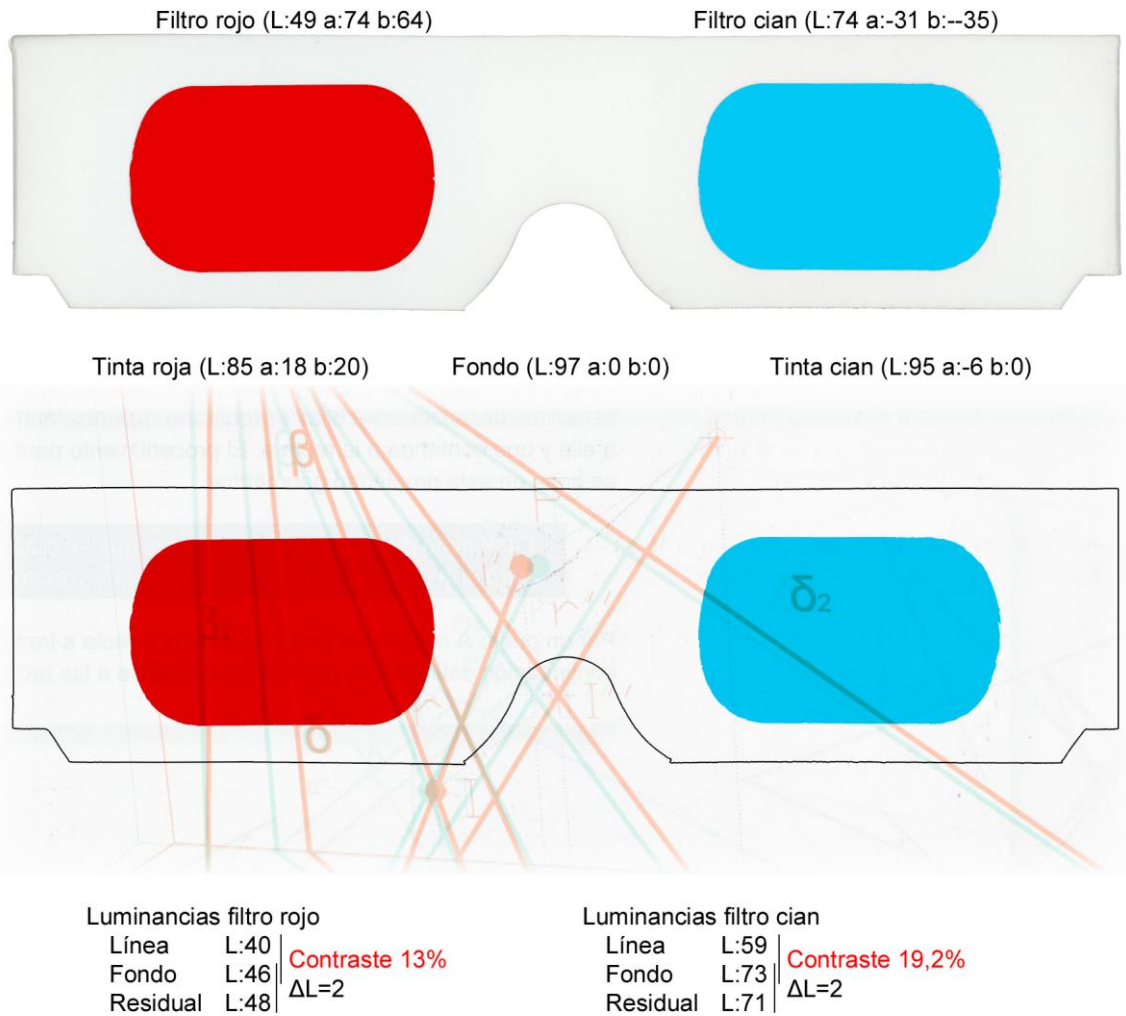
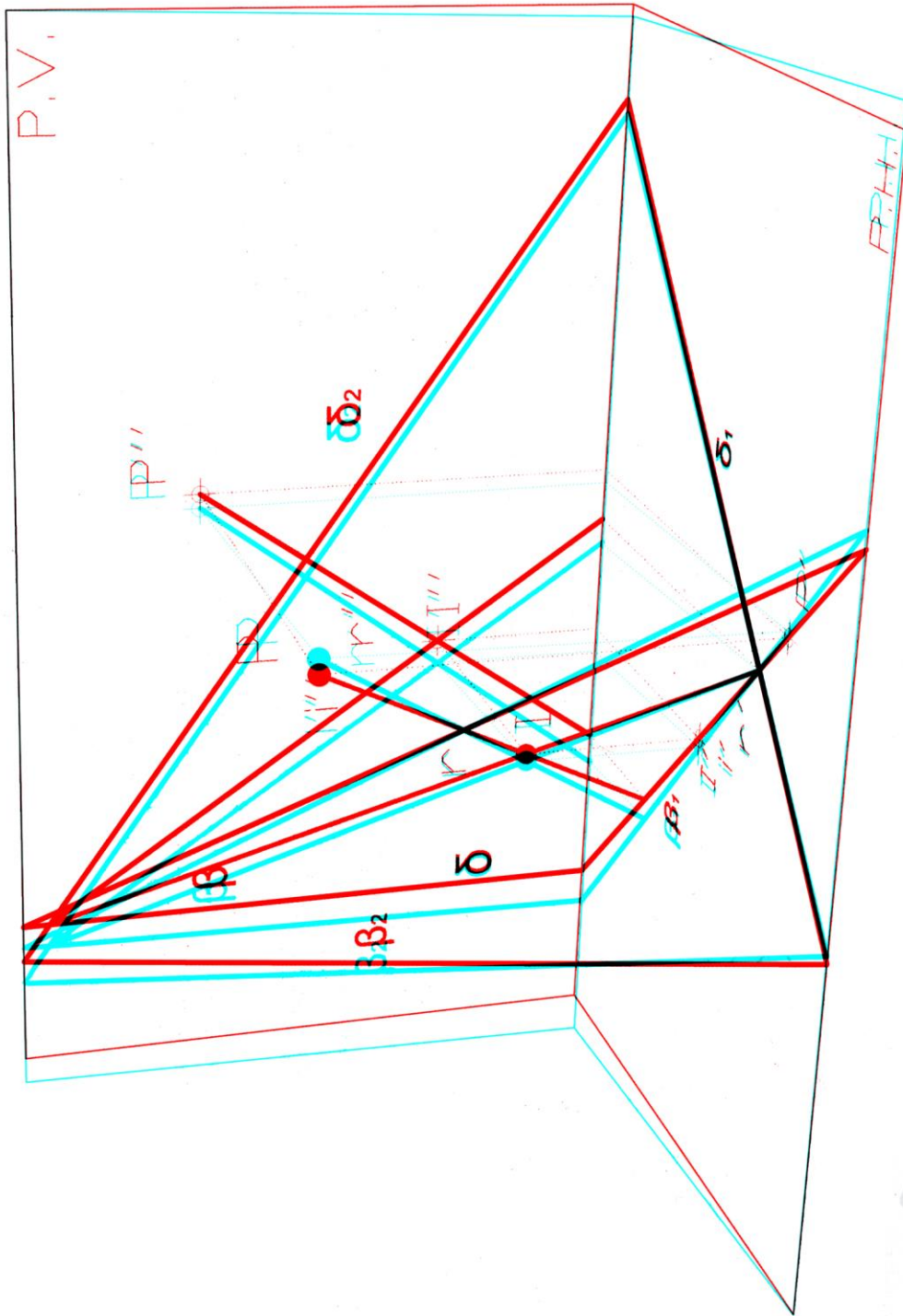


Fig. 14.87. Análisis colorimétrico de las láminas y del filtrado de las gafas originales. Pedro Cabezos

Las gafas suministradas utilizan filtros rojo/cian y su combinación con las tintas empleadas no produce *ghosting* visible, pero el efecto de relieve queda muy debilitado por el bajo contraste resultante en ambos ojos, uno de los más bajos de todo el estudio.

A continuación se muestra una de las figuras del libro, que se ha girado a 90° para respetar su tamaño original y debe verse frontalmente. Aunque se producen distorsiones perceptivas por el desajuste entre distancia base y distancia interpupilar, éstas pueden pasar desapercibidas si el observador no conoce, a priori, el tamaño y proporciones reales de los objetos geométricos representados.



Anaglifio 5.5. Representación estéreo de la Figura 5.5

Fig. 14.88. Distancia entre punto y plano. Tintas optimizadas. Adaptado de (Martin et al., 2007)



14.2.14. Resumen de datos obtenidos

Ref.	Año	Título	Autor	Sistema	Figuras		Fondo	Tintas		Filtros		Contraste		ΔL	
					Anam.	Front.		Izd.	Der.	Izd.	Der.	Izd.	Der.	Izd.	Der.
1	1912	Les Anaglyphes Géométriques	H. Vuibert	Anaglifo	15	15									0
2	1920	Album de Anaglyphes Géométriques	F. Herrera Orta	Anaglifo	63	15									-
3	1929	Tavole di Anaglifi Geometrici	G. & M. Giozzi	Anaglifo	-	38									-
4	1935	Anaglyphes en Negro vistos con estereoscopio sin lentes	J. Estevan Clavillar	Vision libre	-	9									-
5	1938	Mathematische Raumbilder	O. Köler, U. Graf, C. Calov	Anaglifo	32	-									2
6	1943	Geometría Descriptiva y sus aplicaciones	A. Talbo	Anaglifo	8	-									2
7	1946	Descriptive Geometry	J. T. Rule & E. F. Watts	Vectograph	-	3									-
8	1948	Mathematische Plastoskop-Modelle IV	E. Schörner	Anaglifo	15	-									2
9	1959	Térifattatos ábrázoló mértan	I. Pal	Anaglifo	205	-									7
10	1960	Raumbil-Lehrbuch der Darstellenden Geometrie	E. Schörner	Anaglifo	60	-									3
11	1961	Anaglyphen zur Darstellenden Geometrie	H. Mucke	Anaglifo	28	-									2
12	1965	Reguläre Figuren	L. Fejes Tóth (Dibujos I. Pal)	Anaglifo	12	-									3
13	1969	Dibujo Técnico con Dibujos Anaglificos	J. Pérez Sáez	Anaglifo	109	-									4
14	1970	Anaglyphen Raumzeichnungen	H. Mucke	Anaglifo	59	-									2
15	1973	Anaglyphen zur Struktur der Stoffe	H. Mucke	Anaglifo	22	-									2
16	1977	Darstellende Geometrie	E. Schörner	Anaglifo	60	-									2
17	1977	Darstellende Geometrie mit Stereo-Bildern	R. Schmidt	Anaglifo	59	-									2
18	2007	Otra forma de ver el Sistema Diédrico	S. Martin et al.	Anaglifo	-	56									2

Fig. 14.89. Tabla resumen con los principales datos del análisis de las publicaciones. Pedro Cabezos

15. LAS APLICACIONES CIENTÍFICAS DE LA ESTEREOSCOPIA

Las aplicaciones habituales de la estereoscopia han tenido siempre un marcado carácter lúdico desde sus comienzos. Las colecciones de vistas estereoscópicas que tanto gustaron como medio de entretenimiento han ido evolucionado hacia el cine y hacia su aplicación en publicaciones de temática distendida. Sin embargo, aunque escasos, también hay ejemplos del uso de la estereoscopia con fines más serios y científicos. En este capítulo se hace una revisión histórica de las primeras aplicaciones científicas de la estereoscopia, destacando la obra de aquellos que han sabido valorar el potencial que la estereoscopia puede ofrecernos en el campo de la divulgación científica y la documentación arquitectónica.

15.1. La experiencia astronómica de Piazzzi Smyth en Tenerife

Charles Piazzzi Smyth (1819-1900) fue un astrónomo de origen italiano, afincado en Escocia, que publicó, en 1858, el primer libro con fotografías estereoscópicas, titulado: *Teneriffe an astronomer's experiment or specialities of a residence above the clouds*. (Piazzzi, 1858). Piazzzi Smyth describe la experiencia astronómica llevada a cabo en Tenerife, en 1856, para corroborar la teoría enunciada por Isaac Newton en su libro de óptica (Newton, 1704), al referirse a los telescopios y sugerir que para evitar la difusión de los rayos en la atmósfera sería conveniente ascender a la cima de montañas de gran altura para poder observar por encima de las nubes (Schaaf, 1980).



Fig. 15.1. Charles Piazzzi Smyth (1819-1900)

Según Carlos Teixidor (1999), Piazzzi Smyth recogió su investigación en 10 volúmenes manuscritos acompañados de 74 fotografías estereoscópicas. El libro sintetiza toda esta información y se incluyen 20 de estas fotografías estereoscópicas.

En el mismo año se publica también un informe anexo, que sigue la numeración de páginas inicial, titulado *Report on the Teneriffe Astronomical Experiment of 1856*, en el que sólo aparece una fotografía estereoscópica en la portada, correspondiente a una maqueta del cráter del Teide, fotografiada desde arriba, que fue realizada a partir de los datos topográficos recabados en la expedición.

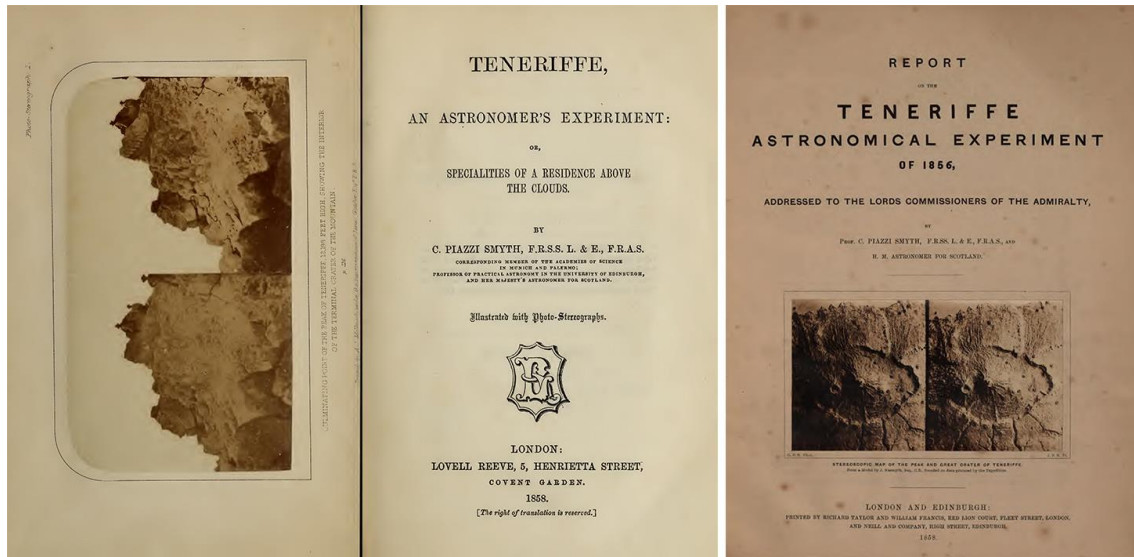


Fig. 15.2. Libro e informe de Piazzzi Smyth sobre el experimento de Tenerife²⁰

El libro no contiene fotografías estereoscópicas tomadas con el telescopio, sino que describe el entorno de trabajo, los lugares, las gentes e incluso las especies botánicas autóctonas de la isla como los grandes Dragos de La Orotava, por lo que éstas tienen un gran valor documental y constituyen las fotografías más antiguas de la isla, de las que se tiene la certeza su datación (Teixidor, 1999).

Las fotografías fueron tomadas por el propio Piazzzi Smyth y positivadas según el procedimiento del colodión húmedo por su mujer Jessie, quien le acompañó en el viaje y que aparece en algunas de las fotografías.

En el momento en el que se publicó el libro, las técnicas de impresión no tenían la capacidad de imprimir fotografías, sino que las imágenes se realizaban a partir de grabados realizados a mano por un especialista a partir de las fotografías. Tal como afirma Fernández (2004) no sería hasta el último cuarto del s. XIX cuando se desarrollarían las técnicas que harían posible la reproducción fotomecánica.

El editor tomó la decisión de utilizar copias fotográficas adheridas a las páginas del libro, al igual que se había hecho previamente en libros con fotografías convencionales a raíz de *The pencil of nature*, publicado por Talbot en 1844.

Con el libro no se acompañaba ningún medio para visualizar los pares, pero el propio Piazzzi Smyth comenta en el prefacio que podían ser visualizados con cualquier estereoscopio, abierto por el fondo, o mediante el *book stereoscope* construido por Negretti y Zambra.

²⁰ El libro y el informe pueden consultarse y descargarse desde los siguientes enlaces:

<https://archive.org/details/teneriffeastrono00smyt>

<https://ia600308.us.archive.org/21/items/reportontenerif00smytgoog/reportontenerif00smytgoog.pdf>



Fig. 15.3. Telescopio *Sheepshanks* en monte Guajara (2718 m) con el Teide al fondo. (Piazzi, 1858:131)



Fig. 15.4. Anaglifo realizado a partir del par estereoscópico anterior. Pedro Cabezos 



Fig. 15.5. Segundo de abordo comprobando la temperatura. (Piazzzi, 1858:173)



Fig. 15.6. Anaglifo realizado a partir del par estereoscópico anterior. Pedro Cabezos 

15.2. Las fotografías astronómicas de Warren de la Rue

Warren de la Rue (1815-1889) fue un químico y astrónomo británico, que en un primer momento se dedica a continuar el negocio de su padre como fabricante de papel de seguridad para billetes y otros documentos. De la Rue se aficionó a la astronomía y en 1850 construyó su propio telescopio reflector. En la exposición universal de 1851 se quedó fascinado al ver un daguerrotipo de la Luna tomado por John Adams Wipple y a partir de entonces comenzó a fotografiar la Luna utilizando la incipiente técnica del colodión húmedo, que le permitía obtener tiempos de exposición más cortos. También desarrolló un mecanismo de relojería para seguir la trayectoria de los astros que fotografiaba y el Fotoheliógrafo, que era un telescopio diseñado para fotografiar el sol, equipado con un obturador que actuaba en fracciones de segundo.



Fig. 15.7. Warren de la Rue (1815-1889)

De la Rue incorpora la técnica estereoscópica y consigue obtener en 1858 el primer par estereoscópico de la Luna, lo que resultó ser todo un reto científico. Por un lado, la Tierra no es lo suficientemente grande como para poder alcanzar la distancia base idónea con la que conseguir el suficiente efecto hiperestereoscópico y, por otra parte, la Luna siempre muestra la misma cara hacia la tierra, porque la rotación sobre su eje dura lo mismo que su órbita alrededor de la tierra, pero De la Rue tuvo en cuenta el efecto de la libración lunar, lo que ya había sido sugerido por Wheatstone (Herschel, 1872). La libración lunar²¹ es una especie de oscilación producida por la combinación de tres efectos: la libración en longitud, la libración en latitud y la libración diurna.

La libración en longitud se debe a que la órbita lunar es elíptica y algo excéntrica, lo que produce variaciones en la velocidad de la luna alrededor de la tierra y ello a su vez ocasiona la oscilación aparente en la superficie lunar según el eje este-oeste. La libración en latitud está provocada por la desviación del eje de rotación lunar con respecto a la normal al plano que contiene a su órbita, lo que causa una oscilación en la dirección norte-sur. Por último, la libración diurna se produce por la rotación de la tierra que cambia ligeramente el punto de vista del observador con respecto a la Luna.

²¹ El efecto de la libración lunar puede verse en este video realizado por la NASA: https://www.youtube.com/watch?v=3f_21N3wcX8


La combinación de estos tres efectos hace posible que desde la tierra pueda verse hasta el 59% de la superficie lunar, a lo largo del tiempo.

De la Rue calculó el efecto de la libración lunar y determinó las fechas en las que se podría fotografiar la Luna con una diferencia de paralaje adecuada para recrear el efecto estereoscópico. Según Greenslade (1971:538) la imagen izquierda fue tomada el 1 de noviembre de 1857 y la derecha el 29 de marzo de 1858. Esta diferencia de tiempo produjo un desfase angular longitudinal, lográndose así un grandioso efecto hiperestereoscópico en el que la Luna se aprecia como una gran esfera situada a una distancia de 2.3 m del observador. Sin perder tiempo los editores Smith Beck & Beck y Charles Panknin iniciaron la comercialización de una serie de fotografías tomadas por De la Rue. En el verso de estas fotografías figuraban las fechas en las que se realizaron las tomas, la fase lunar y los parámetros de libración (Fig. 15.8).



Fig. 15.8. Fotografía de la Luna realizada por Warren de la Rue comercializada por Charles Panknin



Fig. 15.9. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos 

De la Rue también llegó a tomar fotografías estereoscópicas del Sol para obtener más datos de las características de las protuberancias solares y viajó a España en 1860 para fotografiar el eclipse de sol que tuvo lugar el 18 de julio. En este evento cabe destacar la labor del fotógrafo valenciano José Monserrat y Riutort (1814-1881), que tomó cuatro excelentes fotografías del eclipse, que por su calidad fueron atribuidas durante muchos años a De la Rue (Huguet, 1992) (Ten,1997) (Fernández, 2004).

15.3. Adolphe Neyt y las estructuras laminares de Plateau

Adolphe Guillaume Neyt (1830-1892), fue un industrial y político belga, nacido en Gante, que heredó la azucarera fundada por su abuelo y llegó a ser miembro del Parlamento. Fue un gran amante de la fotografía, miembro de las asociaciones de fotografía francesa y belga, especializado en los temas astronómicos y microscópicos. En 1869 presentó una docena de fotografías lunares ante la Real Academia de las Ciencias de Bélgica que fueron expuestas posteriormente en la Exposición Universal de Viena de 1873. También colaboró con Édouard Van Beneden, en las fotografías microscópicas de su libro (Beneden, 1887) sobre división celular (Wilder, 2013:1000). Neyt también practicó la estereoscopia y la empleó para ilustrar los resultados de los experimentos del eminente científico belga Joseph-Antoine Ferdinand Plateau (1801-1883) acerca de las estructuras laminares de glicerina líquida. Plateau planteó el problema de hallar la superficie de área mínima que queda limitada por un contorno

cerrado y logró solucionar el problema, de forma empírica, materializando el contorno cerrado con alambre y sumergiendo esta estructura en una solución jabonosa.



Fig. 15.10. Estructuras de alambre y superficie laminar formada al sumergirlas en glicerina líquida
Copyright Museum for the History of Sciences, Ghent University

Las superficies de jabón tienden a formar una estructura lo más estable posible pues su energía potencial y su superficie resultan mínimas. La formación de las membranas requiere energía y en consecuencia las superficies tienden a contraerse hasta alcanzar la posición de equilibrio en la que el gasto de energía resulta mínimo. Plateau escribió un libro a raíz de sus experimentos (Plateau, 1873) y enunció algunas leyes acerca de la formación de estas estructuras laminares, que pueden resumirse de la siguiente manera:

- La estructura se compone de láminas que se unen formando líneas y vértices.
- En cada línea confluyen tres superficies formando el mismo ángulo (120°)
- En cada vértice confluyen cuatro líneas formando el mismo ángulo ($109^\circ 28'$)

Las leyes empíricas de Plateau fueron corroboradas matemáticamente más tarde por Taylor (1976) y el problema planteado originó las superficies periódicas mínimas desarrolladas por Schwarz (1890), que han inspirado algunas obras de arquitectura con estructura tensada como las de Frei Otto (Emmer, 1996).

Las fotografías estereoscópicas de las estructuras laminares de Plateau fueron realizadas por Neyt en torno al año 1880 y la mayoría han permanecido inéditas hasta la fecha, guardadas en el Museo de la Historia de la Ciencia de la Universidad de Gante. Gracias al Prof. Dr. Danny Segers, actual Director del Museo, he podido acceder a ellas y le estoy profundamente agradecido por haberme proporcionado el permiso para publicarlas en esta Tesis. Las fotografías son excepcionales y documentan muy bien las complejas estructuras laminares obtenidas por Plateau.

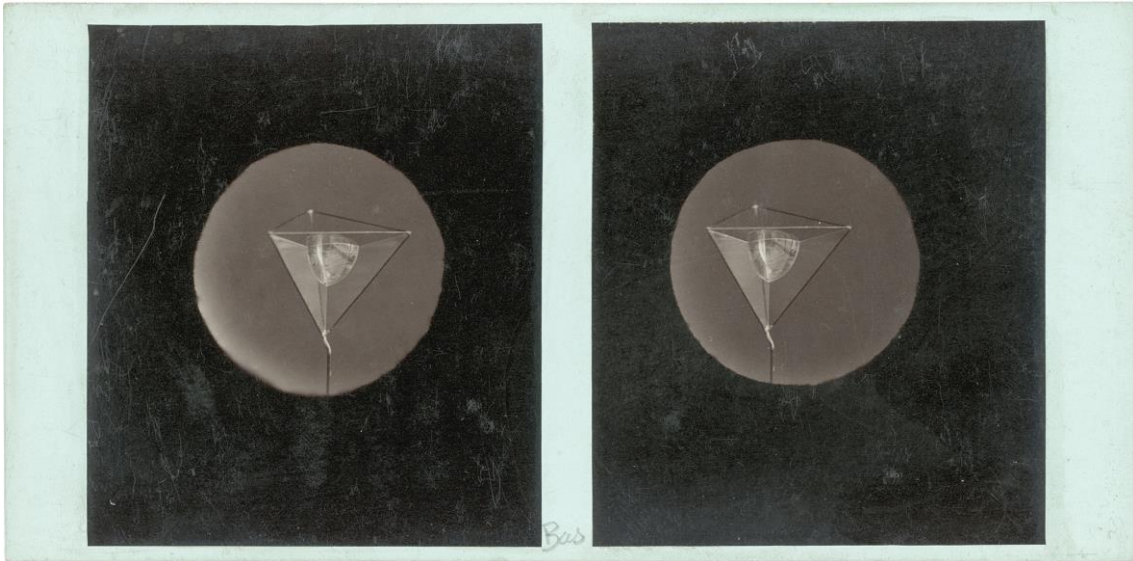


Fig. 15.11. A. Neyt, ca.1880. Estructura laminar de superficie mínima contenida por un tetraedro
 © Museum for the History of Sciences, Ghent University

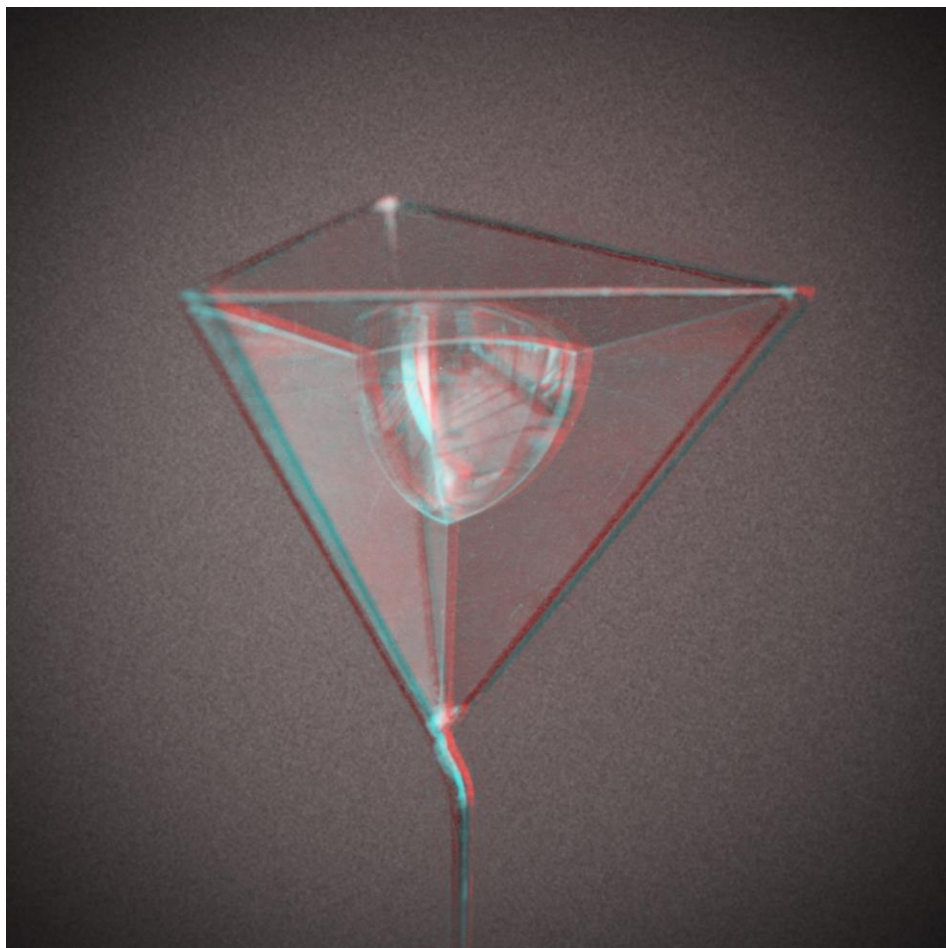


Fig. 15.12. Anaglifo construido a partir del par anterior. Pedro Cabezos



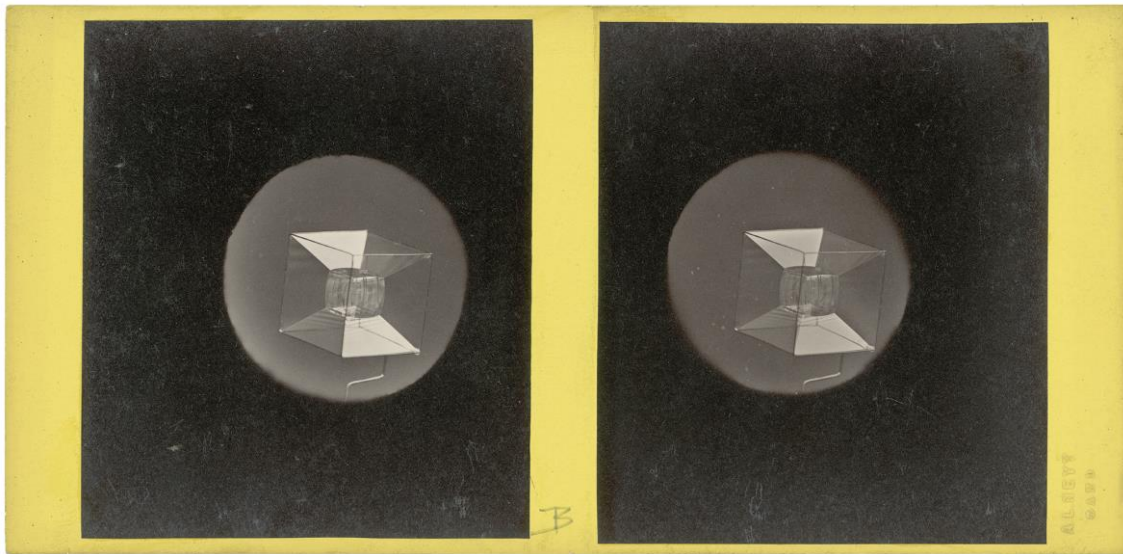


Fig. 15.13. A. Neyt, ca.1880. Estructura laminar de superficie mínima contenida por un hexaedro
 © for the History of Sciences, Ghent University

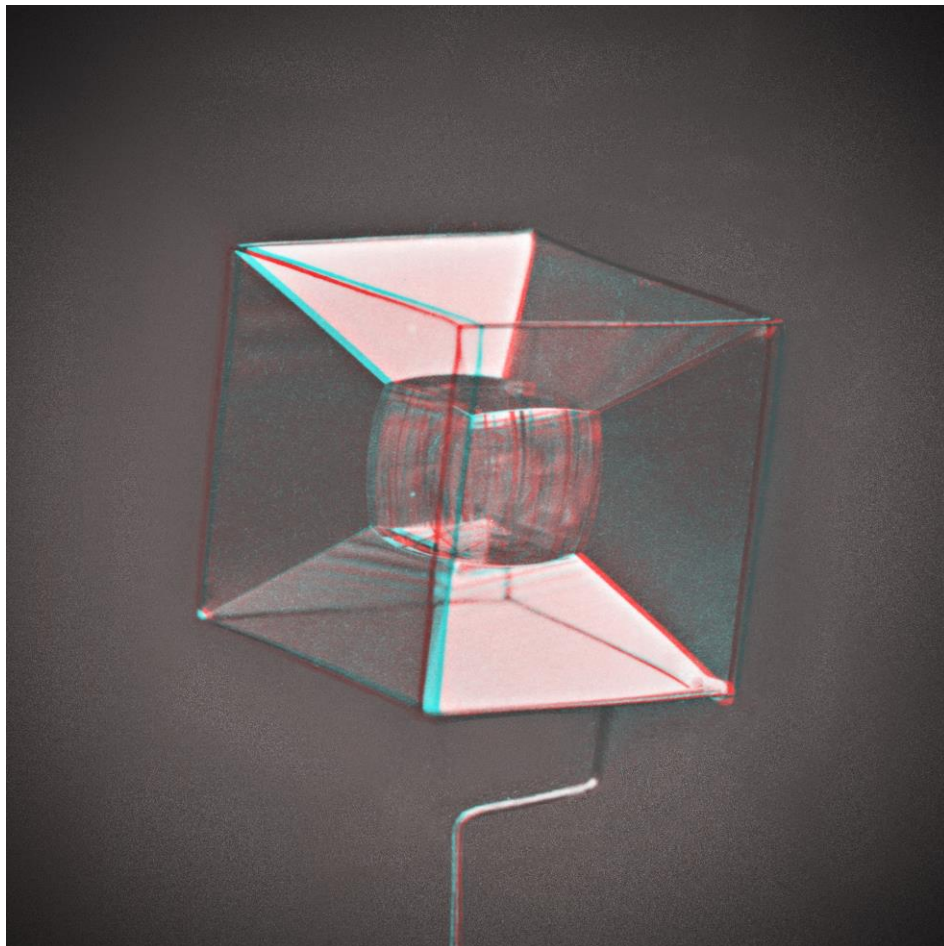


Fig. 15.14. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos



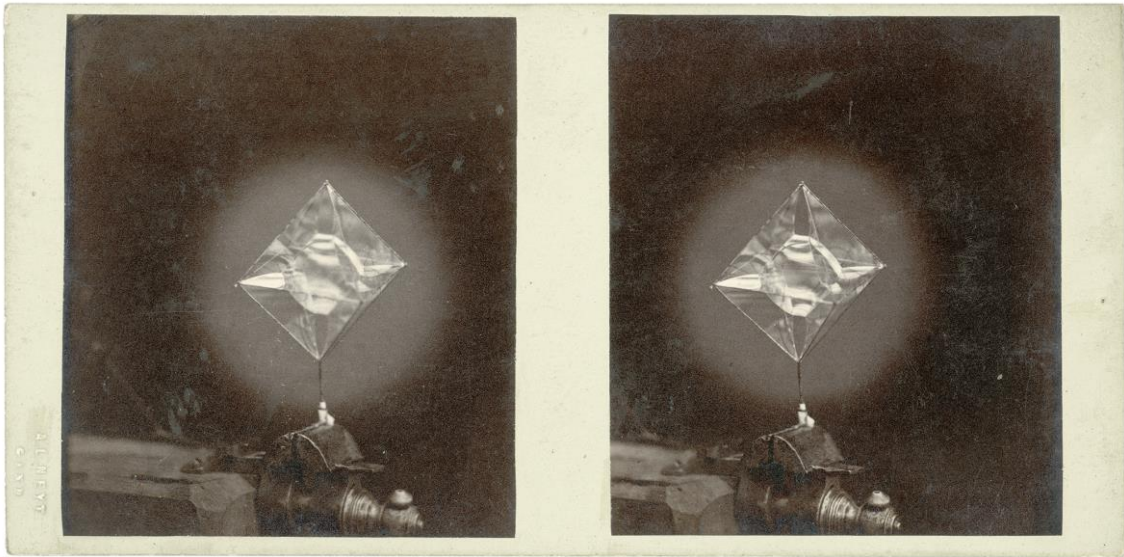


Fig. 15.15. A. Neyt, ca.1880. Estructura laminar de superficie mínima contenida por un octaedro
 © Museum for the History of Sciences, Ghent University

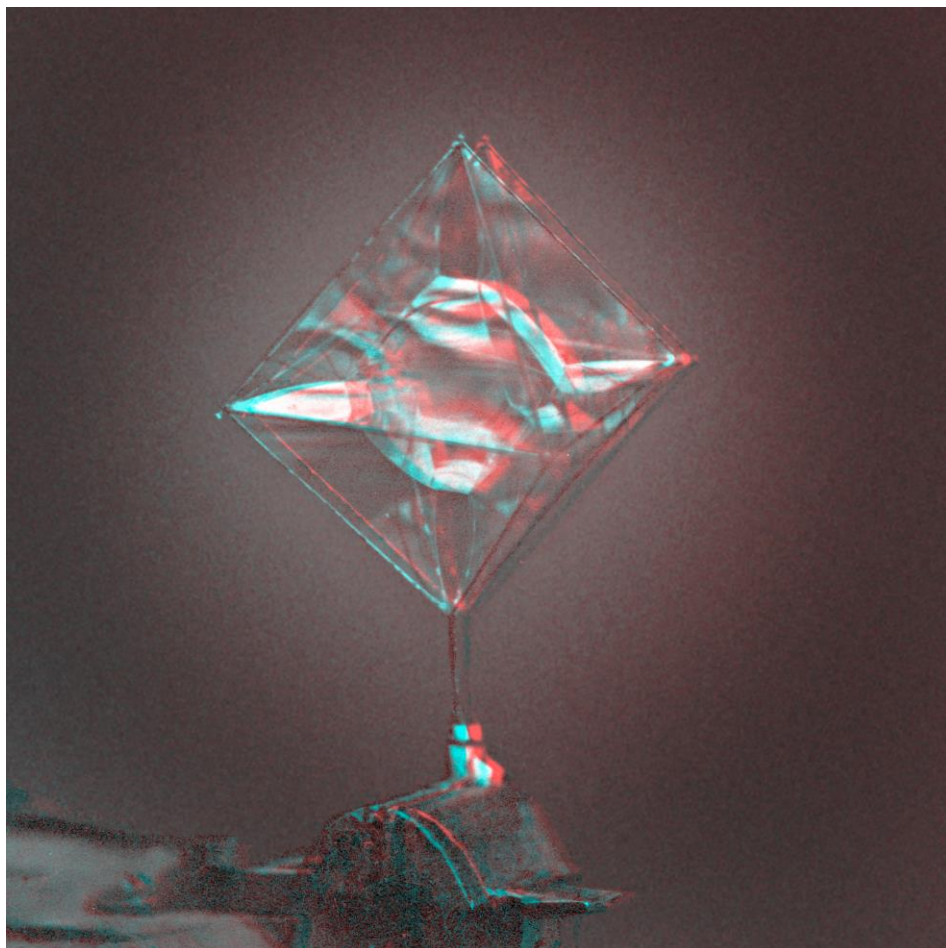


Fig. 15.16. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos



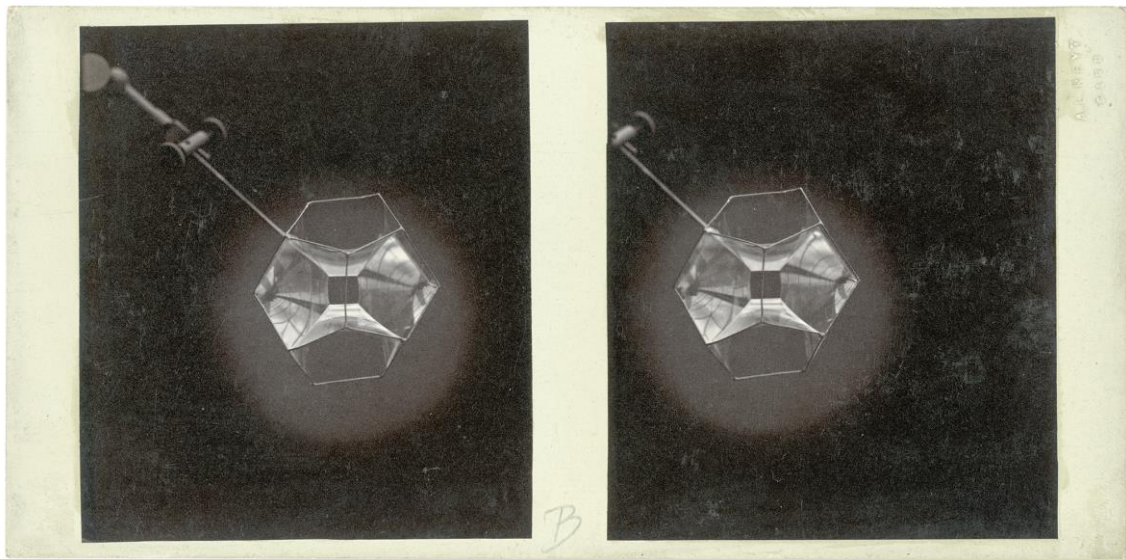


Fig. 15.17. A. Neyt, ca.1880. Estructura laminar de superficie mínima contenida por un dodecaedro
 © Museum for the History of Sciences, Ghent University

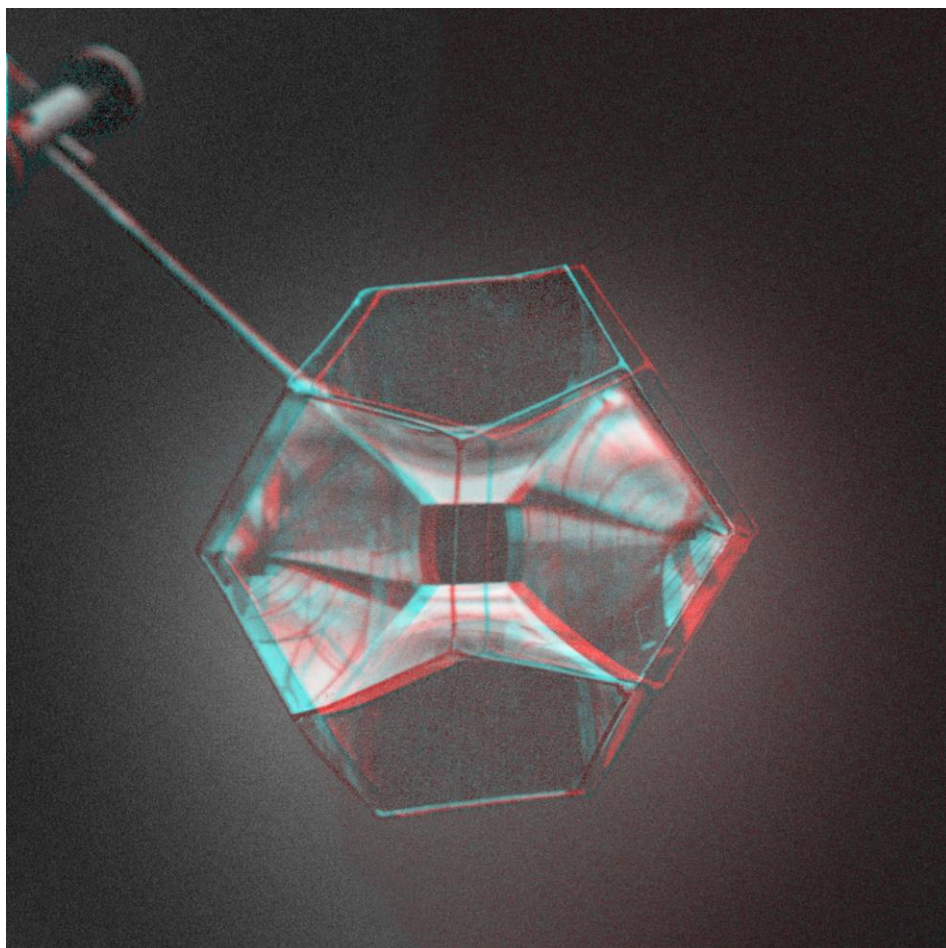


Fig. 15.18. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos



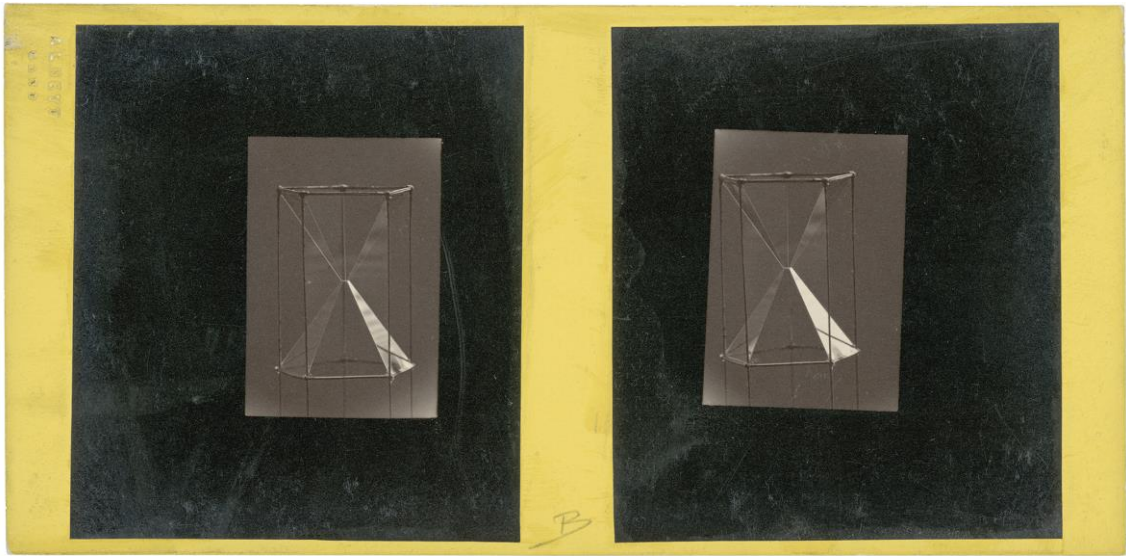


Fig. 15.19. A. Neyt, ca.1880. Estructura laminar de superficie mínima contenida por un prisma pentagonal
 © Museum for the History of Sciences, Ghent University

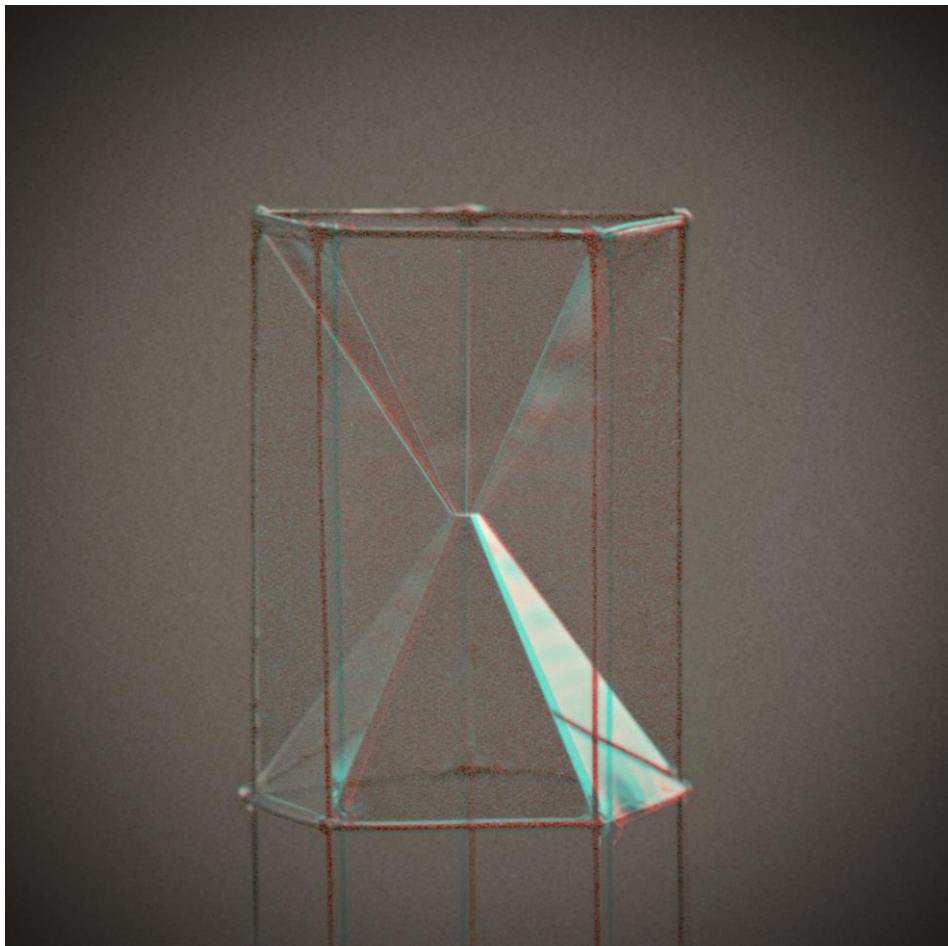


Fig. 15.20. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos



15.4. La estereoscopia y la fotogrametría

La idea de obtener datos métricos a partir de fotografías surge poco después de que esta haya sido dada a conocer. El periodista, dibujante y gran retratista francés Gaspard Felix Tournachon (1820-1910), más conocido por el seudónimo de Nadar, era aficionado a la aeronáutica y muchos coinciden en indicar que él fue el primero en obtener fotografías aéreas, en 1858, cuando volaba con su globo aerostático sobre la localidad de Petit Bicêtre, actual Petit Clamart. Lamentablemente estas primeras fotografías no se han conservado, pero en la Fig. 15.22 se muestra una serie tomada por Nadar sobre París en 1868.

Nadar intuye que aquellas fotografías podrían utilizarse como base para la realización de planos y el 23 de octubre de 1858 registra la invención de “Un nuevo sistema de fotografía aeroestática” que podría servir para efectuar levantamientos topográficos, hidrográficos, catastrales y para observaciones estratégicas.



Fig. 15.21. Gaspard-Félix Tournachon “Nadar” (1820-1910). Autoretrato

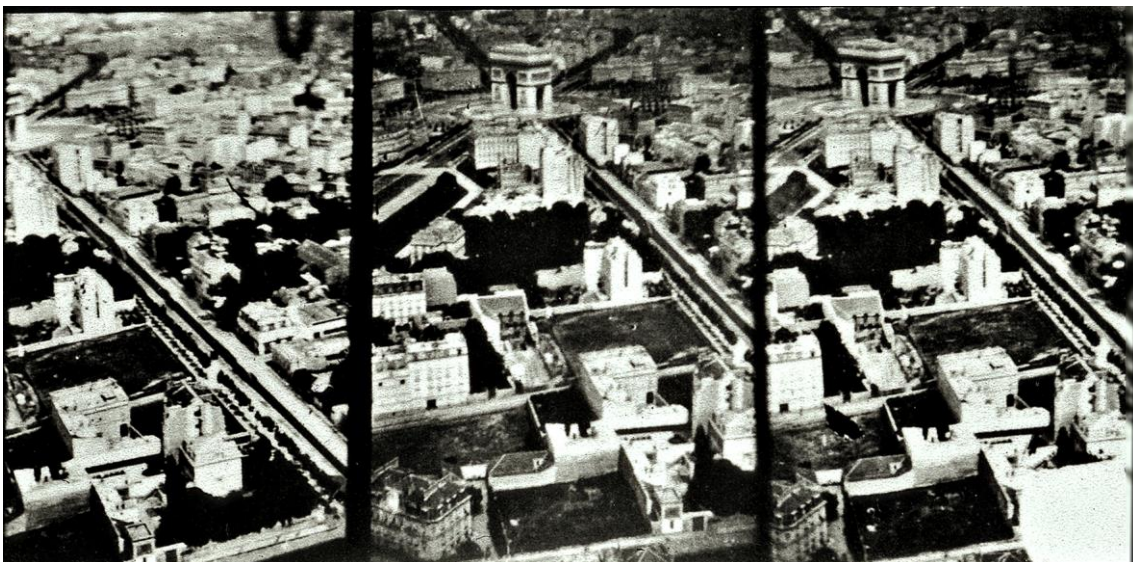


Fig. 15.22. Gaspard-Félix Tournachon “Nadar”, 1868, Serie de fotografías aéreas tomadas sobre París

Sin embargo, los fundamentos de la fotogrametría se desarrollaron inicialmente para su aplicación a la fotografía terrestre y uno de los pioneros fue el ingeniero militar Aimé Laussedat (1819-1904) que, apoyándose en los fundamentos de la Geometría Descriptiva, ideó un procedimiento gráfico de intersección de rayos visuales que denominó *Iconografía*, que usó para el levantamiento de planos cartográficos a partir de dibujos en perspectiva dibujados con la ayuda de una cámara lúcida²². De este modo realizó un levantamiento de la fachada de Los Inválidos, en 1849, y la planimetría del Castillo de Vincennes, en 1850 (Fig. 15.25). En 1852 comienza sus investigaciones para sustituir la cámara lúcida por una cámara oscura e idea el primer fototeodolito, que él denomina cámara oscura topográfica, que es construido en 1859 por el fabricante de instrumentos de precisión Brunner. Este aparato fue equipado con una lente fabricada por el óptico francés Bertaud que producía muy poca distorsión y gracias a la precisión de este nuevo instrumento logra realizar, en 1861, el primer levantamiento fotogramétrico de la historia, que corresponde a la planimetría de la Villa de Buc, próxima a Versalles. Con la introducción de la fotografía el método de Laussedat pasó a denominarse *Metrofotografía*.



Fig. 15.23 Aimé Laussedat (1819-1904)

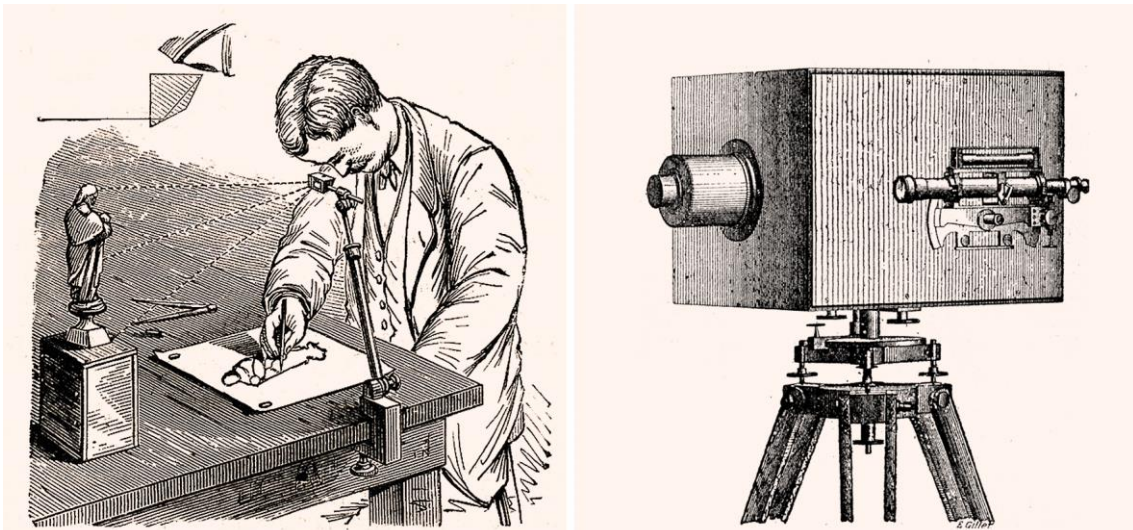


Fig. 15.24. Funcionamiento de una cámara lúcida (izda.). Fototeodolito empleado por Laussedat (dcha.)

²² Instrumento óptico ideado por J. Kepler y perfeccionado por W.H. Wollaston que, mediante un prisma de reflexión total, logra superponer sobre el papel una tenue imagen de la escena contemplada a través de una de las caras del prisma.

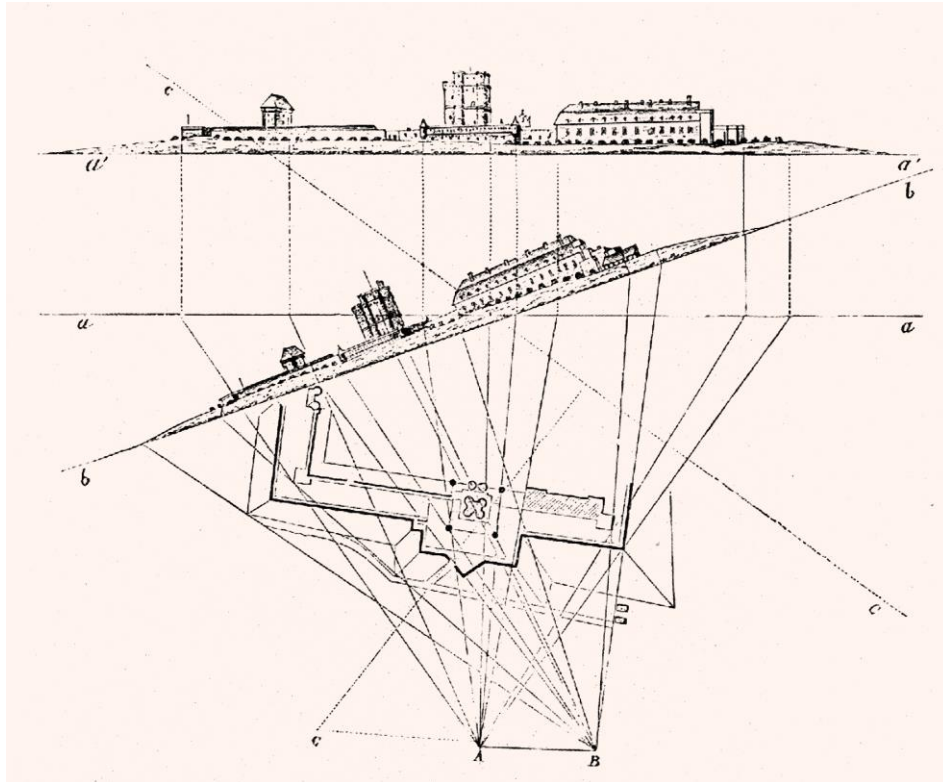


Fig. 15.25. Aimé Laussedat, 1850. Procedimiento gráfico para la obtención de la planimetría del Castillo de Vincennes a partir de dos perspectivas obtenidas con la cámara lúcida desde las posiciones A y B.

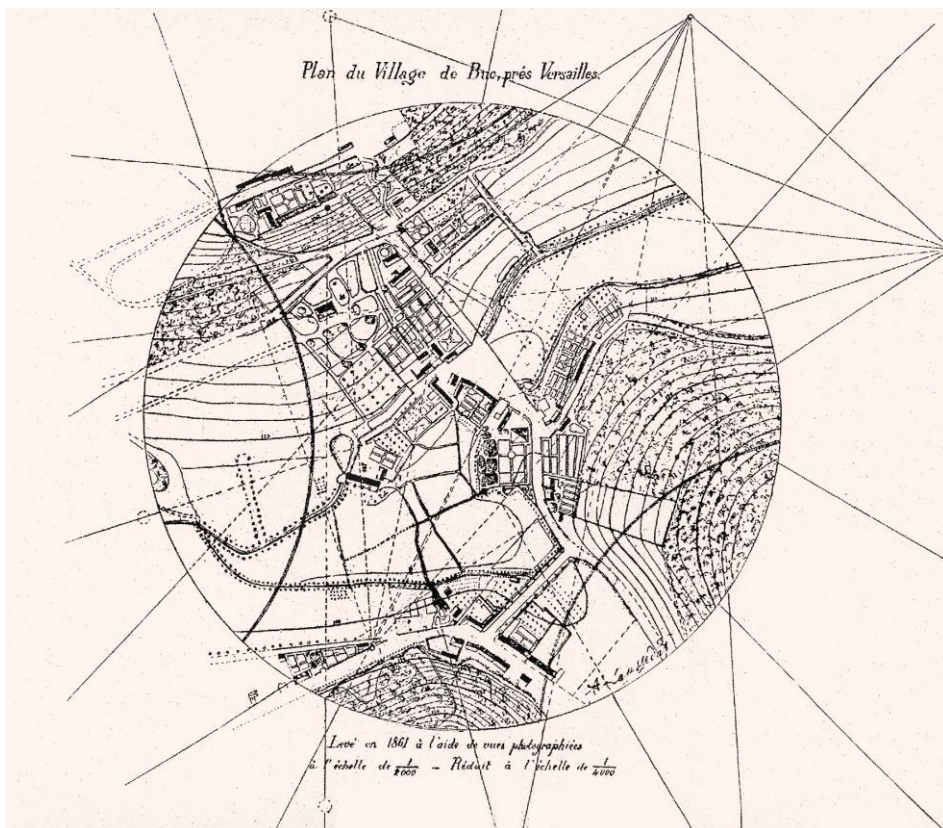


Fig. 15.26. Aimé Laussedat, 1861. Primer levantamiento fotogramétrico de la historia. Villa de Buc

Paralelamente a los estudios de Laussedat, el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer (1834-1921), desarrollaba, de forma independiente, sus investigaciones en este campo y por ello es considerado otro de los padres de la fotogrametría, a la que dio su nombre, que se generalizó a raíz de uno de sus artículos (Meydenbauer, 1867). Meydenbauer creó un método gráfico de restitución fotogramétrica de intersección parecido al de Laussedat, destinado a la restitución de objetos próximos, principalmente al levantamiento de bienes arquitectónicos. El método de intersecciones de Meydenbauer requería dos o más fotografías de plano del cuadro vertical, que no debían tener distorsiones para que pudieran emplearse con fidelidad las propiedades restitutivas del sistema cónico. Pronto se dio cuenta de que aquellas condiciones eran difícil de lograr con las cámaras comerciales convencionales, así que tuvo que diseñar sus propias cámaras.

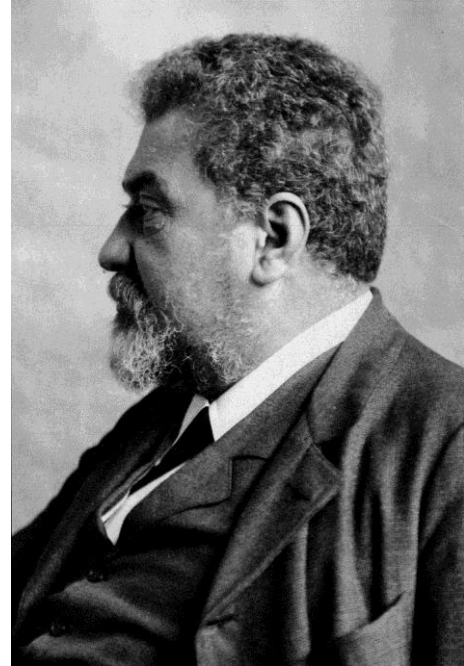


Fig. 15.27. Albrecht Meydenbauer (1834-1921)

El primer modelo de cámara diseñado por Meydenbauer ya era muy avanzada para su época; contaba con un grandioso objetivo Pantoskop, fabricado por Emil Busch, cuya calidad óptica resulta, todavía hoy, difícil de superar. La distancia focal de 25 cm y el tamaño de placa de 30x30 cm, proporcionaba un gran campo visual que resultaba ideal para la fotogrametría arquitectónica. Además la cámara contaba con un dispositivo de presión para garantizar la planeidad de la placa fotosensible durante la exposición y en ésta quedaban registradas las marcas fiduciales, que permitían determinar el punto principal de la fotografía. El trípode contaba con un sistema de nivelación exquisito para garantizar el correcto aplomado de la cámara. En 1879 incorporó una importante mejora; el objetivo descentrable, que permitía encuadrar los edificios altos, al ser tomados a corta distancia. También aumentó el tamaño de la placa a 40x40 cm para mejorar la precisión en la determinación gráfica de los puntos.

En 1885 Meydenbauer fue llamado por el Ministerio de Cultura de Prusia para establecer y dirigir el Instituto Fotogramétrico, donde instruyó al personal que le ayudaría a la importante labor de documentar el patrimonio arquitectónico de Prusia. Durante la labor de Meydenbauer al frente del instituto entre 1885 y 1909, se documentaron más de 1300 monumentos del Imperio Alemán y se tomaron 800 fotografías de edificios históricos de Atenas, Baalbek y Estambul. Gracias al legado fotográfico de Meydenbauer y su equipo fue posible reconstruir fielmente muchos de los monumentos de Berlín tras la segunda guerra mundial (Albertz, 2002).

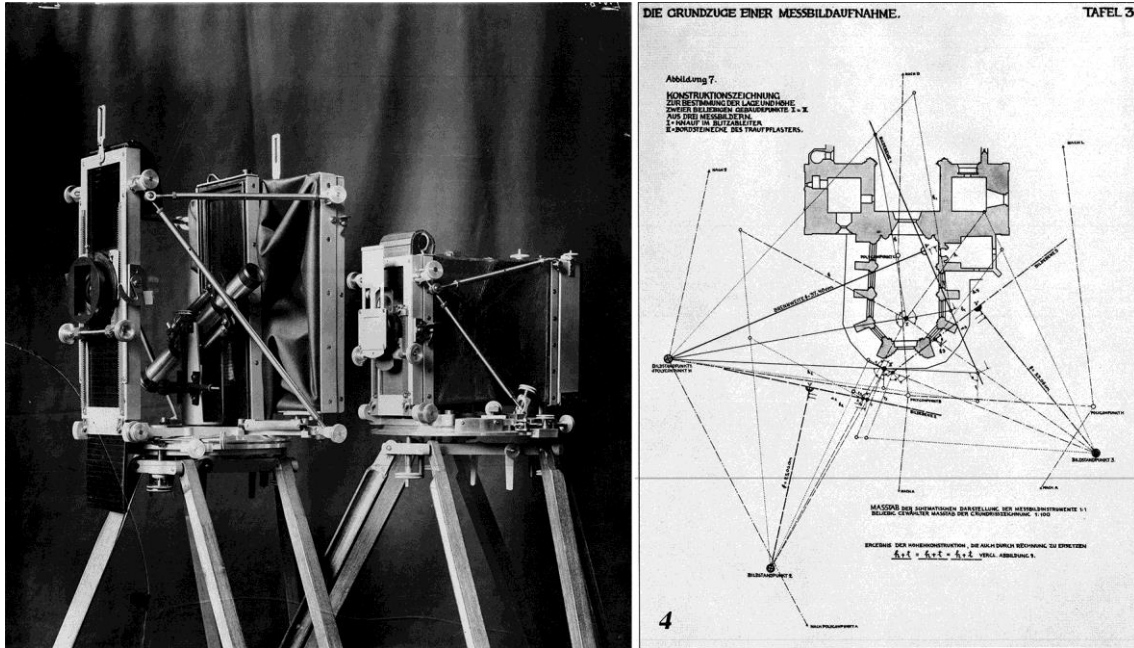


Fig. 15.28. Cámaras diseñadas por Meydenbauer y procedimiento gráfico para la restitución en planta



Fig. 15.29. A. Meydenbauer, 1882. *Catedral Francesa de Berlín*. Positivado de placa de vidrio de 40x40 cm al Gelatino-bromuro

El inconveniente que presentaban los métodos gráficos de Laussedat y Meydenbauer era la detección manual de los puntos homólogos para determinar las intersecciones y el laborioso proceso de dibujo que requería la restitución.

El proceso analítico había sido ya resuelto en 1863 por el general español Antonio Terrero, quien estableció las relaciones entre los puntos del objeto y los correspondientes en su imagen, relación que se llamó después *teorema de Hauck* por un estudio posterior publicado por el profesor alemán del mismo nombre, que tuvo más repercusión. La resolución analítica planteaba el inconveniente del gran número de operaciones matemáticas que conllevaba, por lo que no era viable en un momento en el que no existían los ordenadores.

La solución vino en 1892 de la mano de Franz Stolze, colaborador de Meydenbauer, que pensó en aplicar la estereoscopia como medio de restitución, pero la restitución estereoscópica fue posible gracias al *Estereocomparador* desarrollado en 1901 por el físico alemán Carl Pulfrich (1858-1927) que trabajaba para la casa Carl Zeiss de Jena (Juliá, 2000).

El principio era bien sencillo; cuando uno observa un modelo estereoscópico, siente la tentación de tocarlo con sus dedos y es capaz de situarlo en el espacio, por lo que, en esencia, el método de restitución estereoscópico consiste en señalar en el espacio, con un estilete o marca móvil, puntos que aparentemente se encuentren sobre el modelo percibido y medir sus coordenadas para poder representar todos esos puntos sobre el papel. Este principio requería emplear la técnica hiperestereoscópica para obtener un modelo perceptivo a escala y posicionar el par convenientemente ante los ojos del operador para que no se produjeran distorsiones volumétricas. El estereocomparador de Pulfrich fue perfeccionado en 1909 por el ingeniero del ejército austriaco Eduard Von Orel, que creó el Estereoautógrafo, que disponía de un sistema de varillas conectadas a un instrumento gráfico que permitía trazar directamente sobre una mesa de dibujo los puntos señalados sobre el modelo perceptivo. La casa Zeiss se interesó por el aparato

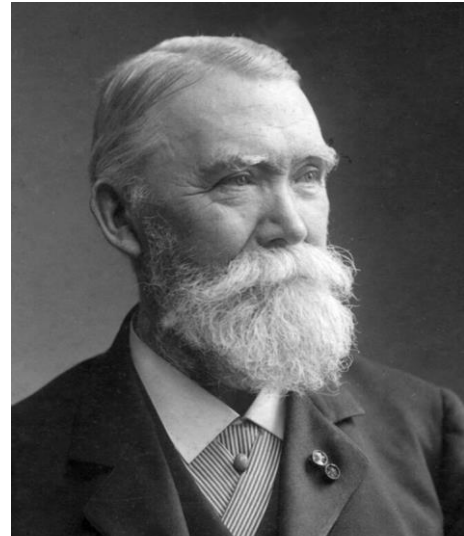


Fig. 15.30. Franz Stolze (1836-1910)



Fig. 15.31. Carl Pulfrich (1858-1927)

de Von Orel y desarrollaron conjuntamente el Estereoautógrafo Orel-Zeiss, que vio la luz en 1911, obteniendo un éxito tan rotundo, que garantizó la hegemonía de los restituidores analógicos de la marca durante décadas (Chueca et al, 2008).

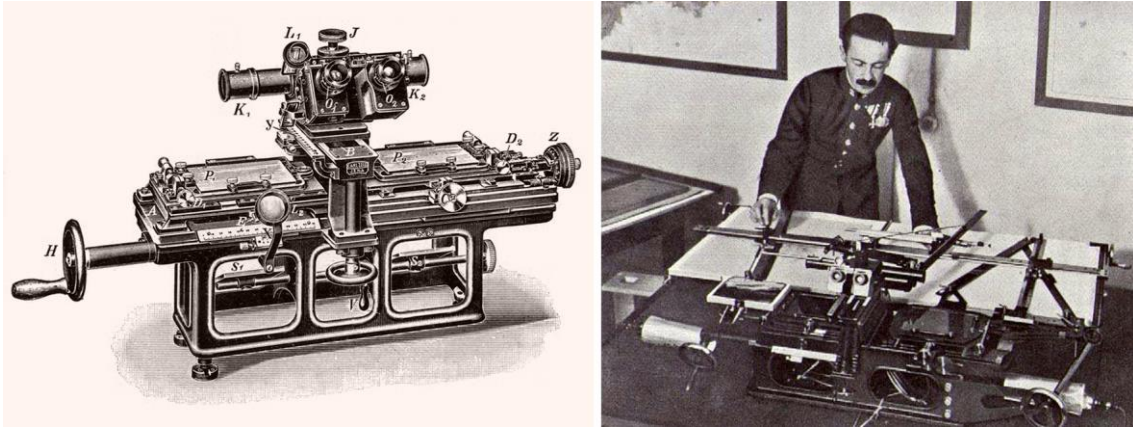


Fig. 15.32. Estereocomparador Pulfrich, 1901 (izda). Von Orel y su Estereoautógrafo, 1909 (dcha)

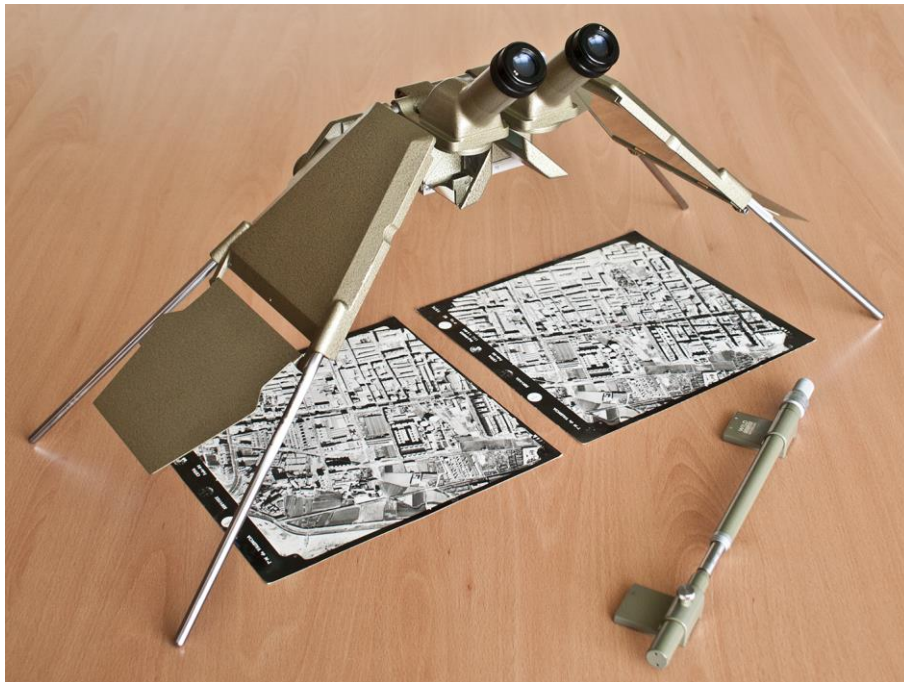


Fig. 15.33. Estereoscopio de espejos Wild con barra de paralaje, 1963. Aparato cortesía de Pablo Navarro

Además de los complejos restituidores analógicos, en fotointerpretación se utilizaron dispositivos más sencillos como los estereoscopios de espejo con lentes de aumento, que solían venir equipados con una barra de medición de paralajes micrométrica para determinar de forma analítica las diferencias de cota entre los puntos del modelo (Fig. 15.33). A finales del s. XX el complejo y pesado sistema mecánico de los restituidores analógicos fue sustituido por un ordenador en los restituidores digitales. Actualmente, estos métodos fotogramétricos están dando paso a la fotogrametría digital automatizada con el desarrollo de la fotomodelación SfM (Structure from Motion).

15.5. Santiago Ramón y Cajal

El eminente científico aragonés Santiago Ramón y Cajal fue un gran amante de la fotografía; su ávida curiosidad y su inteligencia le llevaron a dominar todos los aspectos de este arte, desde los más complejos y técnicos hasta los más artísticos, incluyendo los métodos de la fotografía estereoscópica que fue la que practicó con mayor fervor.

Su pasión por la fotografía le llevó a publicar algunos textos que reflejan su experiencia y erudición en los que deja ver, con la frescura que le caracterizaba, su amor por este arte.

En la introducción de su libro *La fotografía de los colores*, dice lo siguiente acerca de la fotografía:

“Yo debo a la fotografía satisfacciones y consuelos inenarrables. Por agradecimiento a este noble arte escribo este librito. Deseo celebrar lo que tanto amé, lo que es tan digno de cautivar a todo espíritu sensible y curioso de las bellezas naturales”

(Ramón y Cajal, 1912)

El vasto conocimiento de Ramón y Cajal de los procedimientos químicos de la fotografía le permitió mejorar algunos procesos y aplicó todos sus conocimientos a documentar sus descubrimientos en el campo de la neurología, mediante la toma de fotografías estereoscópicas a través del microscopio, lo que, en aquella época, era toda una proeza.

Sus estéreo-microfotografías fueron publicadas en 1918 en su artículo: *La microfotografía estereoscópica y biplanar del tejido nervioso*. Afortunadamente, estas fotografías han sido reeditadas en el estéreo libro publicado por el Profesor Antonio Bergua, de la Universidad de Erlangen-Nuremberg. (Bergua, 1999).

El hecho de lograr producir algo de relieve a partir de una muestra de microscopio tan fina resulta bastante complicado y para ello deben emplearse los métodos de captura hipostereoscópicos, en los que la distancia base es muy reducida. Según explica el profesor Bergua, Ramón y Cajal llegó a probar hasta 11 métodos diferentes para conseguir el efecto estereoscópico, pero el que mejor resultados le proporcionó fue el descrito por Gebhardt (1899), que consistía en emplear un diafragma ligeramente excéntrico delante de la lente condensadora del microscopio, que se rotaba 180° entre

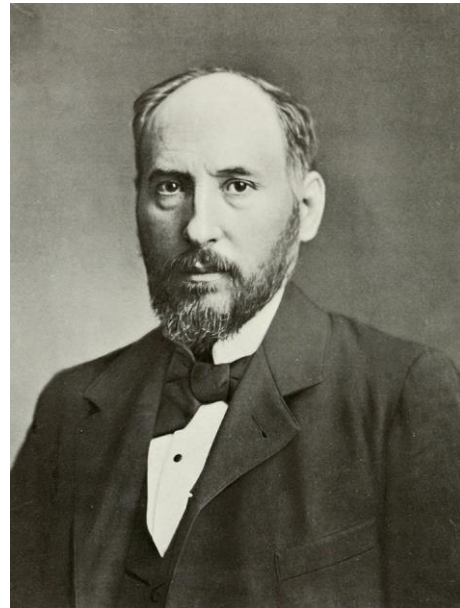


Fig. 15.34. Santiago Ramón y Cajal (1852-1934)

las tomas, para lograr obtener de este modo dos puntos de vista diferentes de la muestra.

Para tomar las fotografías Ramón y Cajal alineaba el eje óptico de la cámara con el visor del microscopio, dejando un pequeño espacio entre ambos para evitar vibraciones. La operación de enfoque resultaba crucial y requería de una pericia extrema, ya que debían emplearse objetivos de larga distancia focal en los que la profundidad de campo es exigua.

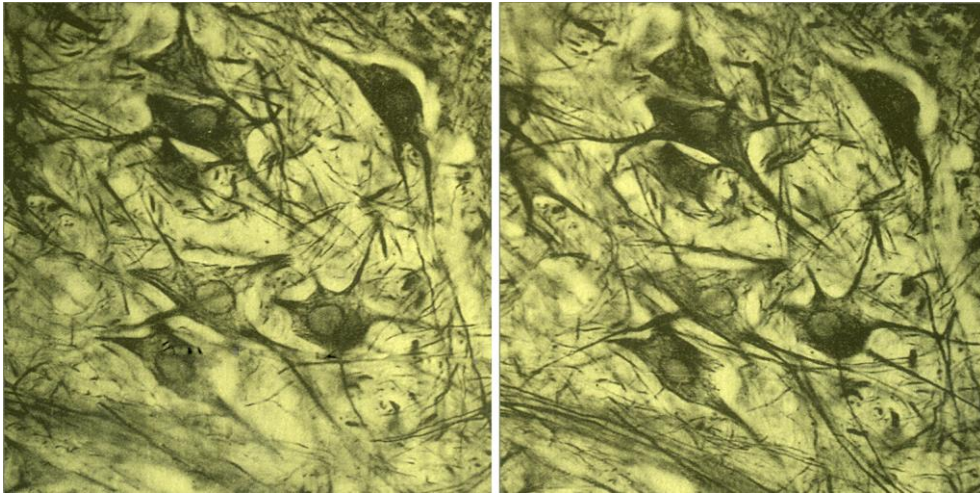


Fig. 15.35. Santiago Ramón y Cajal, ca.1918. *Neuronas del asta anterior de la médula de un gato de 8 días* (Bergua, 1999)

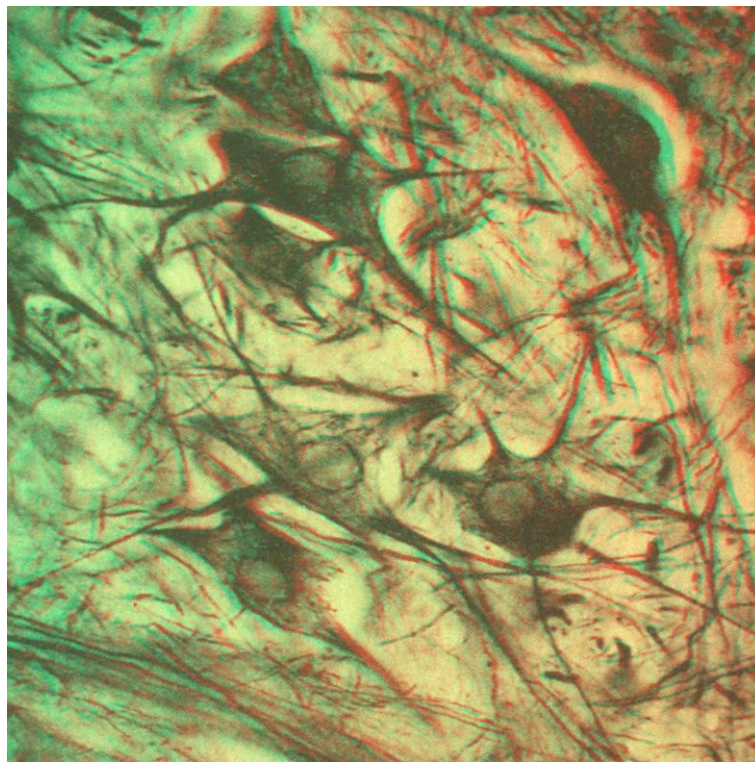


Fig. 15.36. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos



Las aportaciones de Ramón y Cajal en el campo estereoscópico son realmente fascinantes, como el sistema de escritura secreta que describe en su artículo titulado *Recreaciones estereoscópicas y binoculares*, publicado en el nº2 de la revista *La Fotografía* (Ramón y Cajal, 1901). Este sistema de escritura secreta es, tal como veremos a continuación, un claro precedente de los estereogramas de puntos aleatorios de Bela Julesz. Cajal introduce esta invención de esta maravillosa manera:

“Durante mi luna de miel estereoscópica, es decir, allá por los años 70 al 72, andaba yo engolfado en imaginar nuevos caprichos y recreaciones de este género. Mi propósito era lograr una escritura misteriosa, que sólo pudiera ser descifrada con el estereoscopio, y capaz de servir para la correspondencia entre personas a quienes importe no divulgar sus asuntos. En realidad, mi pequeña invención es un juego pueril indigno de publicación; pero a mí me entretuvo agradablemente por entonces, y pudiera ser que otros se recreen también con este pasatiempo. Esta consideración nos mueve a referirlo”
(Ramón y Cajal, 1901:43)

El sistema consistía en fotografiar estereoscópicamente un fondo que tuviera una textura granulada aleatoria, sobre el que se colocaba un vidrio transparente, separado unos 10 o 15 cm, que contenía los trazos de la escritura que se pretendía codificar estereoscópicamente. Para conseguir un buen efecto, los trazos de la escritura debían ser discontinuos y simular el tipo de granulado de la imagen del fondo. La Fig. 15.37 muestra el esquema descriptivo que contenía el artículo original.

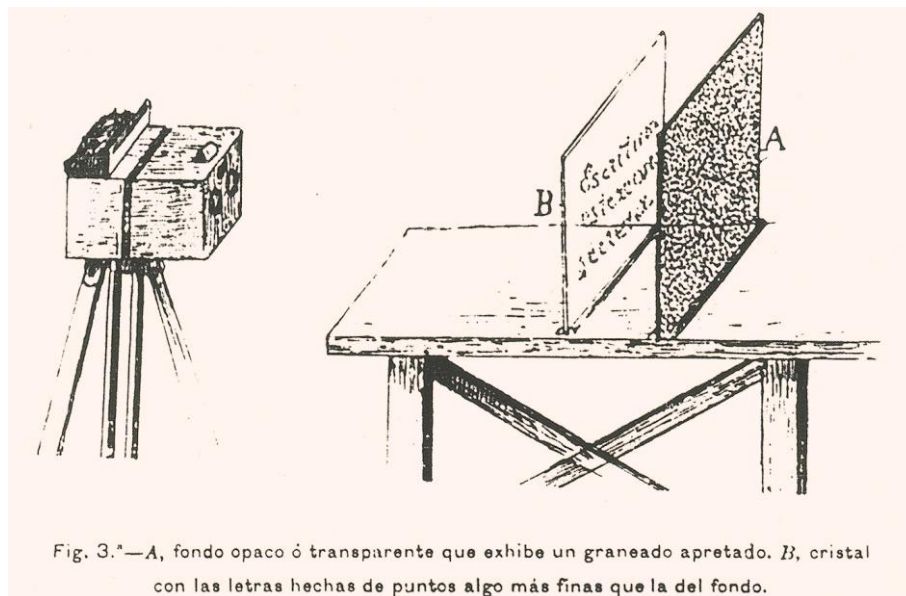


Fig. 15.37. Método de escritura secreta de Cajal. (Ramón y Cajal, 1901:44)

Para poder descifrar el mensaje sería necesario contemplar el par obtenido con un estereoscopio, con lo que se percibiría el mensaje en relieve, destacándose del fondo.

Para que el mensaje no fuera interceptado, Cajal propone enviar al receptor, por separado, las imágenes que componen el par, de modo que la segunda imagen sólo debería ser enviada tras haberse confirmado la recepción de la primera.

En este mismo artículo Cajal describe otras interesantes invenciones para poder observar tomas panorámicas, poniendo de manifiesto la limitación del tamaño de la placa que imponen los estereoscopios de mano convencionales. Para solventar este inconveniente presenta dos aparatos que pueden servir para visualizar fotografías apaisadas de mayor tamaño y para visualizar panoramas en rollo tomados con cámaras especiales como la *Cylindrograph* de 1890.

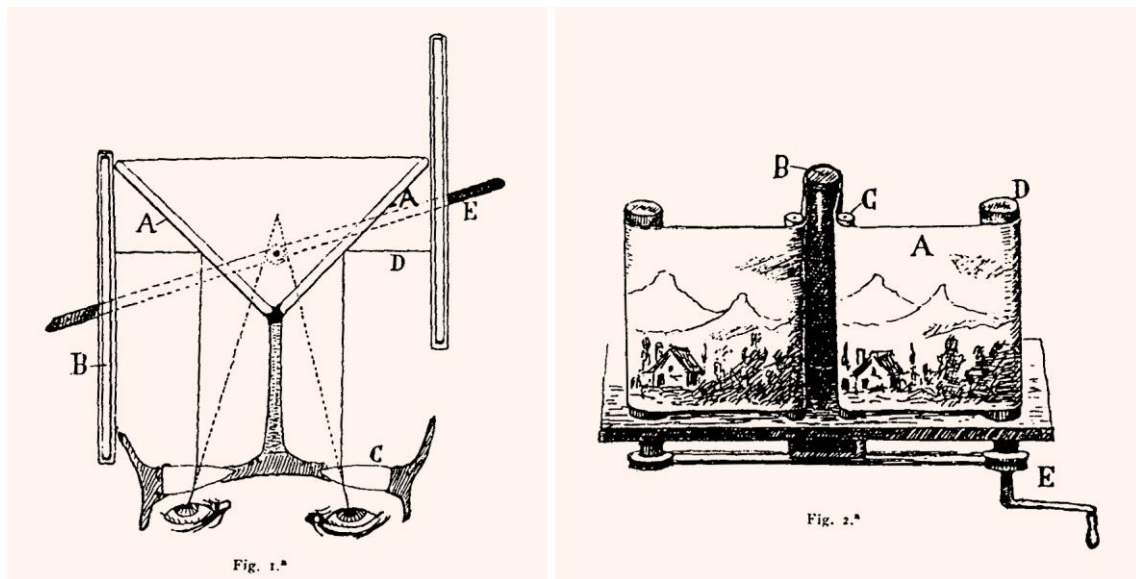


Fig. 15.38. Aparatos para observar fotografías panorámicas. (Ramón y Cajal, 1901:41-42)

El primero es un estereoscopio de espejos, muy parecido al de Wheatstone, equipado con lentes para facilitar la fusión y con un sistema de balancín que permite desplazar las imágenes paralelamente y en sentido contrario, para que el espectador pueda recorrerlas visualmente, mientras acciona los brazos de este balancín (Fig. 15.38, izda.).

El segundo aparato debe utilizarse en combinación de un estereoscopio de mano y permite visualizar estereoscópicamente dos panoramas en rollo. El funcionamiento de este aparato queda muy claro en el esquema presentado por Cajal (Fig. 15.38, dcha.). Para que el espectador pueda recorrer visualmente el panorama, se debe accionar la manivela que hace girar los carretes en los que se enrolla la imagen estereoscópica, produciendo un desplazamiento lateral y sincronizado del par.

Cajal escribió también otro interesante artículo (Cajal, 1910) en la que describe un sistema de obtención alternativo y más económico al patentado por F. Yves para la

captura de estereofotografías para el visionado autoestereoscópico con barrera de paralaje, visto en el capítulo de los medios de visionado.

Quizá sea su vertiente como fotógrafo de calle, una de las más desconocidas de Ramón y Cajal. Personalmente he podido descubrir esta faceta gracias a la excelente labor del profesor aragonés José Antonio Hernández Latas de la Universidad de Zaragoza, que ha recopilado y catalogado las fotografías estereoscópicas de los viajes de Ramón y Cajal, pertenecientes al archivo familiar. A raíz de este trabajo de investigación se realizó una exposición y se publicó el libro *Viajes Fotográficos de Santiago Ramón y Cajal* (Hernández, 2000).

Cuando vi este libro por primera vez, me quedé realmente asombrado de la calidad compositiva y técnica de las fotografías, que fueron tomadas con una Verascope; una de las cámaras estereoscópicas más populares de la época.

Estas imágenes tienen un gran valor histórico porque documentan los lugares que visitó Cajal hace más de 100 años, además de mostrar las modas y costumbres de la época. Las fotografías tomadas por Cajal denotan que su talento no sólo era científico, sino que resultó ser también un gran fotógrafo humanista que, además de interesarse por el lugar y la arquitectura, proporciona un fiel reflejo de la sociedad del momento. Al contemplar algunas de las fotografías de Cajal han venido a mi mente la obra de maestros de la fotografía humanista como Robert Doisneau o Cartier-Bresson.

En el libro se reproduce el positivo de la placa de vidrio estereoscópica a su tamaño real (4,5x10,7 cm) y se amplía una de las imágenes que compone el par para apreciar los detalles de la fotografía. La obra consta de tres volúmenes que recogen los viajes de Ramón y Cajal de París a Estados Unidos, 1899 (Vol. 1), Italia, 1903 (Vol. 2) y Londres, 1908 (Vol. 3).

Me ha parecido muy interesante incluir tres ejemplos de estas fotografías, una de cada viaje, por su valor histórico y su calidad artística, añadiendo una versión en anaglifo, para recrear el efecto estereoscópico y poder disfrutar de estas fotografías, al igual que lo hiciera Don Santiago con su estereoscopio.

No quisiera terminar este homenaje a la figura de Ramón y Cajal sin añadir una última cita para saborear el talento literario mostrado en sus escritos, que hace de su lectura un deleite continuo que invita a la reflexión.

“La fotografía no es deporte vulgar, sino ejercicio científico y artístico de primer orden y una dichosa ampliación de nuestro sentido visual. Por ella vivimos más, porque miramos más y mejor. Gracias a ella, el registro fugitivo de nuestros recuerdos conviértese en copiosa biblioteca de imágenes, donde cada hoja representa una página de nuestra existencia y un placer estético redivivo”

(Ramón y Cajal, 1912)



Fig. 15.39. Santiago Ramón y Cajal, 1899. *Vendedores ambulantes en Union Square. Nueva York*
 Positivo de vidrio al gelatino-bromuro, 4,5 x 10,7 cm (Hernández, 2000:T1:62)
 Colección Familia Ramón y Cajal Agüeras



Fig. 15.40. Anaglifo realizado a partir del par estereoscópico anterior. Pedro Cabezas





Fig. 15.41. Santiago Ramón y Cajal, 1903. *Grupo de muchachos delante del Templo de Vesta, Roma*
 Positivo de vidrio al gelatino-bromuro, 4,5 x 10,7 cm (Hernández, 2000:T2:99)
 Colección Familia Ramón y Cajal Agüeras



Fig. 15.42. Anaglifo realizado a partir del par estereoscópico anterior. Pedro Cabezas





Fig. 15.43. Santiago Ramón y Cajal, 1908. *Western Avenue, Exposición Franco-Británica, Londres*
 Positivo de vidrio al gelatino-bromuro, 4,5 x 10,7 cm (Hernández, 2000:T3:65)
 Colección Familia Ramón y Cajal Agüeras

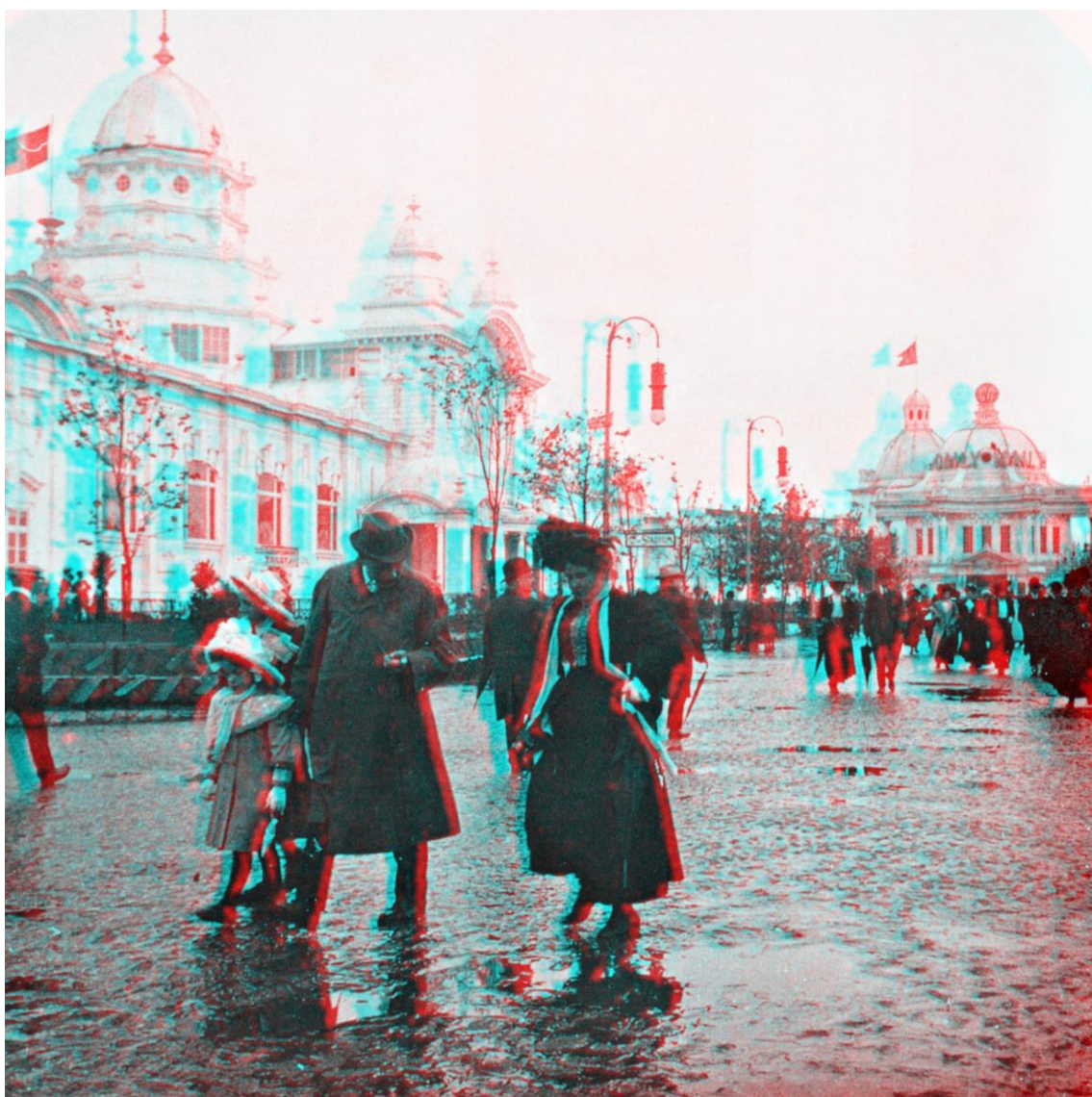


Fig. 15.44. Anaglifo realizado a partir del par estereoscópico anterior. Pedro Cabezos



15.6. Demetrio Ribes y su cámara estereoscópica

Para finalizar con esta revisión histórica quisiera honrar la memoria del arquitecto valenciano Demetrio Ribes Marco (1875-1921), uno de los arquitectos españoles más importantes de principios del s. XX y una figura clave del modernismo secesionista valenciano. En 1902 comienza a trabajar como arquitecto de la Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España, lo que le permitió abordar grandes proyectos de arquitectura civil como la ampliación de la Estación Príncipe Pio de Madrid, en la que colaboró con E. Grasset y J. D. Armagnac, y la Estación del Norte de Valencia.



Fig. 15.45. Demetrio Ribes Marco (1875-1921)

Ribes fue un gran aficionado de la fotografía estereoscópica y, al igual que Cajal, tuvo una cámara Verascope, que utilizaba un formato de placas ligeramente superior (6 x 13 cm). Con ella documentó sus viajes y las fases de ejecución de sus obras, que constituyen un valioso documento histórico en el que se reflejan los procesos constructivos del momento.

Algunas de las más de 700 fotografías realizadas por Ribes, salieron a la luz gracias a la exposición *La mirada de l'arquitecte. Demetrio Ribes i la seua càmera estereoscòpica*, realizada en 2007 en la Universidad de Valencia, dirigida por la Catedrática Inmaculada Aguilar Civera, Directora de la cátedra Demetrio Ribes, que realizó un gran trabajo de recopilación y catalogación de estas fotografías pertenecientes a la Colección Guillot-Ribes, conservada por los descendientes del arquitecto. La exposición vino acompañada de un interesante catálogo (Ribes, 2007), que incluye muchas de las fotografías en formato anaglifo, además de los interesantes textos de Inmaculada Aguilar y del historiador malagueño Juan Antonio Fernández Rivero.

He de agradecer encarecidamente a Toni Blanc, responsable de la Colección Guillot-Ribes, y a la empresa Heyphotos, que recientemente ha adquirido los derechos sobre las imágenes, por proporcionarme desinteresadamente tres fotografías inéditas de esta valiosa colección, que serán mostradas a continuación junto con otras publicadas en el catálogo. Estas fotografías documentan muy bien las tareas que se llevaron a cabo durante la construcción de los edificios gemelos de oficinas para la Estación Príncipe Pio de Madrid (1908-1909) y la construcción de la Estación del Norte de Valencia (1906-1917).

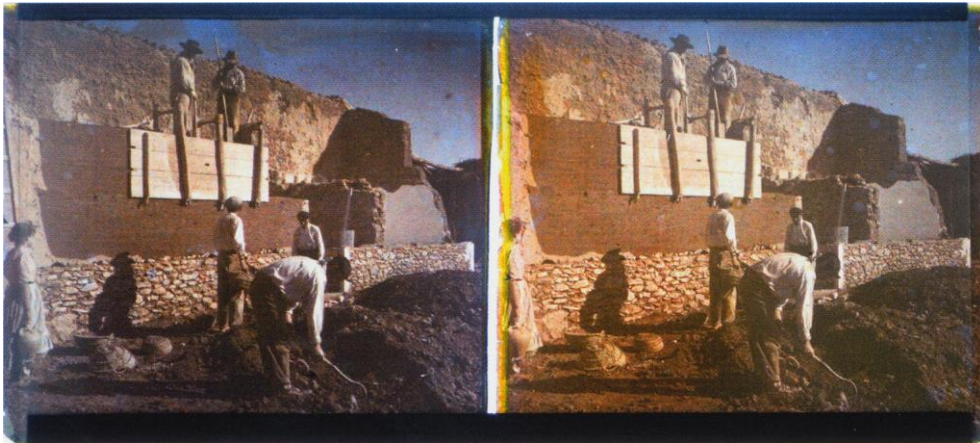


Fig. 15.46. Demetrio Ribes, 1908. *Ejecución de cimentación y muro de tapial. Estación Príncipe Pío. Madrid*

Placa de vidrio en color (Procedimiento autocromo de los hermanos Lumière), 13 x 6 cm (Ribes, 2007:272)
© Colección Guillot-Ribes



Fig. 15.47. Versión en anaglifo creada para el catálogo (Ribes, 2007:273)





Fig. 15.48. Demetrio Ribes, 1908. *Vista inédita de la construcción de los edificios gemelos de oficinas para la estación Príncipe Pío. Madrid. Placa de vidrio al gelatino-bromuro, 6 x 13 cm*
© Colección Guillot-Ribes

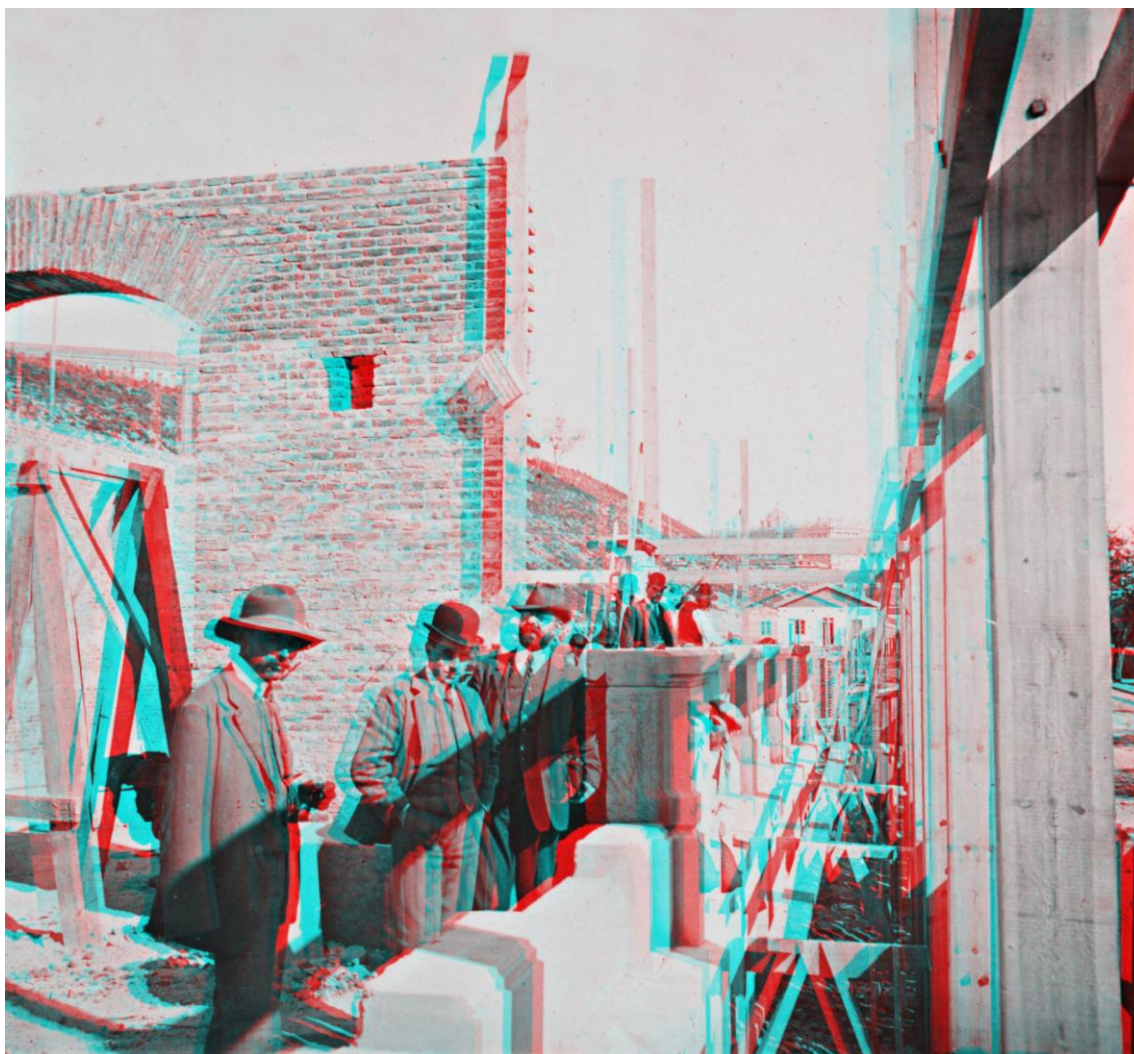


Fig. 15.49. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos





Fig. 15.50. Anónimo, 1909. *Demetrio Ribes sobre el andamio en la coronación del edificio de oficinas para la Estación Príncipe Pío*. Madrid 1909. Placa de vidrio al gelatino-bromuro, 6 x 13 cm (Ribes,2007:280)
© Colección Guillot-Ribes



Fig. 15.51 Versión en anaglifo creada para el catálogo (Ribes, 2007:281)





Fig. 15.52. Demetrio Ribes, ca.1909. *Vista inédita de la visita al taller de cantería en la que pueden verse tallados las piezas para los zócalos.* Placa de vidrio al gelatino-bromuro, 6 x 13 cm
© Colección Guillot-Ribes



Fig. 15.53 Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos





Fig. 15.54. Demetrio Ribes, ca.1910. Construcción de los muros del ala derecha del edificio de viajeros de la Estación del Norte. Valencia. Placa de vidrio al gelatino-bromuro, 6 x 13 cm (Ribes, 2007:288)
© Colección Guillot-Ribes



Fig. 15.55. Versión en anaglifo creada para el catálogo (Ribes, 2007:289)





Fig. 15.56. Demetrio Ribes, 1910. *Celosía metálica para la cubrición del ala derecha de la Estación del Norte. Valencia.* Placa de vidrio al gelatino-bromuro, 6 x 13 cm
© Colección Guillot-Ribes

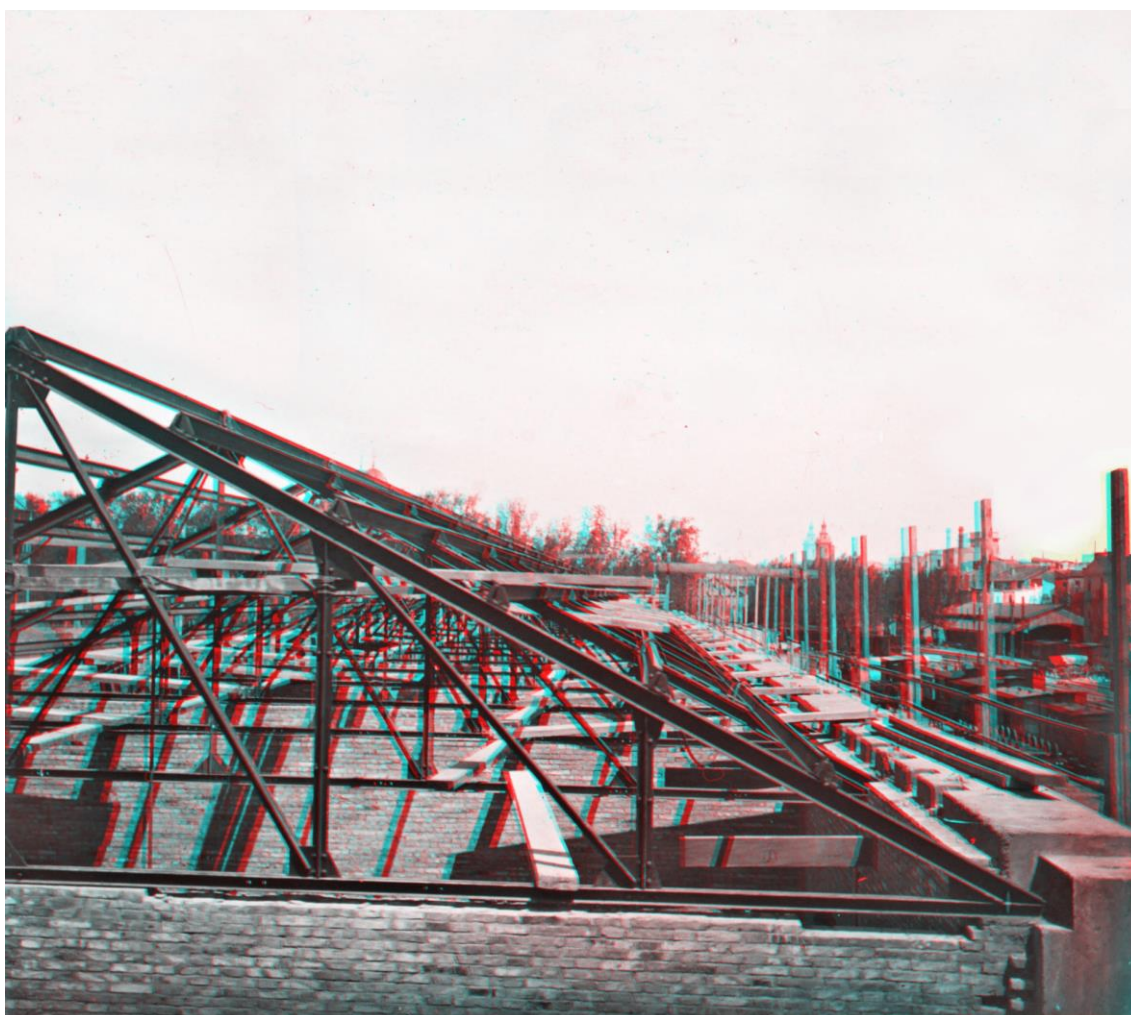


Fig. 15.57. Anaglifo realizado a partir del par anterior. Pedro Cabezos





Fig. 15.58. Demetrio Ribes, 1910. *Cubierta del ala derecha de la Estación del Norte. Bóvedillas de ladrillo, relleno y enfoscado de cemento.* Placa de vidrio al gelatino-bromuro, 6 x 13 cm (Ribes, 2007:290)
© Colección Guillot-Ribes



Fig. 15.59. Versión en anaglifo creada para el catálogo (Ribes, 2007:291)





Fig. 15.60. Demetrio Ribes, 1910. *Cubierta del ala derecha de la Estación del Norte. Tablero con listones de madera listo para recibir la teja.* Placa de vidrio al gelatino-bromuro, 6 x 13 cm (Ribes, 2007:292)
© Colección Guillot-Ribes



Fig. 15.61. Versión en anaglifo creada para el catálogo (Ribes, 2007:293). En esta vista puede observarse, al fondo y a la derecha, pegado a la plaza de Toros, la boca de entrada de Trenes a la antigua estación, que se encontraba ubicada en la actual Plaza del Ayuntamiento.

**16. LA FOTOGRAFÍA ESTEREOSCÓPICA
DEL s. XIX EN VALENCIA**

La fotografía estereoscópica nunca había sido del interés de los historiadores de la fotografía, seguramente porque no suele tratarse de una fotografía de autor, sino que está destinada a un público general. También quizá por la dificultad de valorar ciertos aspectos cualitativos, relacionados con la estereoscopia, para los que se requiere unos conocimientos específicos.

Afortunadamente esta tendencia está empezando a cambiar gracias a la publicación de algunos libros como *The World of Stereographs* del estadounidense Darrah (1977) y *La photographie stéréoscopique sous le second Empire*, del historiador francés Pellerin (1995). En el caso de España, uno de los pioneros del estudio de la fotografía estereoscópica ha sido el investigador malagueño Juan Antonio Fernández Rivero, cuyo libro: *Tres dimensiones en la historia de la fotografía. La imagen estereoscópica* (Fernández, 2004), es un excelente y completo manual para iniciarse en el conocimiento de la fotografía estereoscópica antigua.

Fernández Rivero ha colaborado también, junto con otros brillantes investigadores como Carlos Sánchez Gómez, Rafael Garófano y Javier Piñar, en la exposición: *Una Imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*, realizada en 2011, que ha supuesto un hito en la divulgación y puesta en valor de la fotografía estereoscópica. El catálogo de esta exposición resulta esencial para cualquier investigador de la fotografía estereoscópica.

Este capítulo resume la investigación que he llevado a cabo sobre las fotografías estereoscópicas de la ciudad de Valencia, realizadas durante la segunda mitad del siglo XIX, la mayoría de ellas tomadas por los fotógrafos de las grandes compañías editoras de tarjetas estereoscópicas.

Estas fotografías tienen un valor histórico y documental excepcional y su estudio se convierte en una labor realmente apasionante de la que pueden obtenerse muchos datos de carácter arquitectónico y urbanístico.

La investigación comenzó realizando un censo de las fotografías, a partir de los antiguos catálogos comerciales de los editores, que ha servido de base para su búsqueda en los archivos públicos y en las colecciones privadas.

He tenido la fortuna de contar con la inestimable colaboración de coleccionistas privados como Juanjo Díaz Prósper, Juan Antonio Fernández Rivero, José Huguet Chanzá, Carlos Sánchez Gómez y Javier Sánchez Portas, que me han permitido incluir en esta Tesis algunas imágenes de su colección. A las que se añaden las encontradas en los archivos nacionales como la Biblioteca Nacional de España, el Instituto del Patrimonio Cultural Español, la Biblioteca Valenciana Nicolau Primitiu y el archivo de la Diputación de Valencia.

Gracias a ello he podido recopilar un buen número de imágenes de este periodo con las que pretendo poder recordar, estereoscópicamente, la imagen de la Valencia de la segunda mitad del siglo XIX, incluyendo algunas de las piezas arquitectónicas de la ciudad, ya desaparecidas, y algunos núcleos urbanos en los que se ha producido una profunda transformación a lo largo del tiempo.

16.1. El contexto urbanístico

En la segunda mitad del XIX, la ciudad de Valencia se encuentran inmersa en un intenso proceso de expansión urbanística, que comienza el 20 de febrero de 1865 con la orden de derribo de las antiguas murallas, por iniciativa del Gobernador Civil Cirilo Amorós, con el argumento de dar trabajo a la población que permanecía desocupada por culpa de la crisis en la industria de la seda, pero principalmente para permitir el crecimiento hacia el exterior que se estaba gestando, desde 1858, con el primero de los planes de ensanche. Este Plan fue encargado a los arquitectos Antonio Sancho, Timoteo Calvo y Sebastián Monleón, quien más tarde proyectaría la Plaza de Toros.

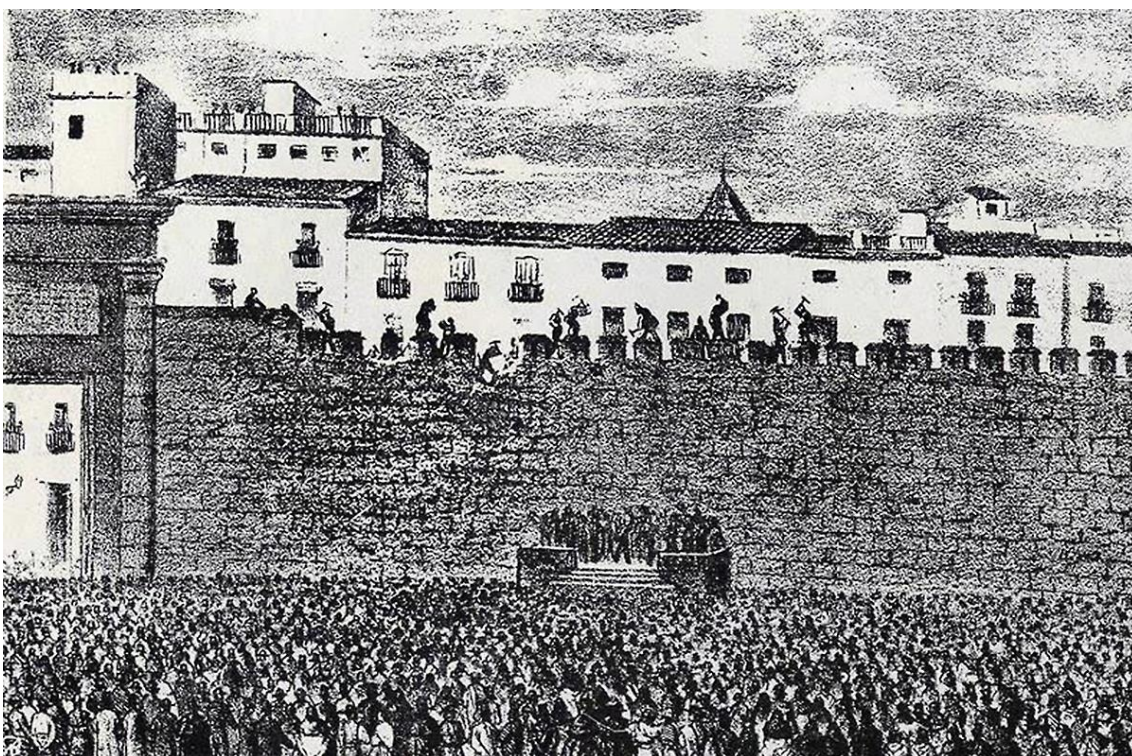


Fig. 16.1. Antonio Bergón, 1865. Xilografía publicada en *El Museo Literario* que recoge el inicio de la demolición de las murallas junto a la Puerta del Real. Huguet (1999)

El perímetro derribado eran las antiguas murallas cristianas, que habían sido construidas entre 1357-1370 por orden del Rey de Aragón Pedro IV el Ceremonioso, para abarcar los barrios perimetrales que se habían creado en torno a la anterior muralla musulmana. La Fig. 16.2 muestra una versión del plano realizado por Tomás Vicente Tosca en 1704, realizada por J. Fortea, en el que el que puede verse muy bien

la configuración urbanística de la ciudad y el trazado de la muralla, que abarcaba un área de 142 Ha, con un perímetro de unos 4 Km. En ella se abrían 12 puertas, divididas en 4 puertas grandes (*Portals Grans*) y 8 puertas pequeñas (*Portals Xics*). Sobre el plano se han nombrado y numerado las puertas de la muralla, utilizando el color rojo para indicar las grandes, situadas aproximadamente en los puntos cardinales, y en azul las pequeñas.

Tras la demolición sólo se conservaron las puertas de Serranos y las de Quart (1 y 2). El espacio dejado por la muralla dio origen a la Ronda, constituida por el margen del río, la calle Colón (Sur-este), calle Játiva (Sur-Oeste) y calle Guillén de Castro (Oeste), y en la zona interior se iniciaron las tareas para abrir nuevos espacios y nuevas calles que comunicaran con la Ronda, además de ampliar las principales vías, ya existentes.

Uno de los espacios más representativos abiertos durante esta época fue la Plaza de San Francisco (actual plaza del Ayuntamiento) que ocupaba el Convento de San Francisco, Cuartel de Infantería en aquél momento. Este espacio se había convertido en un gran centro neurálgico, ya que sus jardines habían proporcionado el espacio idóneo para ubicar la primera estación de trenes con la llegada del ferrocarril en 1854.

El convento fue derribado en 1891, dejando un gran espacio público y comercial al que abocaba la Estación, que sería demolida a principios del siglo XX al quedar operativa la actual Estación del Norte, construida junto a la Plaza de Toros. También se abrieron en aquella época la calle Lauria y la calle de la Paz, para dar acceso a la Estación y a Santa Catalina hacia la calle Colón. Además se amplió el trazado de la calle San Vicente.

Las actuaciones en la zona de ensanche habían sido planificadas en el proyecto de 1858, pero éste no llegó a aprobarse oficialmente por culpa de la lentitud burocrática estatal, sin embargo, la necesidad de viviendas provocó que se construyeran clandestinamente algunos núcleos aislados según las directrices y modificaciones de este proyecto, de modo que, en 1879, ya se habían abierto, al Sureste de la ciudad, las calles de Puerto (actual Cirilo Amorós), Pizarro, Hernán Cortés e Isabel la Católica, que comenzaron a poblarse.

Sin embargo, las calles eran un auténtico barrizal cuando llovía y los vecinos reclamaban pasos de peatones para poder cruzar (Huguet, 1999). A excepción de estas zonas, el resto del ensanche se adapta al proyecto realizado en 1884 por los arquitectos José Calvo, Luís Ferreres y Joaquín Arnau, que fue el que obtuvo la aprobación oficial.

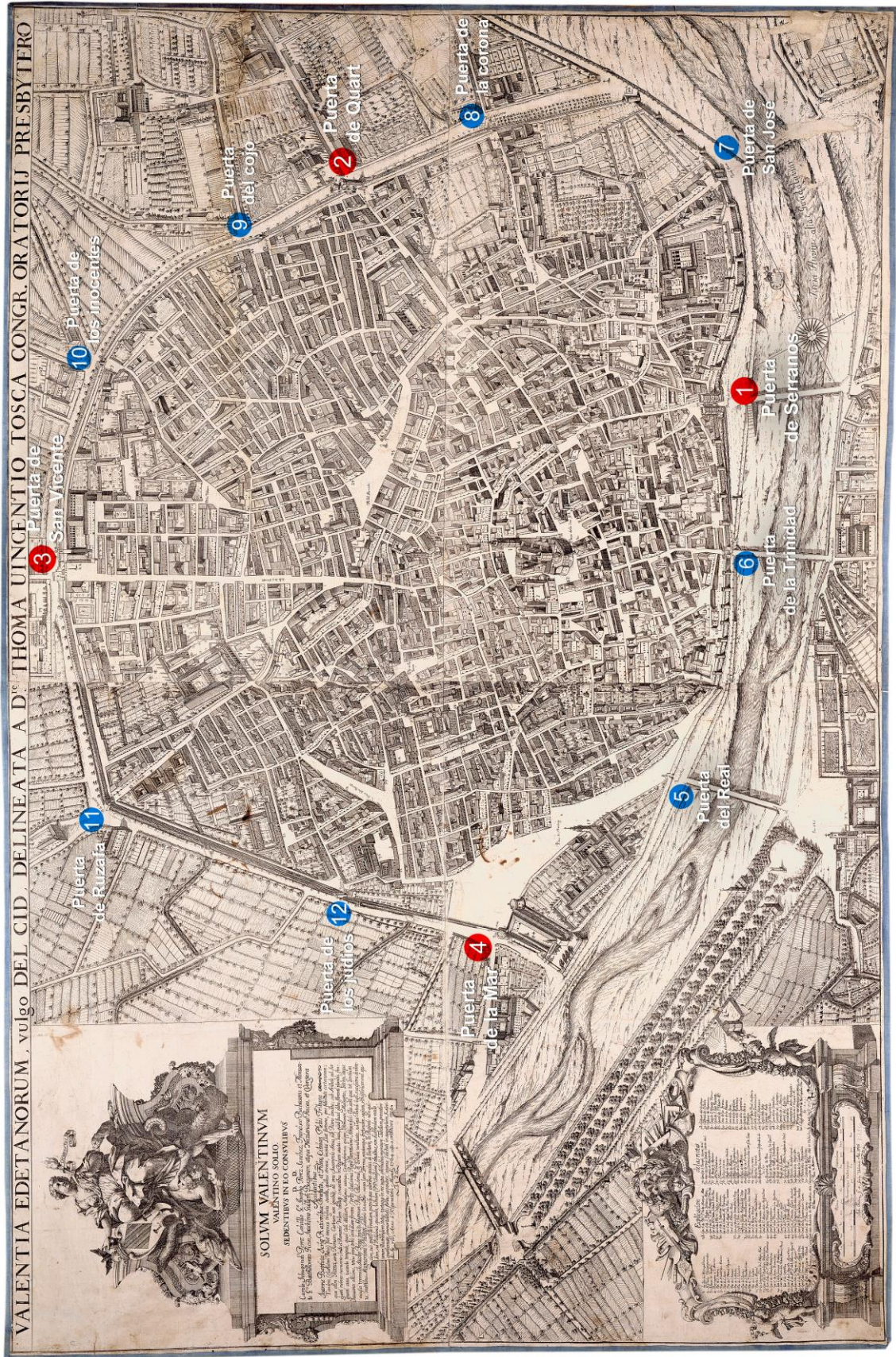


Fig. 16.2. J. Fortea, ca.1738. Versión del Plano de Valencia realizado por Tomás Vicente Tosca en 1704

Unas de las imágenes más fascinantes y que mejor documentan el estado de la ciudad, justo antes de la demolición de las murallas, son las dos vistas aéreas (Fig. 16.3 y Fig. 16.4), realizadas por el pintor, litógrafo y arquitecto francés Alfred Guesdon (1808-1876), contenidas en su obra *L'Espagne a vol d'oiseau*, publicada en torno a 1855, que contenía 24 litografías con vistas aéreas de 16 ciudades españolas entre las que se encontraba Valencia.

Según Quirós (1991) y Gámiz (2004), la minuciosidad de los detalles y la precisión de la perspectiva hace inverosímil que las imágenes fueran realizadas al natural, por lo que emiten la teoría de que las vistas debieron realizarse a partir de fotografías tomadas en globo y que existen algunos indicios de que las ascensiones pudieran haberse llevado a cabo en compañía del aeronauta y prestigioso fotógrafo Galés Charles Clifford (1819-1863), asentado en Madrid desde 1850. Según Gámiz (2004), Clifford y Guesdon tendrían un acuerdo de confidencialidad y por ello las fotografías aéreas jamás salieron a la luz. La prueba más sólida del argumento se basa en que una de estas fotos, de Granada, pudiera haber sido utilizada también para la realización de un grabado, que resulta prácticamente idéntico a la litografía de Guesdon, que aparece en la portada del libro *An autumn tour in Spain, in the year 1859-1860*, del Reverendo Richard Roberts, quien incluye en el libro una nota de agradecimiento dedicada a Clifford por haberle prestado las fotografías que sirvieron de base a los grabados que ilustran el libro. En mi opinión, este dato no es concluyente pues podría referirse a las fotografías utilizadas para ilustrar los textos y no a la de la portada en concreto, que pudiera haber sido copiada de la vista de Guesdon, que ya había sido publicada. También se ha apuntado la hipótesis del globo cautivo, es decir, un globo amarrado al suelo (Quirós, 1991). Para comprobar esta posibilidad he realizado un pequeño análisis métrico sobre una de las imágenes para determinar la hipotética altura del globo; como se trata de una perspectiva de plano del cuadro vertical, he medido la altura de las Torres de Serranos, desde un punto cualquiera de su base, y la distancia vertical entre ese mismo punto y la línea de horizonte. El cociente entre la segunda y primera medida, multiplicado por la altura real de las torres (unos 33 m), proporciona la altura del punto de vista, que resulta ser de unos 200 m, lo que parece algo excesivo para un globo cautivo de la época.

Es cierto que resulta sorprendente que las vistas de Guesdon fueran realizadas a partir de la información cartográfica de la época y algunos bocetos, pero, por otro lado, resulta también inverosímil que en 1853 pudiera sacarse, desde la barquilla de un globo en movimiento, una fotografía lo suficientemente nítida como para poder servir de base a los dibujos, cuando el recién inventado proceso del colodión húmedo requería varios segundos de exposición. Personalmente me inclinaría más por el virtuosismo de Guesdon; pensemos que también Wyngaerde obtuvo sus vistas aéreas de Valencia en 1563, con menos nociones de perspectiva, sin globos y sin fotografía.

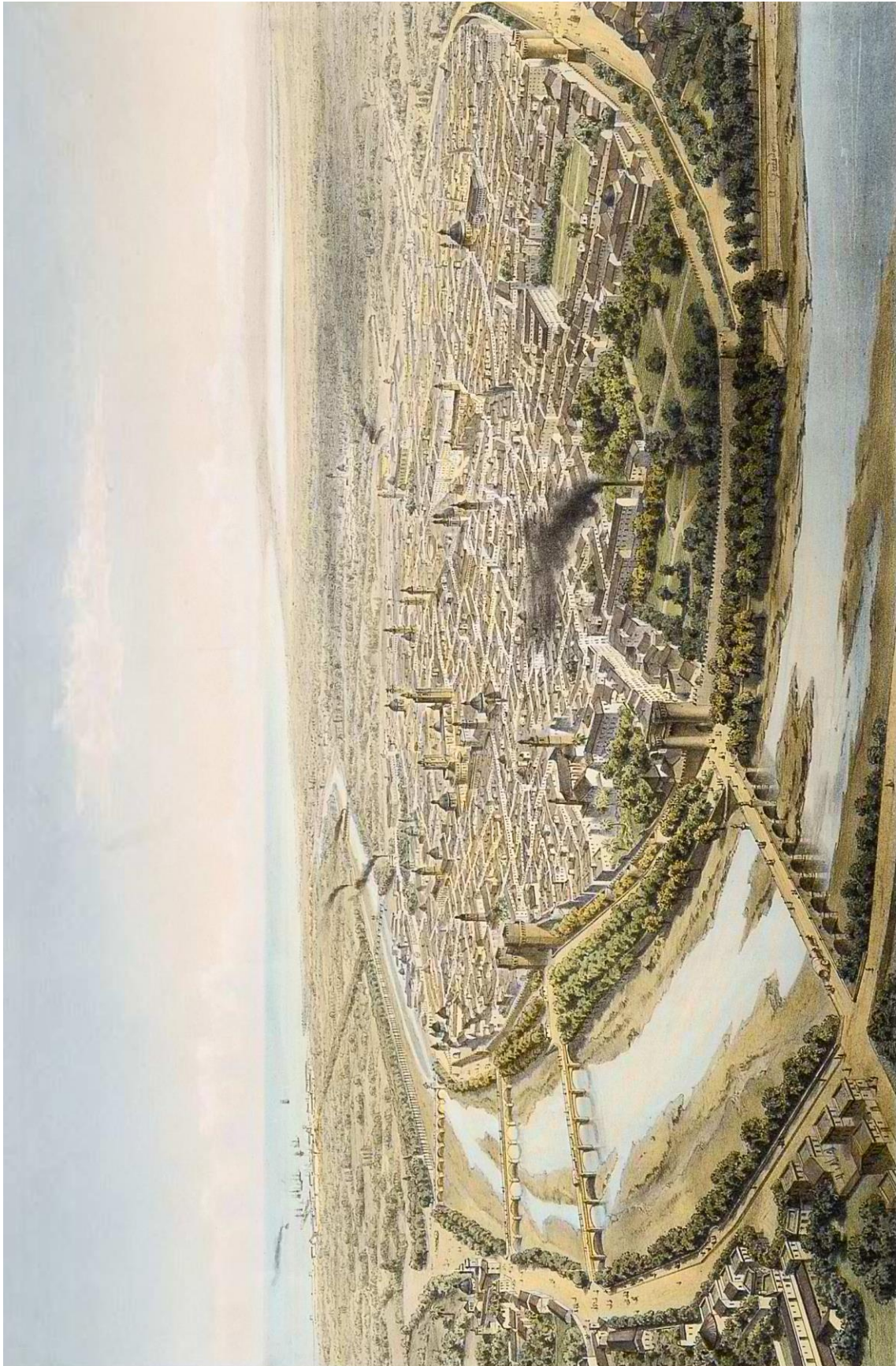


Fig. 16.3. Alfred Guesdon, 1853. Vista tomada sobre el Puente de San José

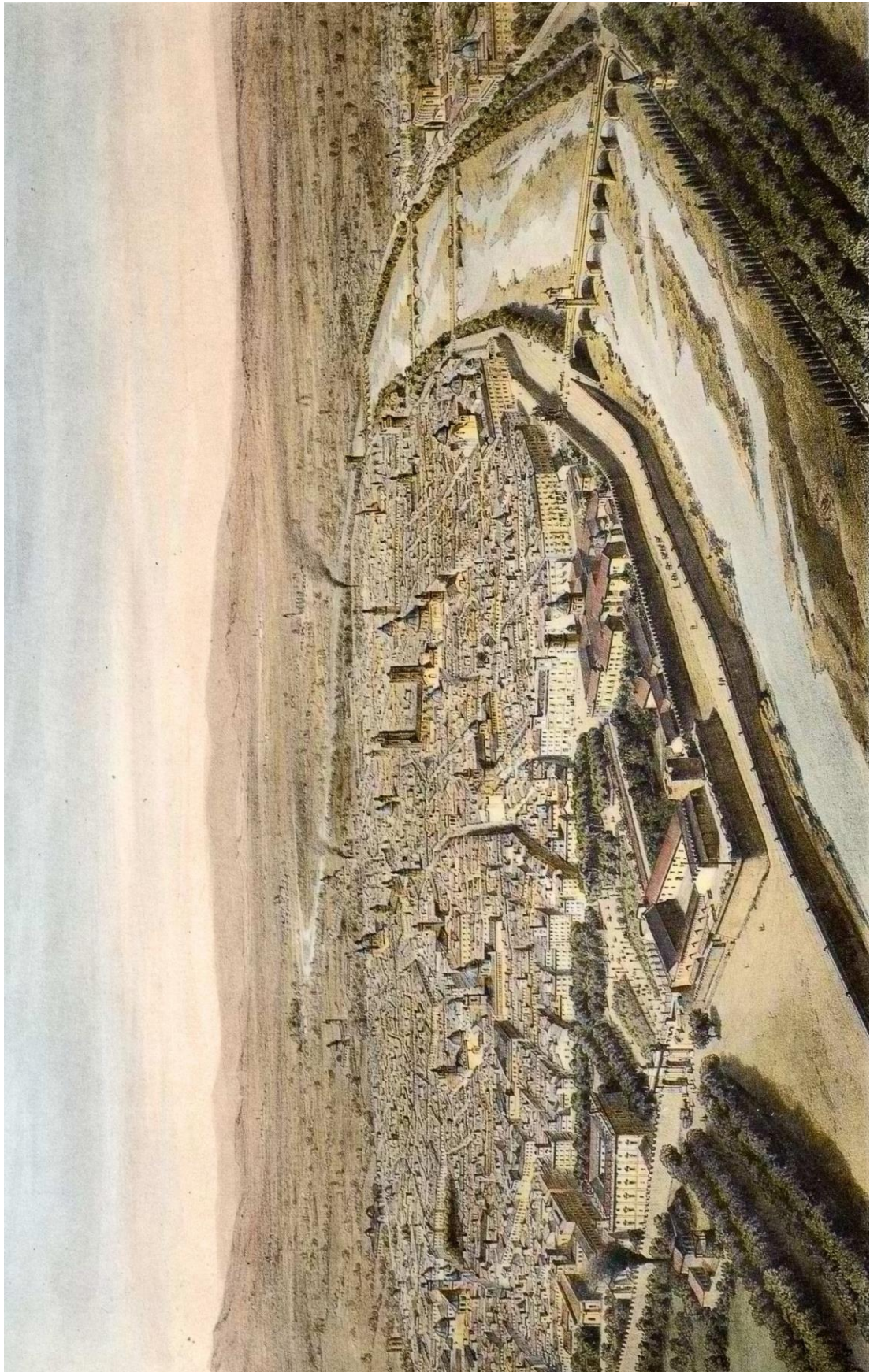


Fig. 16.4. Alfred Guesdon, 1853. *Vista tomada sobre el Puente del Mar*

16.2. La industria fotográfica estereoscópica

A mediados del siglo XIX, se inicia el desarrollo de toda una industria fotográfica estereoscópica, dispuesta a satisfacer la demanda por parte de las clases adineradas, en la que había causado furor el estereoscopio, a raíz de su presentación en la Exposición Universal de Londres de 1851. Muy pronto el uso del estereoscopio se generalizó también entre las clases menos pudientes, con lo que la demanda se incrementó todavía más, convirtiéndose en un negocio muy rentable, que vivió una etapa dorada entre 1850-1880 y fue cayendo en declive tras la aparición de otros medios de entretenimiento de masas como el cine, la radio y la televisión. Sin embargo, en Estados Unidos esta industria tuvo un periodo de resurgimiento entre 1890 y 1920 con la aparición de dos grandes editoras: Underwood & Underwood y Keystone Company. A nivel de aficionado, el sistema Verascope de Jules Richard mantuvo viva la llama hasta los años 30; a partir de entonces la fotografía estereoscópica se convierte en algo minoritario y de culto, a veces usada como reclamo publicitario o como mero souvenir turístico con la aparición de los visores tipo View Master, con vistas de escasa calidad en formato disco (Fernández, 2004).



Fig. 16.5. Taller de fabricación de vistas estereoscópicas ca. 1860. (Huguet, 1999)

La temática de las colecciones estereoscópicas fue muy variada, como las escenas de grupo, cómicas, terroríficas, diablerías²³, los desnudos, las celebridades, además de las vistas de monumentos y lugares remotos, que fue uno de los temas más demandados, por lo que las grandes editoras de tarjetas estereoscópicas enviaron a sus fotógrafos a lugares exóticos y atractivos para el público, en busca de vistas de sus paisajes y de sus principales monumentos.



Fig. 16.6. Roger Fenton, ca.1857. *Viejo Molino*. Castleton Braemar, The London Stereoscopic Company, Albúmina coloreada a mano sobre cartulina, 17.5x9 cm. Patrick Montgomery Collection.

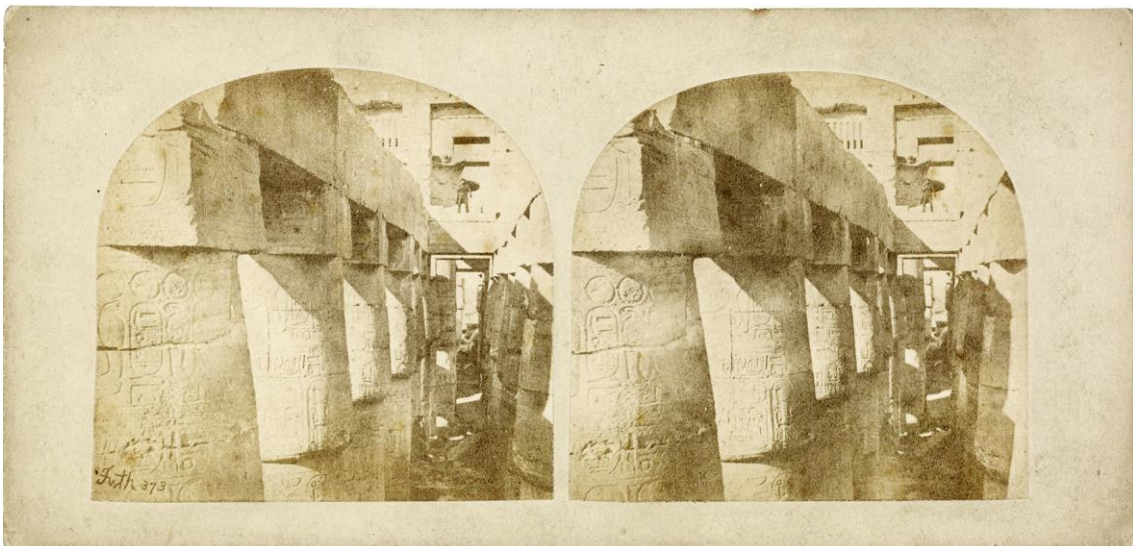


Fig. 16.7. Francis Frith, ca. 1857. *Templo de Karnac*. Frith & Co. Albúmina sobre cartulina, 9x17.5 cm Ken and Jenny Jacobson orientalist photography collection. The Getty Research Institute

²³ Les Diableries fue una colección que se hizo bastante popular en la que se representaban escenas cómicas del averno, a partir de figuritas con aspecto de diablos y esqueletos. Algunas de ellas realizadas sobre papel translucido (*tissues*), para lograr un efecto de luz al ser retroiluminadas. Brian May, guitarrista de Queen y gran apasionado de la estereoscopia, junto con los investigadores Denis Pellerin y Paula Fleming, han publicado recientemente una monografía con imágenes de esta temática (May, 2013)

Muchos de estos editores incluyeron fotografías estereoscópicas de España, que por aquél entonces despertaba bastante interés en el extranjero gracias a la imagen mística y anacrónica evocada por los escritos de los viajeros románticos como Victor Hugo, Hans Christian Andersen o Prosper Mérimée, que habían iniciado su andadura por tierras españolas desde el siglo XVIII, y por las guías de viajes que proliferan en la primera mitad del siglo XIX, junto con las colecciones de grabados y litografías de diversos artistas.

En el caso de Valencia cabe destacar los dibujos tomados por Georges Vivian, Nicholas Chapuy, John Eldridge y Jenaro Pérez de Villaamil. Recomendando la lectura de Piñar (2011) que ilustra muy bien esta imagen de España mostrada por los artistas y escritores románticos.

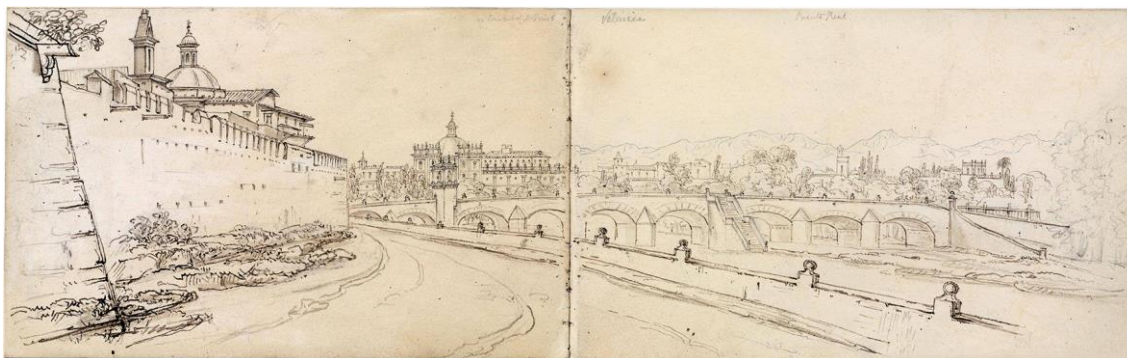


Fig. 16.8. George Vivian, ca.1835, *Apunte de la Muralla de la ciudad, Puente del Real y San Pio V, al fondo*

© Biblioteca Nacional de España

En realidad, el reportaje fotográfico llevado a cabo por los editores de tarjetas estereoscópicas, no deja de ser una versión tardo-romántica de las guías de viajes por España, en la que se sigue mostrando esa imagen anacrónica rebotante de exotismo, debida principalmente a los monumentos islámicos.

Los editores que comercializaron vistas estereoscópicas de Valencia durante el siglo XIX fueron mayoritariamente franceses. En ocasiones, el editor es también el autor de las fotografías, pero, generalmente, los grandes editores contrataban a otros fotógrafos cuya autoría no solía ser reflejada.

A continuación, se muestra la relación de todos los editores encontrados durante la investigación, ordenados cronológicamente, según el periodo en el que tomaron las fotografías de Valencia. El estudio presenta el número de fotografías y sus títulos tal como aparecen en los catálogos, así como algunos ejemplos de sus cartulinas estereoscópicas publicadas sobre Valencia, donde se valoran algunos aspectos compositivos y técnicos, además de señalar aquellas que tienen un mayor interés temático. He preferido disponer, al final de este capítulo una selección de las vistas recuperadas para su visualización estereoscópica conjunta.

16.3. Los editores Gaudin et frère

Los orígenes de esta editora parisisina se deben al mayor de los Hermanos Gaudin, Marc Antoine, que había llegado a París desde Burdeos para estudiar matemáticas y física y se había interesado por los experimentos de Daguerre, de modo que, en cuanto el secreto de la fijación de la imagen fue desvelado, comenzó a hacer fotografías junto a su amigo Noël Lerebours, prestigioso fabricante de instrumentos de óptica.

A Marc Antoine se unieron sus hermanos Alexis y Charles, atraídos por el potencial económico de la fotografía; ellos serían los creadores de la firma A. Gaudin et frère, en la que comenzaron dedicándose a vender todo tipo de material fotográfico, como cámaras, accesorios y libros, pero finalmente las vistas estereoscópicas acabarían siendo su principal fuente de ingresos. (Fernández, 2011)

Como estrategia publicitaria compraron la revista La Lumiere, cuyo primer director fue el valenciano, afincado en París, Benito Monfort, quien la había fundado junto con el Abate Moigno. Tras vender La Lumiere, Benito Monfort y el Abate Moigno fundaron la revista Cosmos, lo que no sentó muy bien a los Gaudin (Huguet, 1990). Ambas revistas fueron durante muchos años una referencia a nivel mundial.



Fig. 16.9. Revista La Lumiere del 1 de mayo de 1858, con el catálogo de vistas españolas de Gaudin

La Lumiere publicó el 1 de mayo de 1858 un catálogo de vistas de España de los hermanos Gaudín (Fig. 16.9), que incluía un total de once vistas realizadas en la ciudad de Valencia:

- 294 *Porte Saint-José*
- 295 *Porte de Serrane*
- 296 *Sculpture attribuée à Michel-Ange*
- 297 *La Porte Royale*
- 298 *Portall de la Cathédrale*
- 299 *Vue prise sur la Cathédrale*
- 300 *Panorama de Valence*
- 301 *Panorama de Valence*
- 302 *Panorama de Valence*
- 303 *Panorama de Valence*
- 304 *Panorama de Valence*

De especial interés son la toma del Portal de San José o Portal Nou y la de la Puerta del Real, ambas desaparecidas para siempre al ser derribadas junto con la muralla. También cabe destacar las excepcionales vistas panorámicas realizadas desde el Miguelete.

Resulta curiosa la denominación de la vista número 296 con el título de: *Escultura atribuida a Miguel Ángel*, pero en realidad esta vista representa la fachada barroca del Palacio del Marqués de Dos Aguas, del escultor valenciano Ignacio Vergara, fundador y profesor de la Academia de Santa Bárbara, origen de la Real Academia de Bellas Artes de San Carlos. Aunque sí que es cierto que esta obra muestra grandes influencias de la obra de Miguel Ángel.

Según Fernández (2004), las fotografías de España de los hermanos Gaudín pudieron ser realizadas entre 1856 y 1857 por el fotógrafo francés Eugène Sevaistre (1817-1897), afincado en Palermo, a raíz de un álbum atribuido a éste fotógrafo, que guarda el Centro de Arquitectura de Canadá, titulado: *Souvenirs Stéréoscopique d'Espagne*, en el que muchas de sus fotografías son idénticas a las publicadas por los Hermanos Gaudín. Para tener una mayor certeza ante esta



Fig. 16.10. Eugène Sevaistre (1817-1897)
Ca.1862. Civico Archivio Fotografico di
Milano (www.cfrivero.com)

teoría, en lo concerniente a Valencia, he contactado con el Centro de Arquitectura de Canadá y he podido corroborar que obran en su poder 10 fotografías estereoscópicas de Valencia, atribuidas a Eugène Sevaistre, que coinciden con las publicadas por los hermanos Gaudin, por lo que la teoría acerca de la autoría de Sevaistre parece también muy sólida en las fotografías de Valencia.

Las fotografías estereoscópicas publicadas por Gaudin evidencian que fueron realizadas utilizando una cámara de lente única, tomando dos fotografías alternas con una separación entre puntos de vista bastante significativa, buscando un marcado efecto hiperestereoscópico. En alguna de sus tomas, como la del Puente del Real, el paralaje máximo resulta bastante elevado y puede resultar poco confortable para ciertas personas, pero por norma general la técnica de captura es adecuada y los temas elegidos tienen un enorme interés documental.

El hecho de realizar las tomas alternadamente provoca a menudo incongruencias entre las imágenes que componen el par, debido a los sujetos en movimiento presentes en la escena, que suelen aparecer movidos o dejando una estela por el lapso de tiempo requerido para la exposición. La Fig. 16.11, muestra dos incongruencias entre las tomas producidas por la presencia de un hombre y un caballo sólo en la toma derecha, que aparecen movidos.



Fig. 16.11. Alexis Gaudin, 1856-1857. *Portal de San José*. Albumina sobre cartulina 9x18.5 cm Colección Díaz Prósper. Obsérvese las incongruencias entre tomas debidas a la diferencia temporal

La aparición del colodión húmedo había supuesto un gran avance al reducir considerablemente los tiempos de exposición, con respecto al Daguerrotipo, pero todavía eran necesarios algunos segundos para realizar la toma. La fotografía instantánea no sería posible hasta la década de 1880, como tendremos ocasión de comprobar más adelante.

16.4. Los Editores Ferrier père et fils et Soulier

Claude Marie Ferrier (1811-1889) fue uno de los grandes pioneros de la fotografía estereoscópica. En 1851, ya colaboraba con Jules Dubosc, constructor del estereoscopio de Brewster, realizando algunos daguerrotipos estereoscópicos. Ese mismo año acudió a la Exposición Universal de Londres como fotógrafo autorizado para documentar el evento y allí pudo ver los excelentes positivos de vidrio para linterna mágica²⁴ presentados por los Hermanos Langenheim de Filadelfia, que habían perfeccionado el procedimiento inventado por Niépce de St. Victor, sobrino de Niépce, para fijar la albúmina sobre el vidrio. Ferrier realizó sus propias pruebas y muy pronto logró desarrollar un procedimiento propio con el que obtuvo excelentes resultados (Hannavy, 2008).

Por otro lado, el fotógrafo Charles Soulier (1840-1875), también se había interesado en fijar la imagen sobre vidrio y se había asociado con Athanase Clouzard, junto al que ganó una medalla de bronce en la Exposición de París de 1855, pero esta sociedad no duró mucho tiempo, ya que Soulier acusó a su socio de competencia desleal y finalmente vendió la parte de Clouzard a Ferrier, para fundar, en 1859, la editora Ferrier père et fils et Soulier, que en poco tiempo se convirtió en una de las casas más prestigiosas de vistas estereoscópicas sobre vidrio, con un catálogo de miles de vistas de diversos países, completado a partir de las vistas aportadas por ambos socios.

La sociedad se disolvió en 1864 y el fondo estereoscópico quedó en manos de dos de los empleados de la firma: Moyse Léon e Isaac George Lévy, que seguirían comercializando las vistas bajo la denominación de M. Léon et J. Lévy, e irían ampliando el catálogo con nuevas vistas, incluyendo otra serie de Valencia, por lo que me referiré a ellos más tarde.

Aunque Ferrier y Soulier tomaron personalmente muchas de sus vistas, también buscaron la colaboración de otros fotógrafos como el inglés Francis Frith, para las colecciones de Nubia y Egipto y posiblemente la de Charles Clifford para la primera serie de vistas sobre España (serie 6000) realizadas alrededor de 1857 (Sánchez, 2011). Esta serie no incluye las fotos de Valencia que serían tomadas en un segundo viaje, por un fotógrafo desconocido, en el que se amplió el número de ciudades. Esta segunda serie de vistas de España fue denominada serie 7000 y según Sánchez (2011) fueron llevadas a cabo entre 1863 y 1864.

²⁴ La linterna mágica era un espectáculo de proyección de imágenes, precursor del cinematógrafo, en el que las imágenes, tradicionalmente dibujadas a mano, se proyectaban con uno o varios proyectores que se situaba detrás de la pantalla, en el lado opuesto a los espectadores, que podían moverse hacia delante o hacia atrás para simular escenas en movimiento

He podido obtener la información completa acerca de la denominación de las vistas y su referencia gracias al catálogo de vistas estereoscópicas de Ferrier et Soulier, reeditado por Voignier (1992), que aglutina la información de todos los antiguos catálogos originales publicados, en donde aparecen estas 6 vistas de Valencia:

- 7063 *Panorama de Valence. Côté du Grao*
- 7064 *Panorama de Valence. Côté du Taberne Blaque*
- 7065 *Panorama de Valence. Côté de Murviedro*
- 7066 *Le Paseo de Valence*
- 7067 *Pont e porte Serranos*
- 7068 *Pont e porte Saint-Joseph*

A excepción de la número 7066, que recoge el Paseo de la Alameda, el resto de vistas repiten los temas publicados por Gaudín, sin embargo, se trata de vistas más generales como en el caso de las Torres de Serranos y el portal de San José, en los que se incluyen los puentes.

Al igual que ocurre con las vistas de Gaudín, los pares fueron adquiridos en dos tomas alternas, variando la posición de la cámara. El fotógrafo trata de evadir la presencia de personas u objetos en movimiento en la escena para evitar las incongruencias entre tomas. El cliché de vidrio original contiene las dos imágenes que configuran el par, una al lado de la otra, lo que denota el uso de una cámara con respaldo u objetivo deslizante (Fig. 16.12).



Fig. 16.12. Cámara con respaldo deslizante, 1858 (izda.) y cámara con objetivo deslizante, ca 1860 (dcha.)
(Fernández, 2004)

El historiador y coleccionista D. José Huguet guarda en su archivo unos positivos en papel fotográfico realizados a partir de las placas de vidrio originales de Ferrier & Soulier, que adquirió, a finales de los noventa, al archivo Roger-Viollet de París, con motivo de la edición del libro: Valencia en 1888 (Huguet, 1999). Estas copias contienen toda la serie realizada en Valencia, pero sólo se positivó una de las

imágenes del par, a excepción de la vista número 7067 (Puente y Torres de Serranos). Viendo estas imágenes uno puede hacerse rápidamente una idea del nivel de calidad alcanzado por las vistas de Ferrier & Soulier en las que se aprecia un alto grado de detalle y una asombrosa riqueza tonal (Fig. 16.13).



Fig. 16.13. Ferrier & Soulier, 1853-1864. 7065 *Panorama de Valencia hacia Murviedro* (Huguet, 1999)

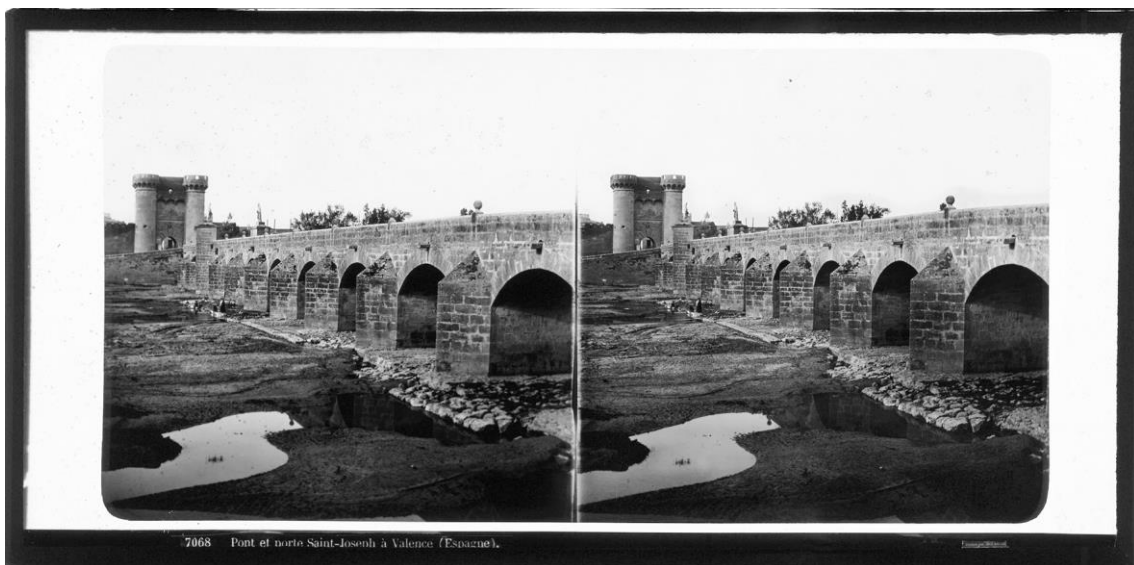


Fig. 16.14. Ferrier & Soulier, 1853-1864. 7068 *Puerta y Puente de San José*. Positivo de vidrio, 8,5x17 cm Colección Carlos Sánchez Gómez

16.5. Ernest Lamy

Pierre Eleonor Ernest Lamy (1828-1891), fue un fotógrafo francés que inició su actividad al inicio de la década de 1860, alcanzando una gran reputación como retratista, tal como mencionaba la revista *La Lumière*, pero su actividad se centró principalmente en la realización de vistas estereoscópicas, llegando a obtener alrededor de un millar de vistas entre las que se encuentra una serie dedicada a España. Su fotografía refleja una gran calidad y composiciones originales en las que suele aparecer él mismo (Fernández, 2011).

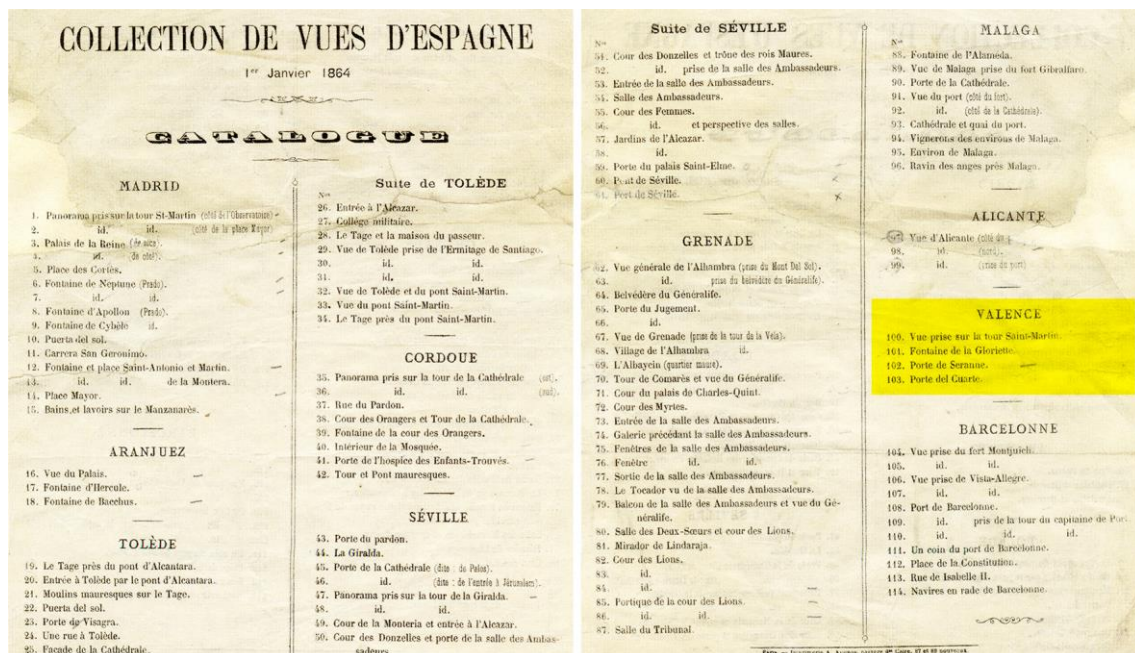


Fig. 16.15. Catálogo de las vistas españolas de Ernest Lamy publicado en 1864. (Fernández, 2011:85) Colección Carlos Sánchez

Lamy realizó su viaje para fotografiar las ciudades españolas en 1863 y su presencia queda constatada en el libro de firmas de visitantes de la Alhambra del 23 de mayo ese año (Fernández, 2011). Al año siguiente, publica un catálogo con las vistas españolas, en el que aparecen reflejadas estas 4 fotografías de Valencia:

- 100 *Vue pris sur la tour Saint-Martin*
- 101 *Fontaine de la Gloriette*
- 102 *Porte de Seranne*
- 103 *Porte del Cuarte*

Aunque escasas, las vistas de Valencia realizadas por Lamy son impecables y sobre todo cabe destacar la vista realizada desde la torre de la Iglesia de San Martín, en la que emula una de las vistas realizadas editadas por Gaudín (nº 299), pero abarca una

zona algo mayor y la calidad de la toma nos permite ver muy bien la configuración urbanística de la actual plaza de la Reina, cuyo espacio estaba en aquel momento ocupado por varias manzanas de viviendas, entre las que circulaba la calle Zaragoza, que tenía por fondo de perspectiva la fachada barroca de la Catedral, a la que otorgaba todo su sentido arquitectónico. Aparte de esta vista, introduce novedades como la vista de las Torres de Quart y la fuente del Tritón en el jardín de la Glorieta, obra del italiano Giacomo Antonio Ponzanelli, todavía presente hoy en día, aunque ha sido víctima, en varias ocasiones, de actos vandálicos.

Lamy emplea para sus vistas una cámara estereoscópica (Fig. 16.16) con lo que ambas tomas se adquieren de forma simultánea y no se producen incoherencias entre ellas. Sin embargo, el uso de este tipo de cámaras, cuya separación entre objetivos es fija e igual a la interpupilar, plantea otros inconvenientes como la imposibilidad de practicar la hiperestereoscopia. Por este motivo el efecto de relieve se desvanece en aquellas escenas en las que sólo aparecen motivos lejanos, de ahí que Lamy, inteligentemente, tratara de incluir en sus encuadres a sujetos a diferentes distancias de la cámara para lograr una sucesión perceptiva de objetos en relieve. Lamy pide a las personas que permanezcan inmóviles durante la toma, para no salir movidos, no obstante, en algunas de sus fotos pueden verse las estelas de movimiento dejadas por el paso de algún carro o cualquier otro sujeto en movimiento. La inclusión de las personas añade mucho valor a las fotos de Lamy y ayudan al espectador a percibir la escala de la escena y, desde nuestra perspectiva en el tiempo, a hacernos una idea de algunos aspectos de la sociedad valenciana de la época.



Fig. 16.16. Cámara estereoscópica Chevalier de 1855 (izda.) y otro modelo de la década de 1860 (dcha.) (Fernández, 2004)

16.6. Eugenio Jouliá y los Hermanos Fárvaro

Eugenio Jouliá Potabou fue un fotógrafo francés que trabajó en Valencia entre 1854 y 1867, bajo el nombre comercial: *Fotografía Universal E. Jouliá y Cia*. En su estudio de la Calle de las Barcas, nº 12 y 14; más tarde se trasladaría a un lujoso estudio situado en la Calle Capilla de San Martín, nº 7. Jouliá se dedicó principalmente a los retratos, e introdujo en Valencia el formato Carta de Visita²⁵ (CDV), pero también parece que practicó la estereoscopia, tal como puede comprobarse en el anuncio publicado por el Diario Mercantil el 15 de diciembre de 1858, en el que dice:

“Nuevo Gabinete de fotografía. Mr Eugene Jouliá, fotógrafo, miniaturista residente hace cuatro años en esta ciudad, calle de las Barcas, num. 12, tiene el honor de anunciar al público, que ha construido una nueva galería de cristales exactamente igual a las que existen en las principales capitales de Europa [...] Hace retratos estereoscópicos, de tarjetón de visita, saca vistas, copias de cuadros, etc.”

Jouliá adquirió rápidamente un gran prestigio entre la sociedad valenciana y en 1864 le fue otorgado el título de fotógrafo de S.M. la Emperatriz de Francia y el de S.M. la Reina de España. Sin embargo, Jouliá abandonaría la ciudad, entre 1866-1867, afincándose en Marsella, probablemente por la gran crisis que vivía España en aquél momento y a la inestabilidad política surgida con el periodo pre-revolucionario, que terminaría con el advenimiento de “La Gloriosa” y el exilio de la Reina Isabel II, que le había otorgado el título de fotógrafo Real (Huguet, 1990).

Jouliá dominaba también la fotografía de exteriores, como queda patente en la nota de prensa aparecida en el diario *La opinión*, en 1863, en donde se decía que Jouliá había logrado obtener dos tomas de unos ejercicios militares llevados a cabo en Paterna, mientras el resto de fotógrafos presentes no había podido tomar ninguna. También la prensa valenciana, en 1865, alaba las preciosas vistas del Miguelete, de la Puerta de los Apóstoles, de la Lonja y de la Plaza de Toros, hechas todas con gran perfección por el Sr. Jouliá (Cancer, 2006). A estas cuatro hay que añadir otras que he podido constatar en las colecciones privadas, que forman un total de 12 vistas exteriores de Valencia en formato CDV, algunas de las cuales fueron publicadas también bajo la firma de los Hermanos Fárvaro.

Los hermanos Fárvaro fueron una familia de fotógrafos de origen italiano, que se asentaron en Valencia alrededor de 1865, en la Calle Abadía de San Martín, 14, muy

²⁵ El formato carta de visita fue ideado en 1854 por el fotógrafo francés André Adolphe Eugène Disderí y consistía en un papel fotográfico de aproximadamente 9 x 5.3 cm, sobre una cartulina de 10.5 x 6.3 cm. Este formato causó furor en la sociedad, que intercambiaba sus retratos y vistas en formato CDV, para completar sus álbumes personalizados. Según Huguet (1990) Jouliá fue el introductor en Valencia del formato CDV

cerca del estudio de Jouliá, con el nombre comercial de Fárvaro Hermanos, donde ejercían tres de los cuatro hermanos de la familia; Ernesto, Nicolás y Francisco. Este último tuvo un hijo llamado Domingo, que continuaría el oficio hasta bien entrado el s.XX, bajo el seudónimo de Oraw-Raff (Fárvaro al revés) (Rodríguez & Sanchís, 2013). La primera referencia en prensa data de 1872, cuando el *Diario Mercantil* comenta las reformas en su gabinete (Cancer, 2006).

Los Fárvaro publicaron algunas fotografías en formato CDV iguales a las de Jouliá, lo que ha sembrado algunas dudas con respecto a la autoría, abriéndose un debate desde que Fontanella (1981), incluyera una vista anónima de la Plaza de Toros. Esta vista parece ser el mismo ejemplar que conserva la Biblioteca Nacional de Madrid, sin firma alguna. Actualmente la Biblioteca Nacional atribuye este ejemplar a Jouliá, basándose en el libro publicado por Huguet (1990), en el que se muestra una CDV firmada por Jouliá, muy parecida a la presentada por Fontanella, con un punto de vista ligeramente distinto.

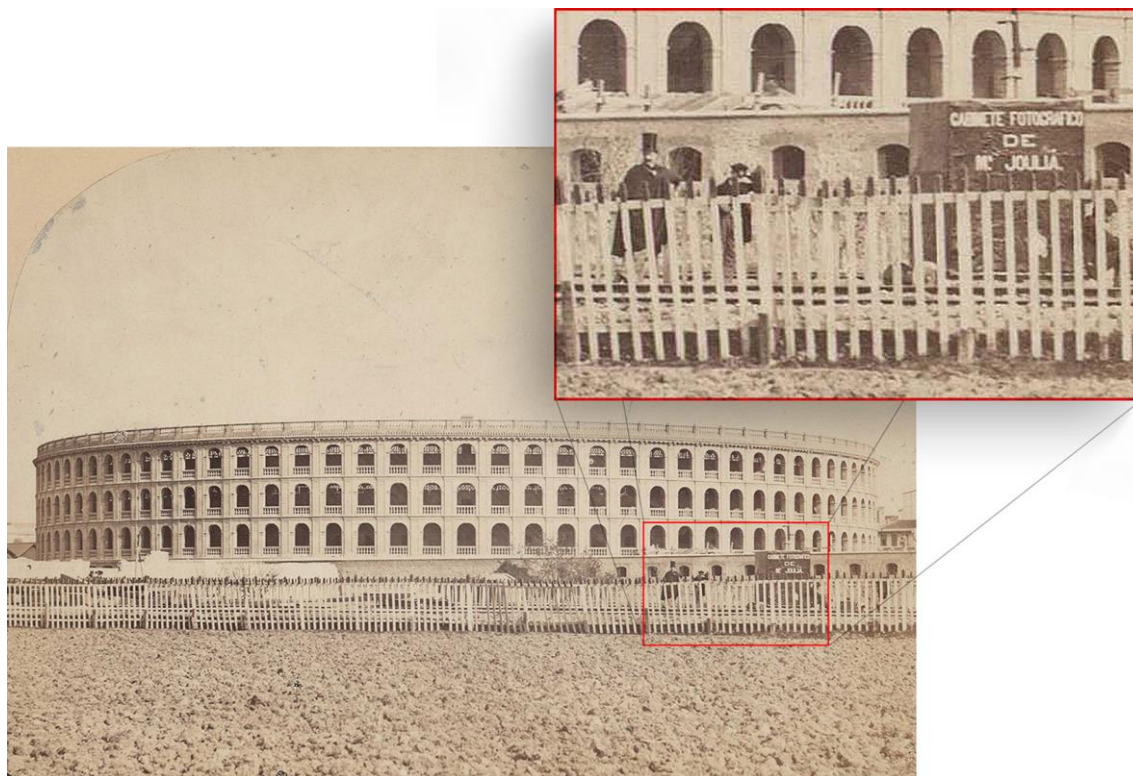


Fig. 16.17. E. Jouliá, ca.1865, *Vista de la Plaza de Toros de Valencia*. Biblioteca Nacional de España

Tanto Fontanella como Huguet ponen de manifiesto el detalle de la fotografía en el que puede verse el carramato laboratorio móvil de Jouliá, sobre el que está rotulado: *Gabinete Fotográfico de Mr. Jouliá*. En la fotografía publicada por Fontanella aparecen además varios personajes, entre los que destaca un hombre elegantemente vestido con sombrero de copa, que podría ser el propio Jouliá (Fig. 16.17).

Cancer (2004) plantea que los Fárvaro fueron los autores de la versión publicada por Fontanella y no Jouliá, porque ellos publicaron una vista que se corresponde perfectamente con la mostrada por Fontanella. Se trata de una aparente vista estereoscópica en la que se han retocado las letras del carromato para que no se lea el nombre de Jouliá. Como característica curiosa de esta vista he comprobado que se trata de una falsa estereoscópica, es decir, ambas imágenes son idénticas, por lo que su visualización en el estereoscopio no ofrece ningún tipo de relieve (Fig. 16.18 inf.).

Gracias a la inestimable colaboración del coleccionista e historiador Juan Antonio Fernández Rivero, he podido acceder a otra CDV, firmada por Jouliá (Fig. 16.18 sup.), que coincide totalmente con la publicada por Fontanella, lo que, a mi juicio, aclara la cuestión de la autoría en favor de Jouliá.

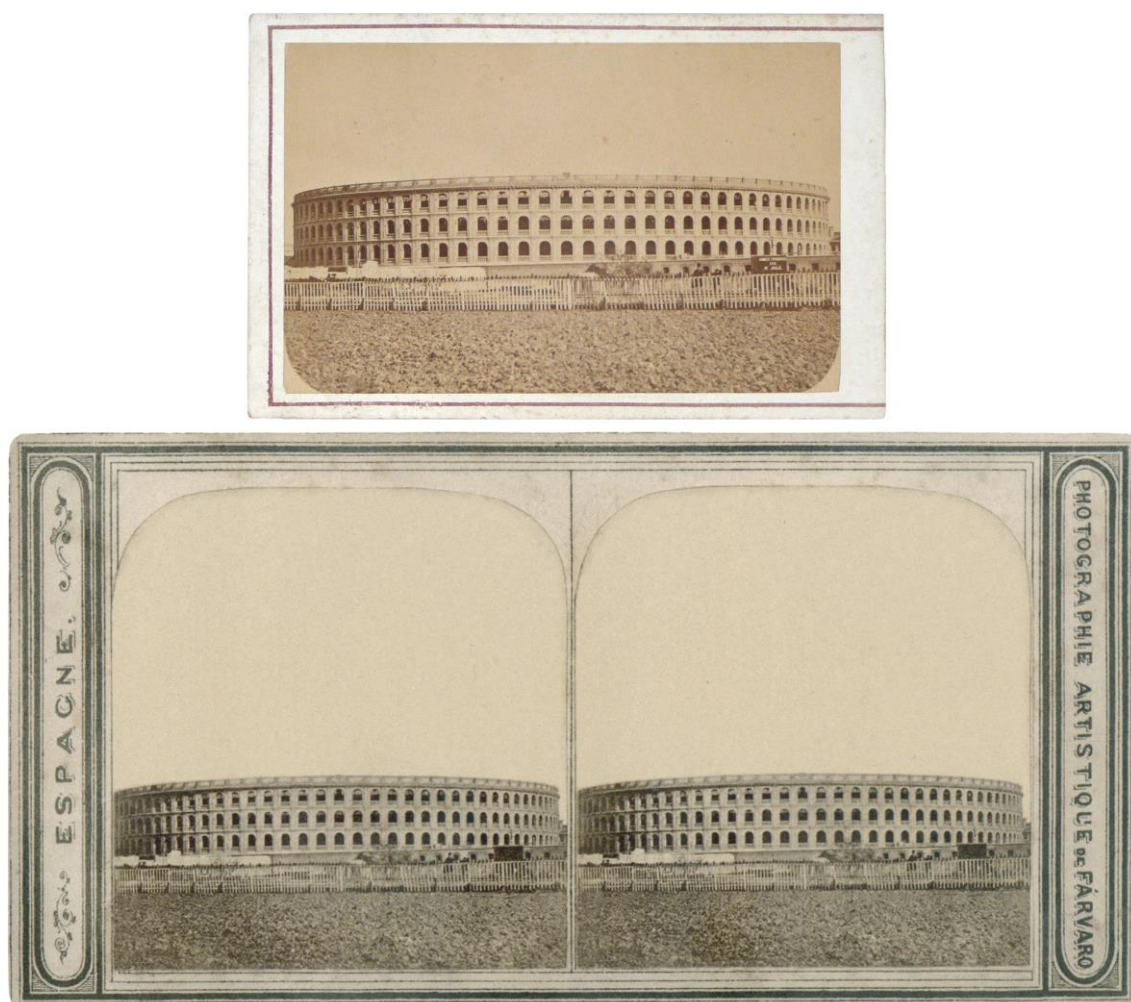


Fig. 16.18. E. Jouliá ca.1865 Plaza de Toros de Valencia. 6.3x9.9 cm. Colección Fernández Rivero (sup.) Farvaró Hermanos. Falsa estereoscópica idéntica a la de Jouliá. Colección Díaz Prósper (inf.)

Es necesario tener en cuenta algo muy importante acerca de esta fotografía y es que la vista original fue realizada sobre un cliché de formato grande, seguramente de 18x24 cm, pues la copia que guarda la Biblioteca Nacional es de 15x21.5 cm. Hay que

tener presente que en aquel momento no existían las ampliadoras y todas las copias se obtenían por contacto directo con el negativo de vidrio. Hecha esta aclaración, se puede demostrar que tanto la versión de Fárvaro, aparentemente estereoscópica, como la versión de Jouliá en CDV, de menor tamaño que el cliché original, no pudieron ser obtenidas directamente a partir de éste, sino que sufrieron una reducción de tamaño.

La única forma que permitía realizar un cambio de escala de una fotografía era obtener un nuevo cliché, fotografiando una copia positivada en papel a la distancia adecuada para producir la disminución adecuada al formato CDV. Prueba de ello son los bordes redondeados que pueden verse, en la parte inferior de la CDV de Jouliá, que se obtuvo fotografiando un positivo en papel que tenía los bordes redondeados. La versión de los Fárvaro fue obtenida de forma análoga, a partir de un positivo que no tenía los bordes redondeados.

Esta práctica tenía el inconveniente de la pérdida de calidad durante el proceso, sobre todo por la dificultad que entrañaba enfocar bien el plano en el que se encontraba el positivo a reproducir. Si se comparan ambas versiones con el positivo de la Biblioteca Nacional, la pérdida de nitidez es evidente.

Otra de las vistas que he podido encontrar que se repite entre Jouliá y los hermanos Fárvaro; es la vista de la Lonja (Fig. 16.19), en la que parece clara la autoría de Jouliá, pues es una de las vistas nombradas en la nota de prensa a la que nos hemos referido anteriormente.

La calidad y nitidez de las dos vistas es muy similar y en la versión de los Fárvaro aparece mayor campo de la escena que la CDV de Jouliá, por lo que todo parece indicar que ambas copias pudieron ser realizadas a partir del mismo cliché. Es muy probable que los hermanos Fárvaro llegaran a un acuerdo con Jouliá para quedarse con sus vistas antes de que él abandonase definitivamente la ciudad.

He podido comprobar que los hermanos Fárvaro no sólo publicaron vistas de Jouliá, sino que comercializaron también, bajo su nombre, las vistas de otros editores como J. Laurent, del que hablaremos más adelante, y de Ernest Lamy. En realidad, de las 8 vistas en formato CDV, firmadas por los Fárvaro a las que he podido acceder, sólo dos de ellas podrían ser realmente suyas, ya que no he podido hallar sus homólogas entre las colecciones privadas y archivos visitados, si bien, esto no demuestra que no las pudiera haber.



Fig. 16.19. E. Jouliá, ca.1865, *Vista de la Lonja*. 6.3x10.6 cm. Colección Díaz Prósper (izda) Vista publicada por los Hermanos Fárvaro. 6.3x10.6 cm. Colección Javier Sánchez Portas (dcha.)



Fig. 16.20. Vistas de J. Laurent y las publicadas por los Hermanos Fárvaro en formato Carta de Visita

En la Fig. 16.20 se muestran dos vistas de J. Laurent, publicadas también por los Hermanos Fárvaro en formato CDV. No cabe duda que pertenecen a Laurent, pues su cliché original se conserva en el Instituto del Patrimonio Cultural Español. La versión realizada por los Fárvaro se obtuvo fotografiando un positivo en papel de Laurent, de ahí la diferencia de calidad entre el original y copia. Obsérvese también que el recorte inferior en las versiones de Fárvaro se produce por el punto exacto en el que se evita la aparición de la etiqueta con el título y la firma de Laurent.

Aparte de la falsa estereoscópica de Fárvaro de la plaza de Toros, no he podido encontrar ninguna otra firmada por ellos ni por Jouliá, sin embargo, he podido acceder a una serie comercial anónima, que plagia las vistas de otros fotógrafos como Lamy, Andrieu, Laurent y contiene además varias falsas estereoscópicas, realizadas a partir de vistas de Jouliá (Fig. 16.21). En aquella época el plagio de fotografías y vistas estereoscópicas era algo muy común al no haber ninguna normativa que preservara la propiedad intelectual.



Fig. 16.21. Falsas estereoscópicas compuestas a partir de las vistas de Jouliá. 8.7x17.6 cm
Colección Javier Sánchez Portas

Obsérvese que las tarjetas tienen un diseño y una tipografía muy parecida a la falsa estereoscópica firmada por los hermanos Fárvaro (Fig. 16.18).



Fig. 16.22. Reproducción de una vista de Lamy. 8.7x17.6 cm. Colección Javier Sánchez Portas (sup)
 Cartulina original de E. Lamy, 1863. *Puerta de Quart*. 8.7x17.1 cm Colección Fernández Rivero (inf)

Algunas de las tarjetas de esta serie llevan en el verso²⁶ el cuño, estampado con un tampón, del establecimiento en el que debió venderse la vista. Se trata de dos tiendas distintas de la ciudad de Valencia; la del óptico Luís Lledó, situada en la Calle San Vicente, nº 3, y la del óptico Francisco Rafi, en la Plaza Sta. Catalina, nº 17. Ambos establecimientos habían pertenecido anteriormente al óptico Bernardo Villalba, quien anunciaba su actividad entre 1862 y 1868 (Fernández & Sanchís, 2013), por lo que la venta de estas cartulinas debe ser posterior a estas fechas.

Esta serie debió ser realizada por algún fotógrafo de la ciudad, quien la suministró a estos establecimientos de óptica. Pensemos que, en aquel momento, la fotografía no

²⁶ Se llama verso a la parte trasera de la fotografía y recto a la parte delantera

estaba al alcance de cualquiera y se precisaban unos grandes conocimientos y un instrumental bastante caro para poder ejercer la profesión.

Lo que hace tan interesante a esta serie tan peculiar es que en ella se reproducen cuatro vistas, verdaderamente estereoscópicas, que podrían pertenecer a un fotógrafo local. La prueba de ello es que he encontrado una CDV, firmada por Fárvaro, que coincide con una de estas vistas estereoscópicas (Fig. 16.23).

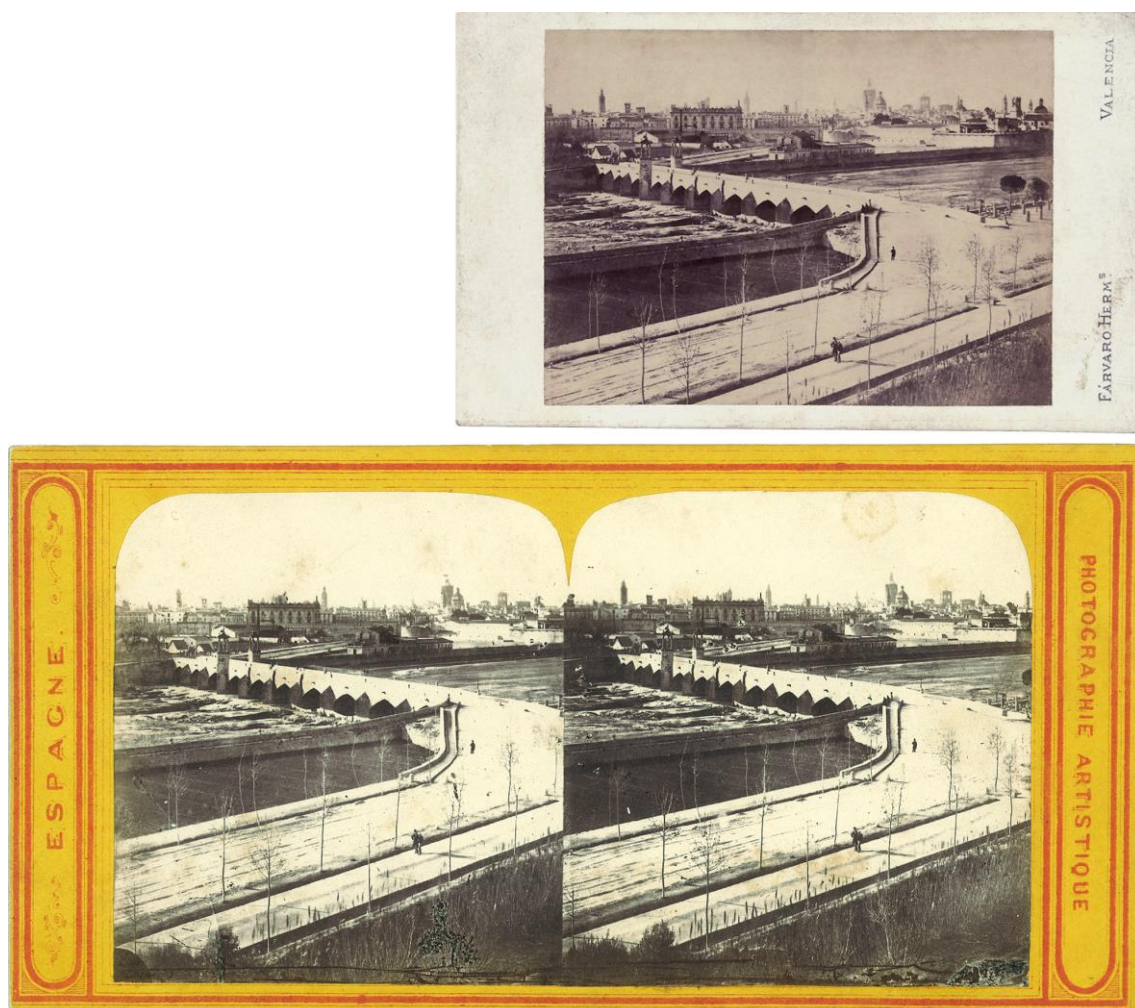


Fig. 16.23. Fárvaro Hermanos, ca.1865, Vista panorámica. 6.3x15.6 cm. Colección Díaz Prósper (sup.) Tarjeta estereoscópica de la serie. 8.7x17.6 cm. Colección Sánchez Portas (inf)

La tarjeta de visita de los Fárvaro coincide exactamente con la imagen derecha de la vista estereoscópica. Esta coincidencia sería suficiente para afirmar la autoría de los Hermanos Fárvaro, pero, vistos los antecedentes, no habría que descartar la autoría de otros fotógrafos como Jouliá o de algún tercero desconocido. Lo que es seguro es que estas cuatro vistas no pertenecen a ningún otro de los editores comerciales estudiados.

Hay una característica particular en estas cuatro vistas que hace presuponer que se deben a un mismo fotógrafo y es que en ellas aparecen siempre dos personajes, elegantemente vestidos con sombrero de copa (Fig. 16.24).

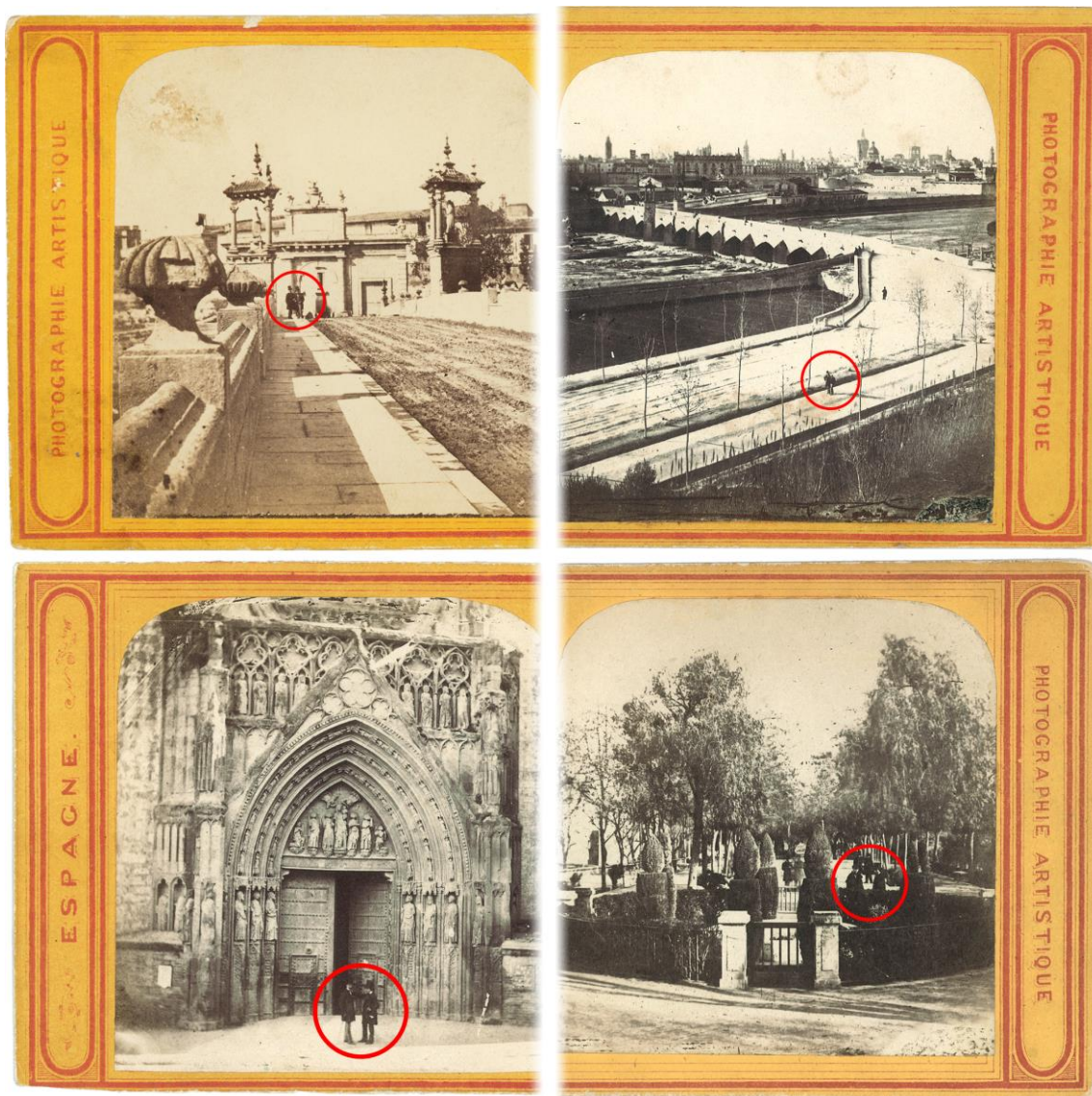


Fig. 16.24. Los dos caballeros elegantemente vestidos son una constante en estas cuatro vistas Colección Huguet (vista sup.izda.) y Colección Javier Sánchez Portas (resto de vistas)

Resulta muy difícil determinar la relación entre los personajes que posan y el fotógrafo, pero, aunque la autoría de los Fàrvaro resulta dudosa, cabría pensar que fueran dos de los tres hermanos los que posan, mientras que el otro toma la fotografía. También su vestimenta resulta muy elegante como para tratarse de simples ayudantes.

Las vistas muestran el Puente del Real (sup.izda.), una vista panorámica con el Puente del Mar (sup. dcha.), la Puerta de los Apóstoles de la Catedral (inf. Izda.) y el Plantío (inf. Dcha.). En la primera puede verse la muralla completa, en el punto donde comenzó la demolición, por lo que debieron realizarse antes de Febrero de 1865.

16.7. Jean Andrieu

Jean Jules Andrieu (1816-?), fue un fotógrafo francés, activo entre 1860 y 1876, que realizó un gran número de vistas de numerosos países Europeos y de Extremo Oriente, reuniendo así un extenso catálogo de miles de vistas, de las cuales, unas 300 pertenecen a su viaje por España. (Hervás, 2005) (Fernández, 2011).

No parece haber dudas acerca de su autoría como fotógrafo en las vistas de España, pues en el prólogo de su catálogo dice lo siguiente:

“Al remitirles el catálogo del nuevo viaje estereoscópico que acabo de realizar por España [...]”

(Andrieu, 1868)

A partir de este catálogo se ha obtenido la lista completa de las 9 fotografías realizadas en la ciudad de Valencia, que según Hervás (2005) fueron tomadas entre 1867 y 1868.

- 2609 Lonja de la seda
- 2610 Vierge de los desamparados
- 2611 Tour de Miguelete et dôme de la Cathédrale
- 2612 Porte d'entrée a la Cathédrale
- 2613 Tour de Miguelete et dôme de la Cathédrale
- 2614 Vue générale prise de la tour de la Cathédrale
- 2615 Vue générale prise de la tour de la Cathédrale
- 2616 Fontaine de la Alameda
- 2616bis Porte de Serrano

El conjunto de vistas de Andrieu presenta algunas tomas novedosas con respecto a sus predecesores, como la vista de la Lonja, en que puede verse el cuerpo central sin almenas y con un reloj, y la fuente de las cuatro estaciones de la Alameda, que había sido instalada en 1863, frente al Puente del Real. También resulta interesante la vista de la figura de la Virgen de los Desamparados, que estaba ubicada en uno de los casalicios del Puente del Mar. Esta imagen, realizada en 1782 por Francisco Sanchiz, sustituía a otra, realizada por Francisco Vergara en 1721, que se había deteriorado en la riada de 1776. Ambas imágenes fueron destruidas durante la Guerra Civil y la que hay actualmente fue realizada por Vicente Navarro en 1946.

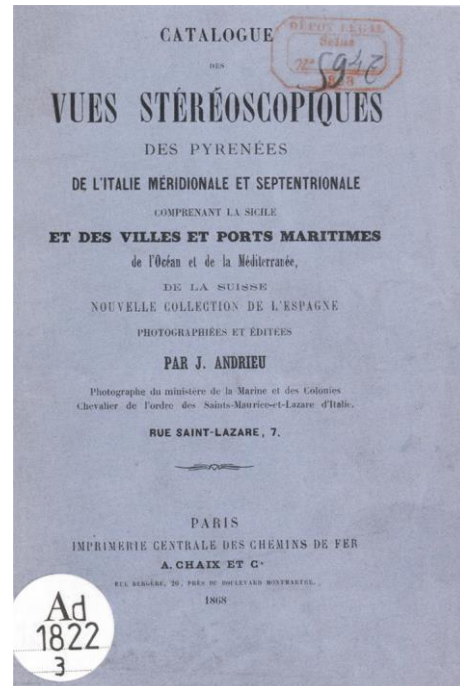


Fig. 16.25. Catálogo de vistas estereoscópicas de Andrieu (1868) Biblioteca Nacional de Francia (Fernández, 2011)

Resultan igualmente interesantes las vistas de la Catedral, desde la Plaza de la Virgen (Fig. 16.26), en la que pueden verse las casas de los Canónigos y el reloj, adosadas a la catedral, que serían derribados en 1970 para devolver el edificio a su estado original.

Desde el punto de vista técnico, Andrieu utilizó, al igual que Lamy, una cámara estereoscópica, pero sus vistas no resultan tan espontáneas como las de éste último, pues trata de evitar las personas y no trabaja tanto la continuidad espacial. Alguna de las composiciones de Andrieu pueden resultar algo anodinas, con tendencia a poner el objeto de interés justo en el centro. Las fotos de Andrieu fueron publicadas posteriormente por el editor Adolphe Block, que realizó también una serie denominada *Simili Verre* que se reproducía sobre un soporte transparente. Esta serie fue realizada con motivo de la Exposición Universal de Paris de 1900 (Fig. 16.26 inf.).

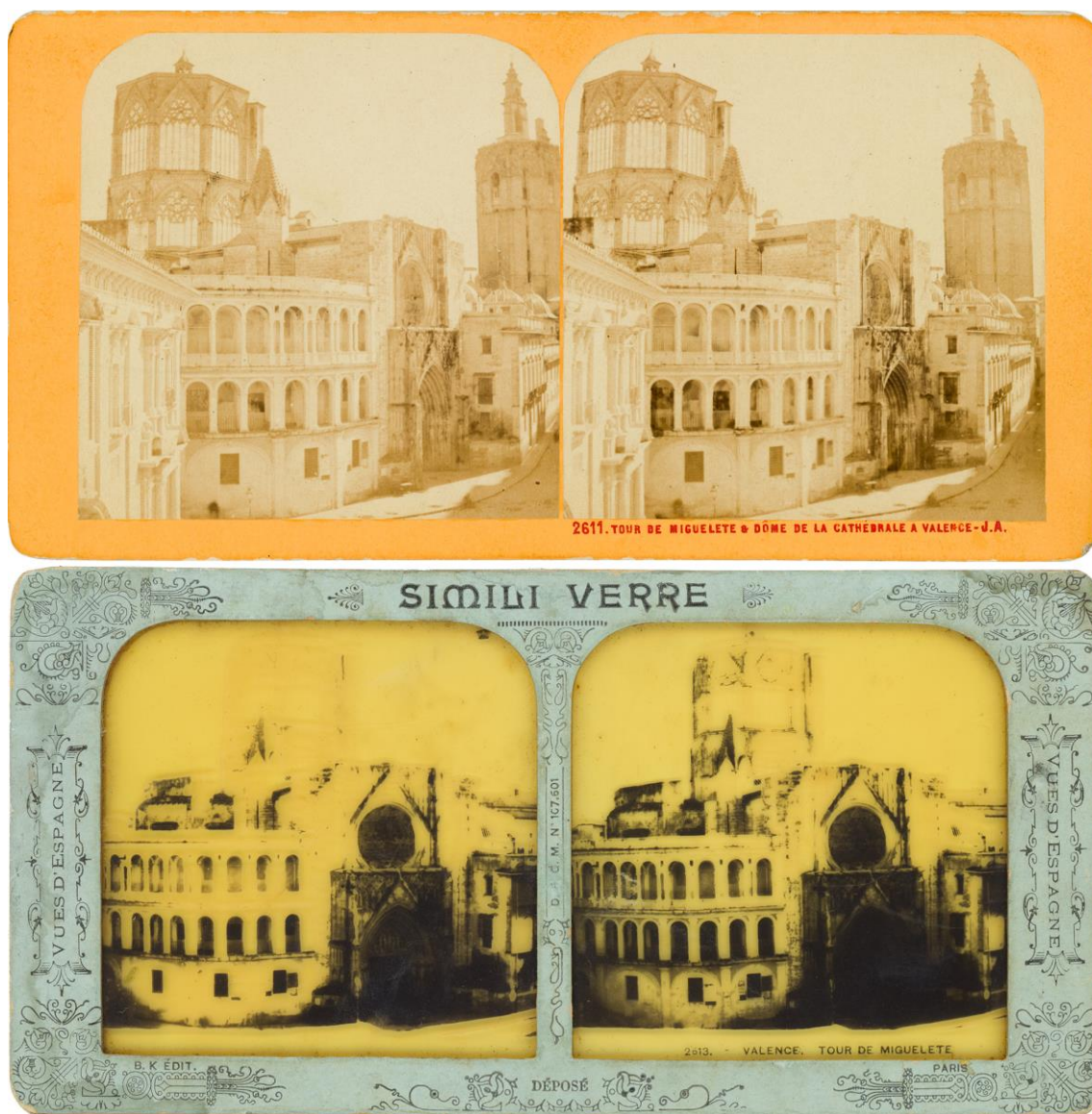


Fig. 16.26. J. Andrieu, 1867. Vistas 2611 y 2613 (Simili Verre de Adolphe Block). 8.8x17.5 cm
Colección José Huguet

16.8. Jean Laurent

Jean Laurent (1816-1886) es junto con el galés Charles Clifford, uno de los fotógrafos más relevantes del siglo XIX en España; de origen francés, se trasladó a Madrid en 1843, donde trabajó, junto con otro socio, en un taller dedicado a la fabricación de papeles y cartones especiales. Muy pronto se interesó por la fotografía y en 1856 abrió su estudio en la Carrera de San Jerónimo, en el mismo local donde había tenido su gabinete Clifford. (Teixidor, 2003)

Laurent adquirió enseguida un importante prestigio. En 1857 ya trabajaba para la Casa Real y le fue otorgado el título de fotógrafo de S.M. la Reina. Laurent tuvo una gran vista comercial y buscó colaboradores para ampliar su catálogo, por lo que muchas de sus fotografías son realizadas por otros fotógrafos comisionados, a los que debió dar unas directivas muy claras en cuanto a aspectos compositivos y técnicos, puesto que, dentro de lo que cabe, la obra publicada por Laurent tiene una gran unidad estilística.

Es interesante destacar la figura del Valenciano José Martínez Sánchez, colaborador de Laurent en sus inicios, quien fotografía un gran número de obras públicas y le ayuda en el desarrollo del papel Leptográfico²⁷. La grandeza de la marca Laurent eclipsa la figura de Martínez Sánchez durante muchos años, pero sus aportaciones han sido recuperadas gracias a los estudios recientes de Maynés (2003) y Díaz-Aguado (2003).

La gran importancia de la labor desempeñada por la industria fotográfica de Laurent es la documentación de los principales monumentos de toda la geografía española, así como de multitud de obras de arte. Gran parte del legado de Laurent ha llegado hasta nuestros días y se conserva actualmente en el Instituto del Patrimonio Cultural



Fig. 16.28 Posiblemente el propio J. Laurent, ca.1861. Col. Juan Naranjo (Teixidor, 2003)



Fig. 16.29. Carromato laboratorio móvil de J. Laurent ca.1872. Fototeca del IPCE

²⁷ Papel fotográfico formado por varias capas que ofrecía un acabado muy liso y satinado con el que se obtenían copias de alta calidad e imágenes muy bien definidas. Ver (Maynés, 2003)

Español (IPCE), en el archivo Ruiz Vernacci, que contiene cerca de 12.000 negativos de vidrio al colodión húmedo, unas 1000 de ellas en formato estereoscópico 13x18 cm.

El censo de fotografías estereoscópicas de la casa Laurent en Valencia se ha obtenido de la Guía Turística-Catálogo publicada por Laurent (1879) (Fig. 10.30), en la que figuran las siguientes 28 vistas:

- 894 La place des taureaux (VN-17387) y (VN-18213)
- 896 Portail du dit palais (VN-17378) (Palacio Marqués de Dos Aguas)
- 897 Eglise de Sainte Catherine (VN-17376)
- 898 Le Miguelete, ou tour de la cathédrale (VN-17227)
- 899 Vue générale de la porte del Palau
- 900 Porte del Palau (VN-17912)
- 901 Porte des Apôtres (VN-17911)
- 902 Vue générale de la cathédrale (VN-17831) y (VN-17944)
- 903 Place de Constitution (VN-17364)
- 905 Une maison particulière (VN-17356)
- 906 La Audiencia, ancien palais des Cortès (VN-17791)
- 909 Statue de Saint christophe
- 910 Vue extérieure de la Lonja (VN-17361) (Rota)
- 911 Vue intérieure de la Lonja
- 913 Eglise de los Santos Juanes (VN-17377)
- 915 Porte de Cuarte (VN-17565 y VN-17596)
- 916 Porte de Serranos (VN-17603)
- 916 bis Autre vue de la porte de Serranos (VN-17186)
- 917 Eglise du Carmen, ou de Santa Cruz
- 918 El Temple (VN-17506)
- 919 Vue générale panoramique de Valence, en 6 morceaux (VN-17150)(Sólo1)
- 920 Le pont royal (VN-17374)
- 921 Palais du comte de Cerbellon (VN-17007)
- 922 Place de Saint Dominique (VN-17883) (Rota)
- 923 Promenade de la Glorieta
- 924 Place de la Douane (VN-17918)
- 927 Eglise de Saint André (VN-17387)
- 643 Salón de la Audiencia (VN-17770) (Ausente en catálogo)

Obsérvese que la numeración no es correlativa; ello se debe a que se han omitido en el listado aquellas vistas no estereoscópicas, que también aparecen en la Guía. Se ha preferido dejar el título original de las fotografías en francés, tal como aparecen en la guía, destinada a turistas franceses, pero las placas estereoscópicas de vidrio

originales llevan adheridas una etiqueta donde figura la numeración del catálogo con el título en castellano (Fig. 16.32).

En el archivo Ruiz Vernacci se conservan 26 de estas placas de vidrio estereoscópicas originales, cuya referencia ha sido añadida entre paréntesis al final del título de cada fotografía. Dos de ellas están rotas; la correspondiente a la vista 910 (La Lonja) y la correspondiente a la vista 922 (Plaza de Santo Domingo). Cabe destacar la publicación de José Huguet titulada: Las fotografías Valencianas de J. Laurent (Huguet, 2003), que recopila las fotografías de la Comunidad Valenciana, comercializadas por la casa Laurent, incluyendo también sus vistas estereoscópicas, positivadas a partir de las placas de vidrio presentes en el archivo Ruiz Vernacci.

Las fotografías estereoscópicas de Valencia fueron realizadas por el fotógrafo de origen francés, comisionado de Laurent, Jules Ainaud (1837-1900) entre mayo y agosto de 1870. Dan fe de ello las numerosas notas de prensa recopiladas por Huguet (2003).

Ainaud fotografió para Laurent las ciudades del levante español desde Murcia hasta Barcelona. Se tiene constancia de que, en 1892, tenía su propio estudio en Barcelona, que le había sido traspasado por el gran fotógrafo catalán Antonio Esplugas (Martí, 2010).

Observando los pares estereoscópicos de Ainaud, puede deducirse que no emplea una cámara estereoscópica, sino que realiza las tomas alternadamente. Ambas imágenes quedan registradas en una sola placa, gracias al empleo de una cámara de lente única con objetivo o respaldo deslizante. Esto resulta evidente al comprobar las incoherencias entre imágenes, a causa de los sujetos en movimiento, que aparecen en una toma y desaparecen o cambian de posición en la siguiente, por el lapso de tiempo transcurrido entre las exposiciones.

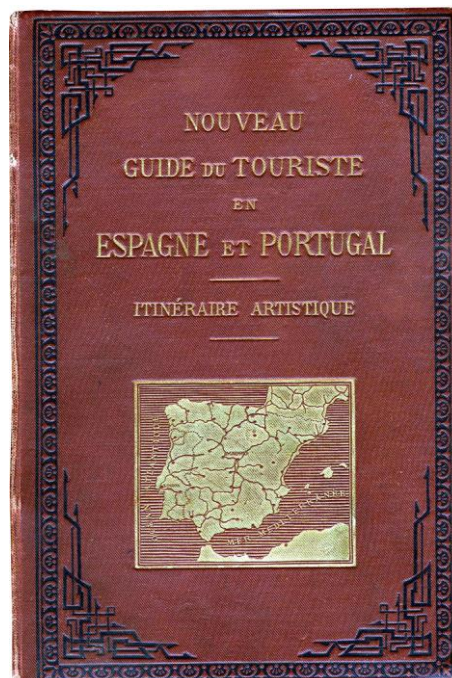


Fig. 16.30. J. Laurent, 1879. Nueva guía del turista en España y Portugal. Colección Carlos Teixidor



Fig. 16.31. Jules Ainaud (1837-1900) Según retrato de Antonio Caba, 1872 Museo Nacional de arte de Cataluña

La definición obtenida es muy buena y las composiciones resultan sumamente interesantes, aunque proporcionan una imagen de ciudad fantasma, pues son pocas las ocasiones en las que se incluyen personas, seguramente por evitar las posibles incongruencias entre tomas.

Una de las directrices compositivas que parece clara de la casa Laurent y que Ainaud cumple a rajatabla es la toma de plano del cuadro vertical, es decir, colocar la cámara bien nivelada de modo que la placa de vidrio se mantenga perfectamente vertical. Con ello se garantiza que las aristas verticales de los edificios, se mantengan verticales en la fotografía, lo que siempre ha sido una máxima de la fotografía arquitectónica, ya desde la Misión Heliográfica²⁸, que, sin embargo, incumplen otros fotógrafos anteriores como Lamy, Andrieu o Gaudin. Esta regla tiene su origen en la tradición de los dibujos arquitectónicos en perspectiva de plano del cuadro vertical y, en mi opinión, su aplicación otorga a las representaciones un valor añadido, lo que no quiere decir que aquellas fotografías que no sigan esta norma tengan que ser necesariamente inadecuadas.

Ainaud sigue esta regla hasta sus últimas consecuencias y en ocasiones se ve obligado a cortar el remate de edificios muy altos como las torres (Fig. 16.32). Para evitarlo trató de encontrar posiciones elevadas desde donde realizar la captura, pero muchas veces esto no es posible o resulta insuficiente. Ainaud hubiera disfrutado con una cámara de objetivo descentrable como la diseñada por Meydenbauer, pero recordemos que ésta cámara tan exclusiva no sería inventada hasta 1879.

Analizando las placas de vidrio originales (Fig. 16.32) podemos ver muy bien el proceso seguido para la edición posterior de la tarjeta estereoscópica; se ve como se ha marcado la zona de recorte; un rectángulo de aproximadamente 8x16 cm, en el cual se inscriben las dos imágenes del par, que quedan inscritas, a su vez, dentro de un cuadrado de 8x8 cm, que es aproximadamente el tamaño de los pares positivados que se adhieren a la cartulina definitiva. El tamaño de las tarjetas publicadas por los distintos editores es bastante homogéneo, para amoldarse a los estereoscopios tipo Brewster y Holmes. Las tarjetas convencionales tienen un tamaño aproximado de 3.5x7 pulgadas, lo que equivale aproximadamente a 9x18 cm (Fig. 16.33).

Por norma general el paralaje en las tarjetas estereoscópicas suele rondar los 8 cm, en los puntos más lejanos de la escena, y los 7.5 cm, en los más cercanos. Esta diferencia de paralaje de aproximadamente 5 mm, resulta bastante confortable para

²⁸ La Misión Heliográfica (*Mission Héliographique*), fue el primer proyecto de documentación fotográfica arquitectónica llevado a cabo, en 1851, por la Comisión de Monumentos Históricos de Francia; fue dirigida por Prosper Mérimée quien encargó a los fotógrafos Gustave Le Gray, Auguste Mestral, Édouard Baldus, Hippolyte Bayard y Henri le Secq, la toma de fotografías de una serie de monumentos importantes para los que había previsto o se estaba realizando, una intervención restauradora, con el fin de preservar su imagen.

las condiciones de visualización proporcionadas por el estereoscopio. Sin embargo, he encontrado tarjetas con diferencias de paralaje que llegan a sobrepasar el centímetro, en las que el efecto de relieve resulta demasiado exagerado y su visualización puede resultar algo incómoda. En el caso de Ainaud, la separación entre tomas es adecuada y sus pares producen un efecto de relieve pronunciado, pero confortable.

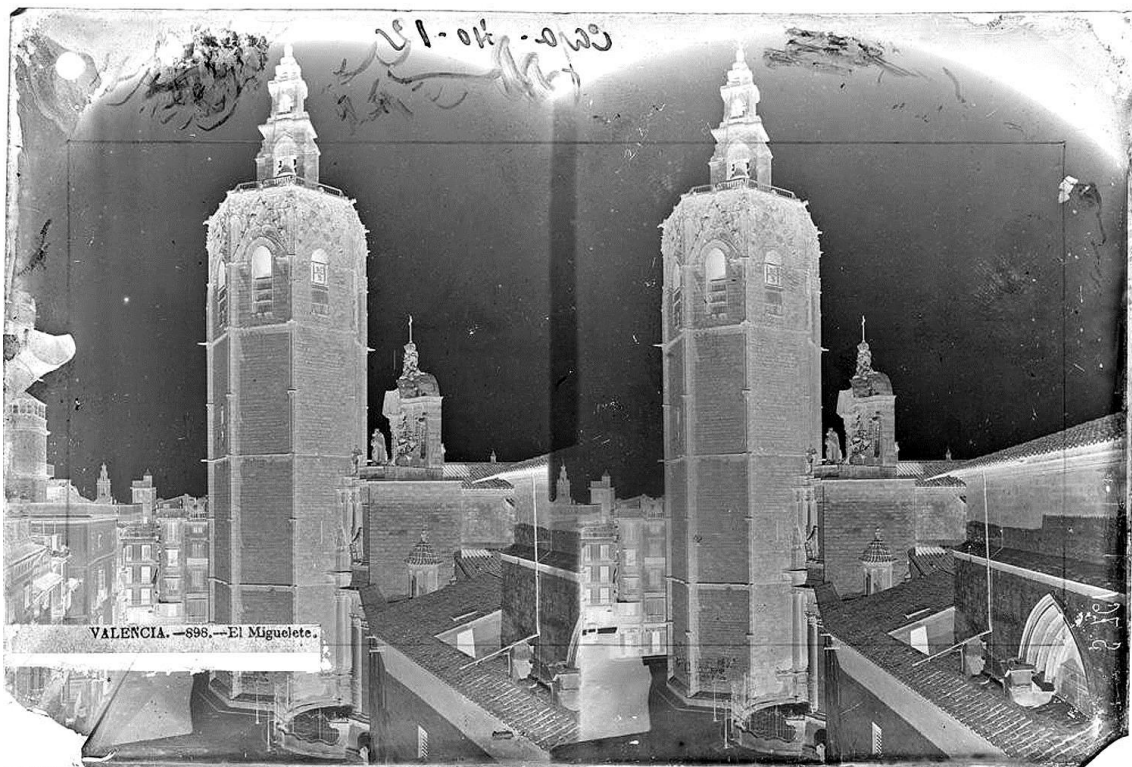


Fig. 16.32. Jules Ainaud, 1870. *El Miguelete*. Negativo de vidrio al colodión húmedo. 13x18 cm
 Archivo Ruiz Vernacci IPCE

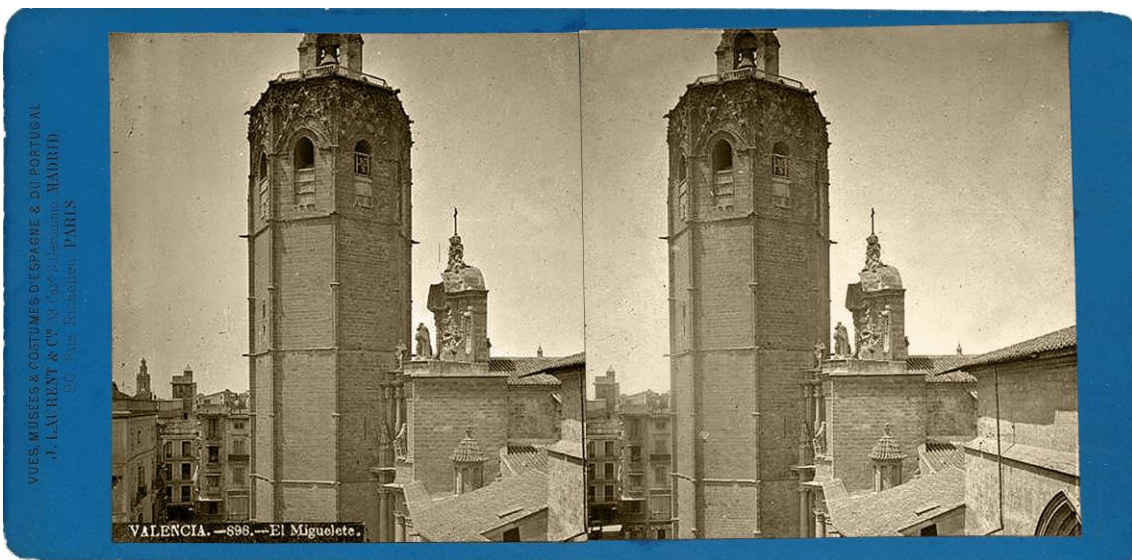


Fig. 16.33. Formato tipo de tarjeta estereoscópica de J. Laurent. Álbumina sobre cartulina. 8.8x17.8 cm

16.9. Frank M. Good

Frank Mason Good (1839-1928), fue un fotógrafo y editor inglés que se unió, en 1864, a la Sociedad Fotográfica de Londres, demostrando su especial talento para la fotografía paisajística con vistas de la campiña inglesa, que fueron publicadas en libros y en tarjetas estereoscópicas. Durante las décadas de 1860 y 1870 realizó cuatro viajes a Oriente Medio, trabajando como comisionado de Francis Frith y siendo su asistente en alguna ocasión. Frank Good solía firmar sus negativos con su apellido o con sus iniciales FMG, pero sus vistas de Oriente Medio fueron publicadas por Frith y por el editor W.A. Mansell & Co, pasando desapercibida su autoría (Sumner, 2013).

Frank M. Good también llegó a editar sus propias vistas, como en el caso de su viaje por España, alrededor de 1870. Sus fotografías de Valencia son prácticamente coetáneas a las de Laurent, como puede desprenderse de la comparación realizada en la Fig. 16.34.

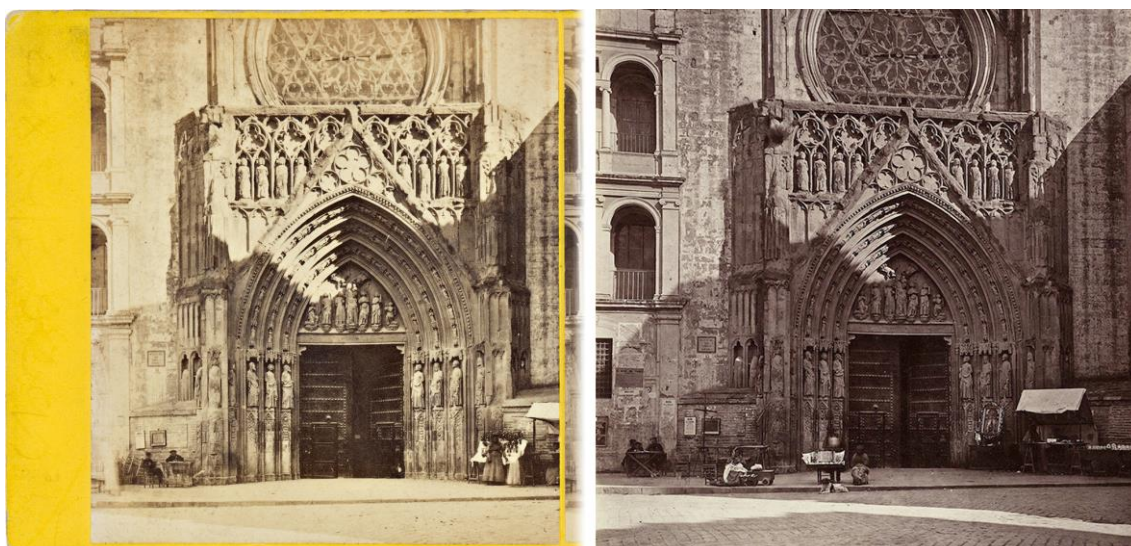


Fig. 16.34. Comparación entre las vistas de la puerta de los Apóstoles de Frank M. Good (izda) y la de Laurent (J. Ainaud) (izda). Los elementos presentes indican una gran proximidad temporal entre ellas

Es difícil determinar el número exacto de vistas realizadas, pues no he podido encontrar ningún catálogo que las recoja, pero gracias a la información obtenida en las conversaciones con el investigador y arquitecto Carlos Sánchez²⁹ y con el historiador Juan Antonio Fernández Rivero, se ha podido confirmar la fecha posible de las tomas y su número, basado en los ejemplares encontrados en su colección. Según los datos aportados por ambos investigadores, las vistas estereoscópicas de Valencia podrían situarse entre la nº 266 y la nº 271, es decir, se editaron 6 vistas, de un total de 121 realizadas por toda España (vistas nº220 a la nº340).

²⁹ Carlos Sánchez fue comisario, junto a Javier Piñar, de la Exposición: *Una imagen de España fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)* y coautor de su Catálogo. Carlos es experto en fotografía antigua y posee una gran colección

16.10. León et Lévy

Tal como se comentó anteriormente, Moyse Léon (1812-?) e Isaac George Lévy (1833-1913), fueron los sucesores de Ferrier y Soulier. Ellos siguieron comercializando sus vistas y ampliando el catálogo con fotografías nuevas. La empresa tuvo una larga trayectoria comercial gracias a la comercialización de tarjetas postales, que aparecieron en la última década del siglo XIX y tendrían un momento álgido a principios del siglo XX (Teixidor, 1999)

La empresa fue cambiando de nombre a lo largo de su historia; según Fernández (2011) la secuencia es la siguiente: M. Léon et J. Lévy (1864-1872), J. Levy et Cie (1872-1895), J. Levy et ses Fils (1895-1920), Levy et Neurdein réunis (1920-1932), Compagnie des Arts Photomécaniques (1932-1969), hasta que sus fondos fueron adquiridos por la agencia Roger-Viollet de París, quien sigue conservando los clichés originales de la compañía.

La serie llevada a cabo por la compañía Levy et Cie es la más prolífica de las realizadas en Valencia y, en mi opinión, también la más bella y fascinante de todas, pues sus imágenes muestran algo que no pudieron reflejar sus predecesores: la vida de la ciudad.

Ya hemos hablado previamente de las dificultades de captar las personas y los objetos en movimiento, por culpa de los largos tiempos de exposición requeridos por el proceso del colodión húmedo, pero los fotógrafos de la compañía Levy tuvieron una ventaja con respecto a los primeros y es que utilizaron placas al Gelatino-Bromuro³⁰; una emulsión de bromuro de plata, mezclada con gelatina, sobre el soporte de vidrio, que acortaba los tiempos de exposición a fracciones de segundo y hacía posible por fin la fotografía instantánea. Estas placas venían ya preparadas en seco y no era necesaria la farragosa preparación y revelado inmediato que requería la técnica del colodión húmedo.

José Huguet Chanzá fue el primero en publicar un monográfico con fotografías de Léon y Lévy en España, con su libro: *Valencia en 1888* (Huguet, 1999), en él se incluyen también algunas estereoscópicas. Tras él han aparecido otros libros como el publicado por Garófano (2002), centrado en aspectos etnográficos, y el publicado por Hernández (2012), sobre la ciudad de Zaragoza, fruto de la exposición: *Zaragoza en la mirada ajena*.

No se sabe nada acerca de la identidad de los fotógrafos que realizaron el viaje por España, según Hernández (2013), se debieron emplear al menos 3 cámaras en cada

³⁰ El proceso químico al Gelatino-Bromuro fue inventado por el británico Richard Maddox en 1871 y perfeccionado por otros científicos como Charles Harper Bennet. Las placas al Gelatino-Bromuro fueron sustituyendo al Colodión Húmedo a principios de la década de 1880

escenario, con las que se obtuvieron multitud de tomas en diferentes formatos: formato álbum 24x30 cm, panorámico 13x21 cm y dos clases de formatos estereoscópicos, 10x21 cm y 13x21cm.

Según Huguet (1999) las fotografías de Valencia se realizaron en 1888, dato que pudo obtenerse gracias al minucioso análisis del contenido de las fotografías; concretamente por la aparición de una urna provisional que Navarro Reverter había erigido, en 1888, en memoria de las víctimas de la epidemia de cólera que sufrió Valencia en 1885.

La empresa publicó diversos catálogos y, gracias a José Huguet, he podido acceder a los publicados en 1895 y 1904; el primero recoge todas las vistas, en sus diversos formatos, mientras que el segundo es específico de las vistas estereoscópicas y, en el caso de Valencia, aparecen cinco vistas menos que en el primero.



Fig. 16.35. Catálogo de Lévy et Cie.
(Huguet, 1999)

A continuación, se muestran las 67 vistas estereoscópicas tomadas en Valencia por la compañía, según el catálogo de 1895:

- 2501 (14368) Valence. Vue panoramique
- 2502 (14369) Valence. Panorama de la Huerta
- 2503 (14370) Valence. Vue panoramique, côté du midi
- 2506 (14372) Valence. Panorama pris du pont de la mer
- 2509 (14373) Valence. Panorama pris du pont de la mer
- 2510 (14374) Valence. Port du Grau
- 2515 (14375) Valence. Vue du port du Grau
- 2516 (14376) Valence. Vue du port du Grau
- 2517 (elim.) Valence. Vue du port du Grau
- 2518 (14377) Valence. Porte de Serranos
- 2520 (14378) Valence. Porte de Cuarte
- 2522 (14379) Valence. Entrée de la ville par la porte de Sainte-Lucie
- 2524 (14380) Valence. Le marché
- 2526 (14381) Valence. Le marché
- 2527 (14382) Valence. Place e Tétuan
- 2528 (14383) Valence. Place de la Constitution

- 2529 (14385) Valence. Place de Saint-François
- 2530 (14386) Valence. Rue St-Vincent
- 2531 (14387) Valence. Rue de la Bajada de San Francisco
- 2532 (14388) Valence. Rue de la Bolseria et Tros Alt
- 2533 (14389) Valence. Promenade de la Glorieta
- 2534 (14390) Valence. Promenade de la Glorieta
- 2535 (14391) Valence. Promenade de la douane
- 2536 (14392) Valence. Promenade de la Alameda
- 2537 (14393) Valence. La foire à la porte de Sainte-Lucie
- 2540 (14394) Valence. Le Campo-Santo
- 2541 (14395) Valence. Le Campo-Santo
- 2542 (14396) Valence. Le Campo-Santo
- 2543 (14397) Valence. Le Campo-Santo
- 2544 (14398) Valence. Le pont royal
- 2545 (14399) Valence. Le Cirque de Taureaux
- 2546 (14400) Valence. Intérieur du cirque de Taureaux
- 2547 (14401) Valence. Le Temple
- 2548 (14402) Valence. Le Douane
- 2549 (14403) Valence. La Lonja (marché des Soies)
- 2550 (14404) Valence. Intérieur de la Lonja
- 2551 (14405) Valence. La Audiencia
- 2552 (14406) Valence. Salon royal de la Audiencia (partie basse)
- 2553 (elim.) Valence. Salon royal de la Audiencia (partie haute)
- 2555 (14407) Valence. Collège du patriarche
- 2556 (14408) Valence. Cour du Collège du patriarche
- 2557 (14409) Valence. Cour de l'Université
- 2558 (elim.) Valence. Portail de l'Hopital civil
- 2559 (14410) Valence. Statue de Ribéra
- 2560 (14411) Valence. Palais du marquis de Ripalda
- 2561 (14412) Valence. Palais du marquis de Dos Aguas
- 2562 (14413) Valence. Portail du palais du marquis de Dos Aguas
- 2563 (elim.) Valence. Fontaine de la Alameda
- 2564 (14414) Valence. Vue générale de la Cathédrale
- 2565 (14415) Valence. La tour de la cathédrale. (El Miguelete)
- 2566 (14416) Valence. La Cathédrale. Porte du Palau
- 2567 (14417) Valence. La Cathédrale. Porte des Aportes
- 2568 (14418) Valence. La Cathédrale. Porte Byzantine
- 2569 (14419) Valence. Eglise de Santa Catalina
- 2570 (14420) Valence. Eglise de los Santos Juanes

- 2571 (14421) Valence. Façade de St-Michel le Royal
- 2572 (14422) Valence. Eglise de Santa-Cruz
- 2573 (14423) Valence. Portail de l'Eglise St-André
- 2574 (elim.) Valence. Statue de St-Cristophe
- 2576 (14424) Valence. Barbiers sur le pont de Serranos
- 2579 (14425) Valence. Types de jeunes filles
- 2580 (14426) Valence. Types de jeunes filles
- 2581 (elim.) Valence. Types de jeunes filles
- 2582 (elim.) Valence. Type de femme
- 2583 (14427) Valence. Une rue de Cabagnal
- 2584 (14428) Valence. Une rue de Cabagnal
- 2585 (14429) Valence. Une rue de Cabagnal

La numeración corresponde al catálogo de 1895 y, entre paréntesis, se ha añadido la numeración correspondiente al catálogo de 1904, que sigue un orden correlativo al tratarse de un catálogo donde aparecen sólo vistas estereoscópicas. Parece ser que este catálogo tiene una numeración idéntica a otro publicado por la empresa en 1888, en el que según Huguet (1999) aparecían 62 vistas.

Es importante señalar que el catálogo informático de la agencia Roger-Viollet aparecen únicamente 27 fotografías estereoscópicas de Valencia, en versión coloreada, por lo que todavía queda mucho material por catalogar y digitalizar.

Las fotografías de Levy et Cie muestran, por primera vez, el bullicio de una ciudad llena de vida y documentan las distintas actividades que se desarrollaban en la ciudad; el Mercado, el Puerto, los barberos en el puente de Serranos, las corridas de toros, etc. Desde el punto de vista urbanístico y arquitectónico, tienen un especial interés las siguientes vistas: La nº 2566, que aunque fue etiquetada por la compañía como Puerta del Palau, en realidad muestra la puerta Barroca o "Puerta de los Hierros" desde la desaparecida Calle Zaragoza. También resulta muy interesante la vista nº 2565, en la que se ve la Plaza del Miguelete, cuyo espacio se anexiono a la Plaza de la Reina, al derribarse las manzanas que configuraban la calle Zaragoza. La vista nº 2258, donde se ve la puerta del Hospital Civil, actual Biblioteca Pública de Valencia, de la que sólo se conserva un fragmento. La vista nº 2260 que muestra el Palacio de Ripalda, derribado en 1968, que la mayoría de fuentes señalan su construcción entre 1889 y 1891, sin embargo, según la datación de esta serie, en 1888 ya formaba parte de la ciudad. La vista nº 2569 ofrece una interesante vista de Santa Catalina en la que aparece la Plaza de la Reina, creada en 1878, tras derribarse una manzana de casas que había junto al también desaparecido Convento de San José y Santa Tecla. Cabe destacar también la vista nº 2584, en la que puede verse una de las calles del Barrio del Cabañal (Fig. 16.36).

Las imágenes tomadas por Lévy et Cie se publicaron en el formato de cartulina habitual para el estereoscopio (Fig. 16.36) y, entrado el siglo XX, también se publicaron en un novedoso formato de Tarjeta Postal, aprovechando los nuevos procedimientos en el ámbito de la imprenta como la fototipia (Fig. 16.37).



Fig. 16.36. Léon y Lévy, 1888. *Una calle del Cabañal*. Valencia. Tissue. 9x17.5 cm. Colección Díaz Prósper

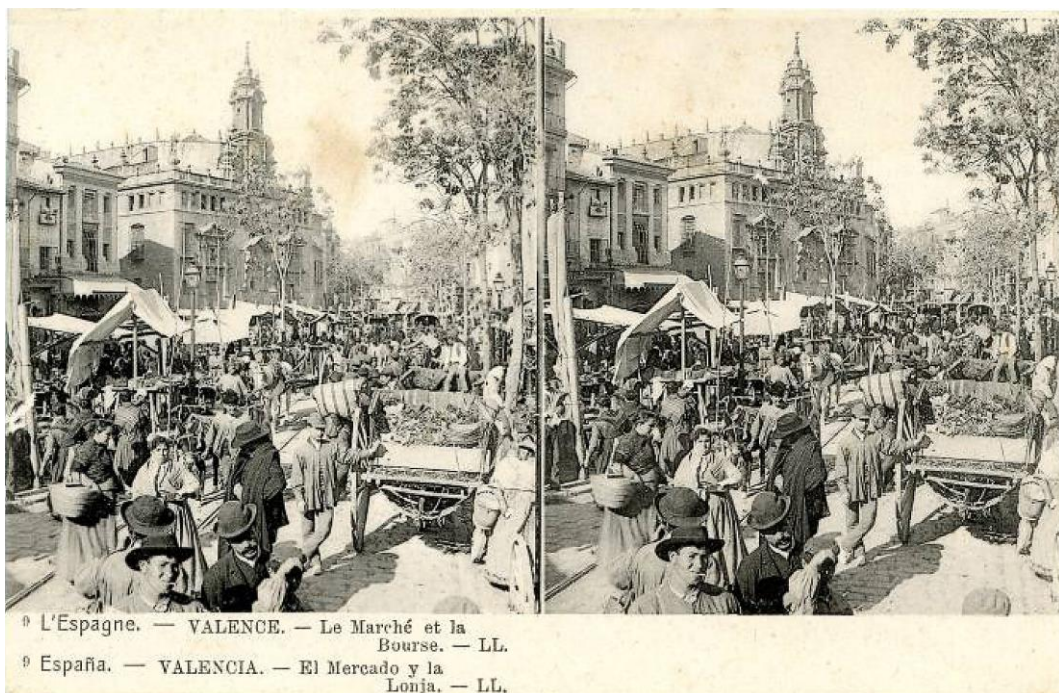


Fig. 16.37. Léon y Lévy, 1888. *El Mercado y la Iglesia de los Santos Juanes*. Valencia Tarjeta Postal estereoscópica. Fototipia. 9x14 cm (Hernández, 2013)

16.11. José Esplugas Puig

José Esplugas Puig, fue un fotógrafo catalán, hermano del gran fotógrafo Antonio Esplugas. Gracias a los estudios del investigador Ricard Marco, de la Biblioteca de Catalunya, se sabe que trabajó con su hermano Antonio hasta 1887, momento en el que abrió su propio estudio en la calle Escudillers, 89 de Barcelona, aunque en sus tarjetas figuraba “Casa fundada en 1884”. José tenía otro hermano llamado Laureno que también se dedicaba a la fotografía, por lo que para distinguirse de sus hermanos firmaba como J.E. Puig. En 1890 ya tenía correspondientes dentro y fuera de Cataluña para la venta de sus vistas. (Rodríguez & Sanchís, 2013)

Puig realizó viajes por las ciudades del levante y sur de España en la última década del siglo XIX, utilizando también el formato estereoscópico en el que editó algunas de sus vistas. Gracias a Javier Sánchez Portas, Director del archivo de la Generalitat Valenciana, he podido acceder a una de las tarjetas estereoscópicas de J.E. Puig, realizadas en la ciudad de Valencia, en donde, con toda seguridad, debió tomar un mayor número de ellas, sin embargo, al no haber ningún catálogo resulta muy difícil determinar su número exacto y de nuevo he pedido la ayuda los investigadores Carlos Sánchez y Juan Antonio Fernández, para preguntarles acerca de las fotografías de su extensa colección. Gracias a ellos he podido saber que las vistas de Valencia pudieron quedar enmarcadas entre las ciudades de Tarragona y Granada, con una numeración entre la 194 y la 232, pero esta numeración se refiere a las vistas convencionales y no a las estereoscópicas, que no van numeradas y debieron ser muchas menos. Juan Antonio Fernández me comunicó que tiene un ejemplar estereoscópico del Puerto de Valencia. Por tanto, resulta imposible determinar cuántas de estas 39 vistas fueron estereoscópicas, pero al menos he tenido constancia de dos de ellas.

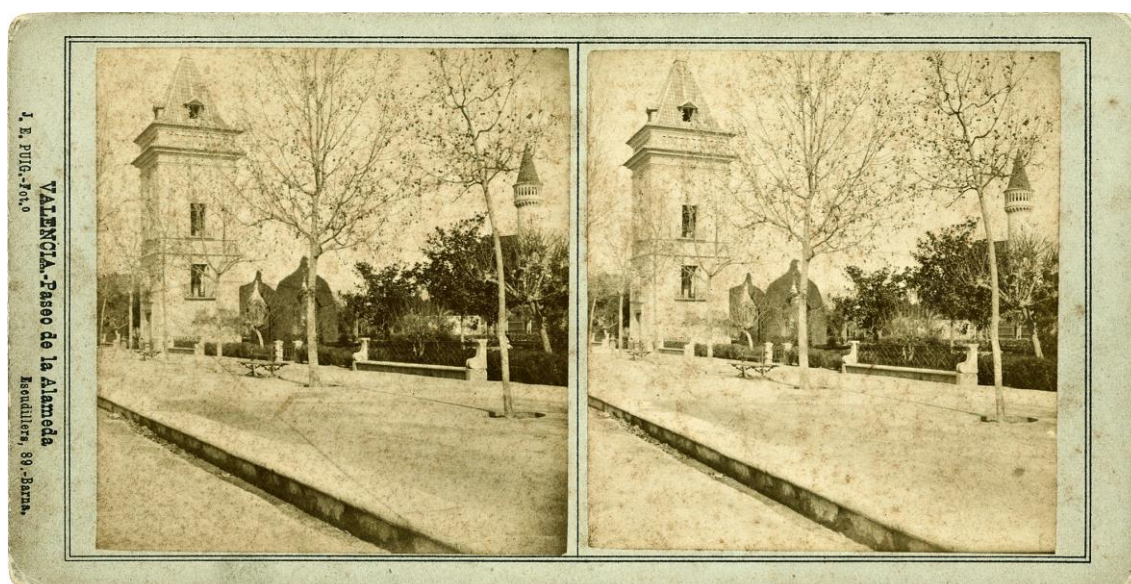


Fig. 16.38. J. E. Puig, ca. 1890 Paseo de la Alameda. 9x17.9 cm Colección Javier Sánchez Portas

16.12. Resumen de resultados

La tabla siguiente resume los datos recabados en la investigación. La incertidumbre con uno de los editores, no permite ofrecer un número exacto, pero sí muy representativo.

Editor	Fotógrafo	Año	Nº
Gaudin et frère	Eugène Sevaistre	1856-1857	11
Ferrier père et fils et Soulier	Desconocido	1863-1864	6
E. Lamy	Ernest Lamy	1863	4
Desconocido	(Fárvaro/Jouliá/Tercero)	Ca.1865	4
J. Andrieu	Jean Jules Andrieu	1867	9
J. Laurent	Jules Ainaud	1870	28
Frank M. Good	Frank Mason Good	Ca.1870	6
Lévy et Cie.	Desconocidos	1888	67
J.E. Puig	José Esplugas Puig	Ca.1890	(2)

Total (137)

Fig. 16.39. Vistas estereoscópicas comerciales de Valencia del s. XIX

16.13. Selección de vistas recuperadas

He podido acceder a 80 de las fotografías censadas, en las colecciones privadas y los archivos públicos visitados. Algunas de ellas han sido publicadas, pero la mayoría permanecen inéditas en los libros y han sido digitalizadas a partir de la cartulina original. También se ha recopilado mucho más material perteneciente a principios del siglo XX, pensando en su futura difusión mediante la apertura de nuevas líneas de investigación. En total se han digitalizado 170 tarjetas estereoscópicas originales, de las que se mostrará sólo una selección de las vistas más interesantes desde el punto de vista arquitectónico y urbanístico, pertenecientes a los editores y periodo estudiado.

Un aspecto que echo en falta en algunos libros, en los que se han publicado vistas estereoscópicas, es la ausencia de un medio de visualización que permita disfrutar estereoscópicamente de ellas. Por ello se presentará una versión en anaglifo para ver con las gafas rojo/cian y también se mostrará el par completo original, con un tamaño adecuado para visualizar mediante visión libre paralela o con un visor tipo Loreo Lite3Dviewer. Se añade además un plano de situación de la época comparado con la vista satélite y un vínculo a Google Street View para poder contemplar el estado actual.

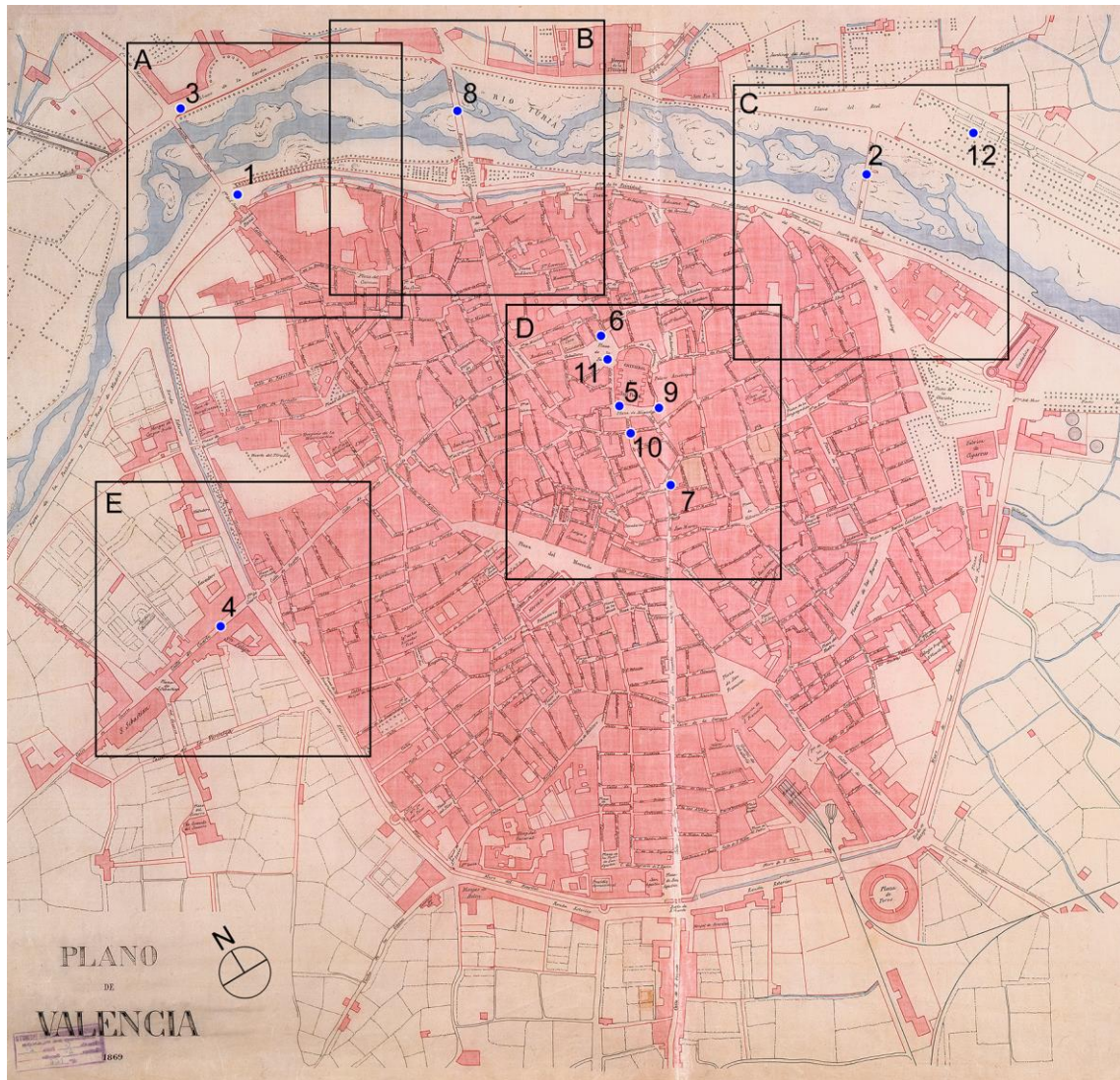
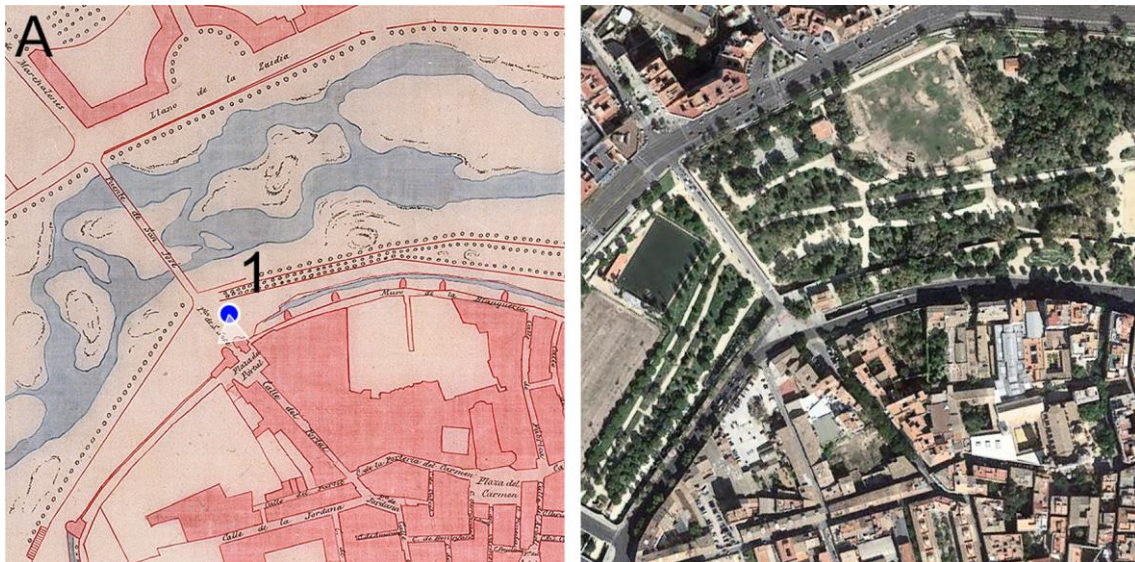


Fig. 16.40. Plano de Valencia de 1869 con la localización de las fotografías mostradas

1. Alexis Gaudin, 1856-1857. 294 *Porte Saint-Jose*
2. Alexis Gaudin, 1856-1857. 297 *La Porte Royale*
3. Ferrier et Soulier, 1863-1864. 7068 *Pont e porte Saint-Joseph*
4. Ernest Lamy, 1863. 103 *Porte de Cuarte*
5. Jean Jules Andrieu, 1867. 2615 *Vue générale prise de la tour de la Cathédrale*
6. Jean Laurent, 1870. 902 *Vue générale de la Cathédrale*
7. Jean Laurent, 1870. 897 *Eglise de Sainte Catherine*
8. Lévy et Cie. 1888. 2518 (14377) *Valence. Porte de Serranos*
9. Lévy et Cie. 1888. 2565 (14415) *Valence. La tour de la Cathédrale.*
10. Lévy et Cie. 1888. 2566 (14416) *Valence. La Cathédrale. Porte du Palau (Hierros)*
11. Frank Mason Good, ca.1870. 267 *Valencia. Apostles' Door*
12. José Esplugas Puig, ca 1890. *Valencia. Paseo de la Alameda*

El Portal de San José o *Portal Nou*, fue derribado en 1868, junto con las murallas cristianas, que tal como se ha comentado, se había iniciado su demolición en 1865. Esta puerta de la muralla estaba situada en la actual plaza del Portal Nou, emplazamiento de la Falla de Na Jordana.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



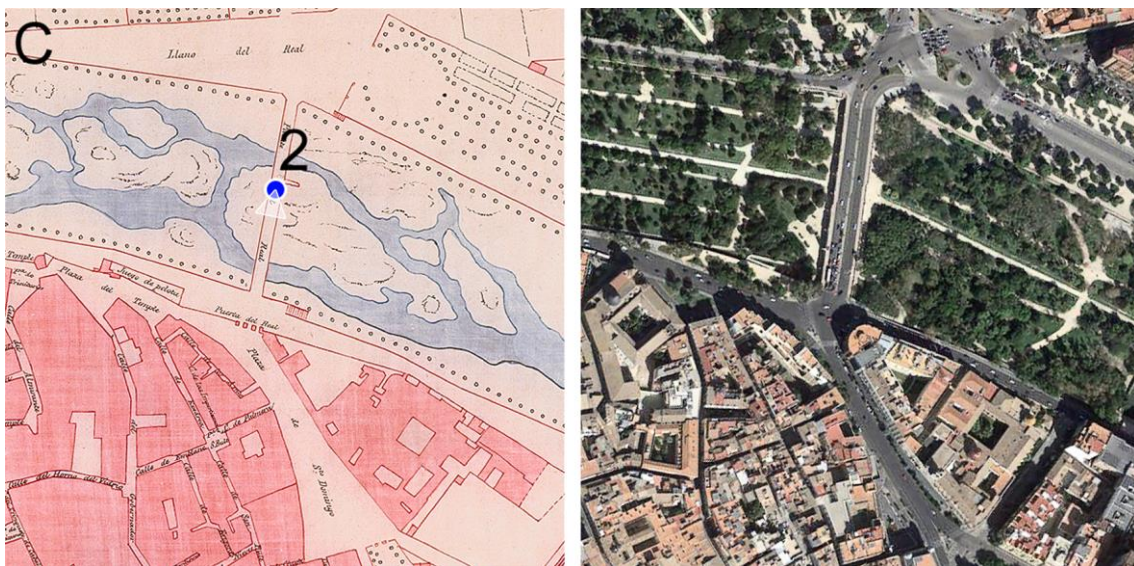
Fig. 16.41. Alexis Gaudin, 1856-1857. N° 294 *Porte Saint-Jose*.
 Albumina sobre cartulina 9x18.5 cm
 Colección Díaz Prósper



Fig. 16.42. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



La Puerta del Real fue construida en 1801 por el arquitecto murciano Juan Bautista Lacorte, para sustituir a la anterior, de menores dimensiones. Sobre el vano central había una inscripción en la que podía leerse: Reinando Carlos IV y María Luisa de Borbón. Año 1801. En este punto fue donde se inició el derribo de la muralla y las puertas sucumbieron con ellas. Tras la riada de 1957, el puente fue reconstruido y ampliado en anchura por el ingeniero Alberto Oñate, entre 1966 y 1968, manteniendo el aspecto de los frentes laterales y los casalicios. En esta remodelación se eliminó la escalera que bajaba al río, que puede verse en el plano de situación de 1968.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



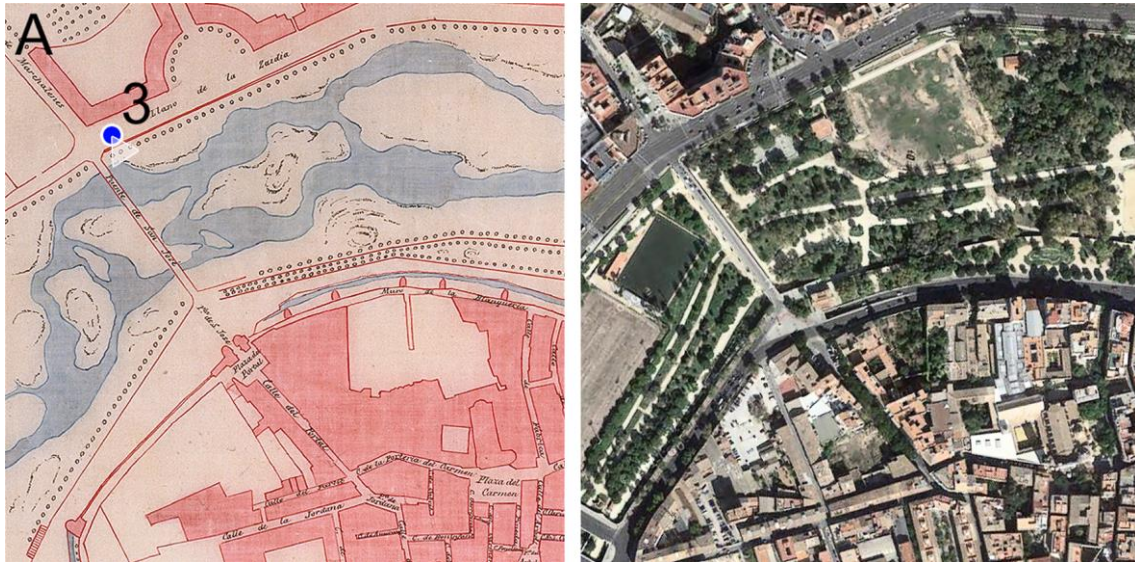
Fig. 16.43 Alexis Gaudin, 1856-1857. Nº 297 *La Porte Royale*
Albumina sobre cartulina 9x18.5 cm
Colección Fernández Rivero



Fig. 16.44. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Una toma más general del Portal y Puente de San José. El puente sufrió una modificación en 1906 para aumentar su anchura, pero la estructura portante se mantiene. Pueden llegar a apreciarse algunas personas en el río. Por aquél entonces las mujeres lavaban la ropa allí.



[Ver estado actual en Google Street View](#)

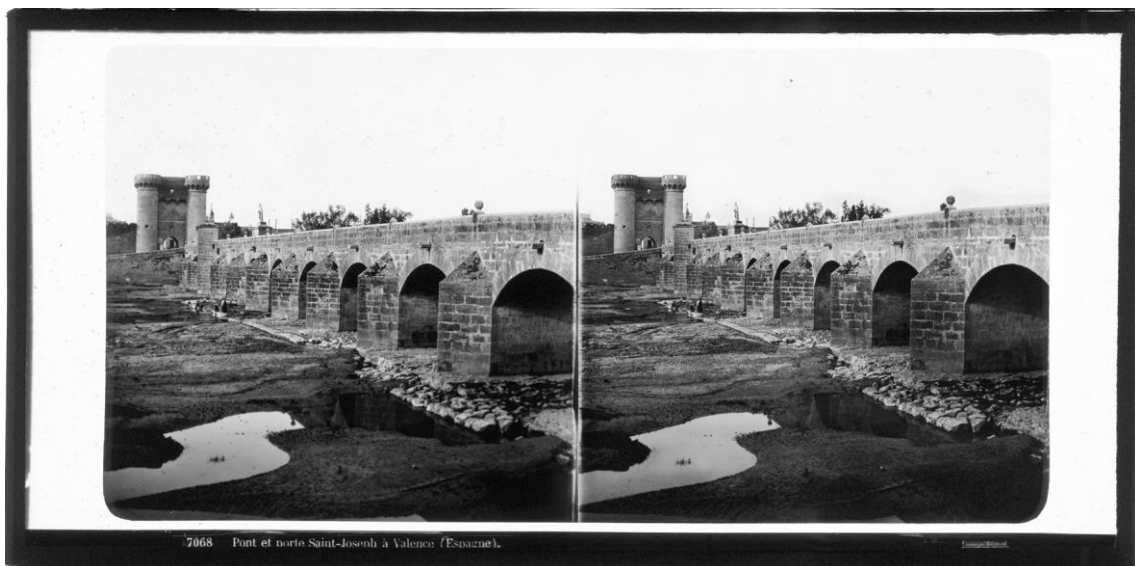


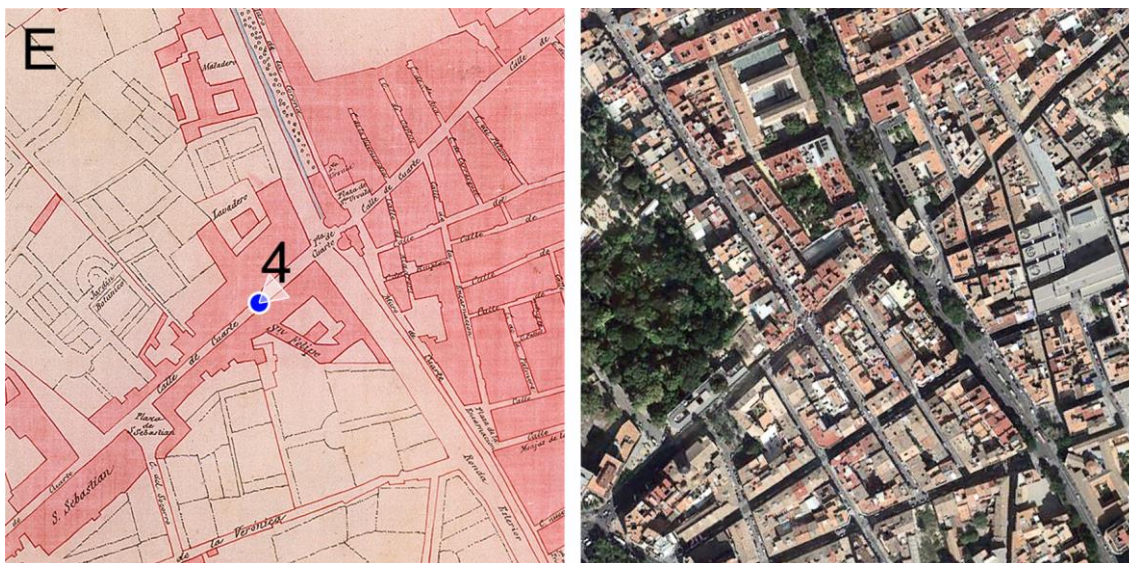
Fig. 16.45. Ferrier & Soulier, 1853-1864. Nº 7068 *Pont et porte Saint-Joseph*
 Placa positiva de vidrio 8.5x17 cm
 Colección Carlos Sánchez Gómez



Fig. 16.46. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Las Torres de Quart, (Quart o Cuarte) se conocían también antiguamente como Portal de la Cal, porque, desde 1650, la cal que entraba a la ciudad debía de pasar por ella. Era el acceso de entrada y salida hacia el interior de la península a través del camino Real de Madrid. Posiblemente las torres se salvaron de la demolición porque en aquella fecha eran una prisión militar. La torre mantiene los impactos de la artillería francesa que, bajo el mando del Mariscal Moncey, bombardeó la ciudad en 1808 durante la guerra de independencia. Las torres tienen 34 metros de altura, un metro más que las Torres de Serranos.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



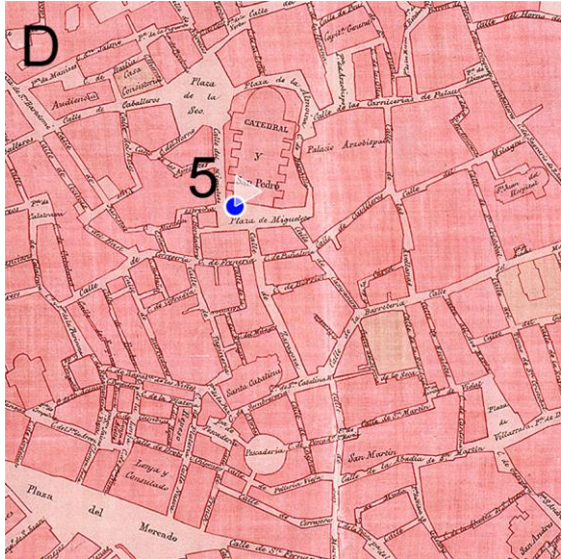
Fig. 16.47 Ernest Lamy, 1863. Nº103 Porte de Cuarte
 Albúmina sobre cartulina 8.7x17.1 cm
 Colección Fernández Rivero



Fig. 16.48. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Las vistas de la ciudad desde el Miguelete son uno de los temas más recurrentes de los editores franceses. Esta vista mira hacia en este, a la derecha puede verse la torre de San Genaro, la iglesia más próxima a la catedral.



[Ver estado actual en Google Street View](#)

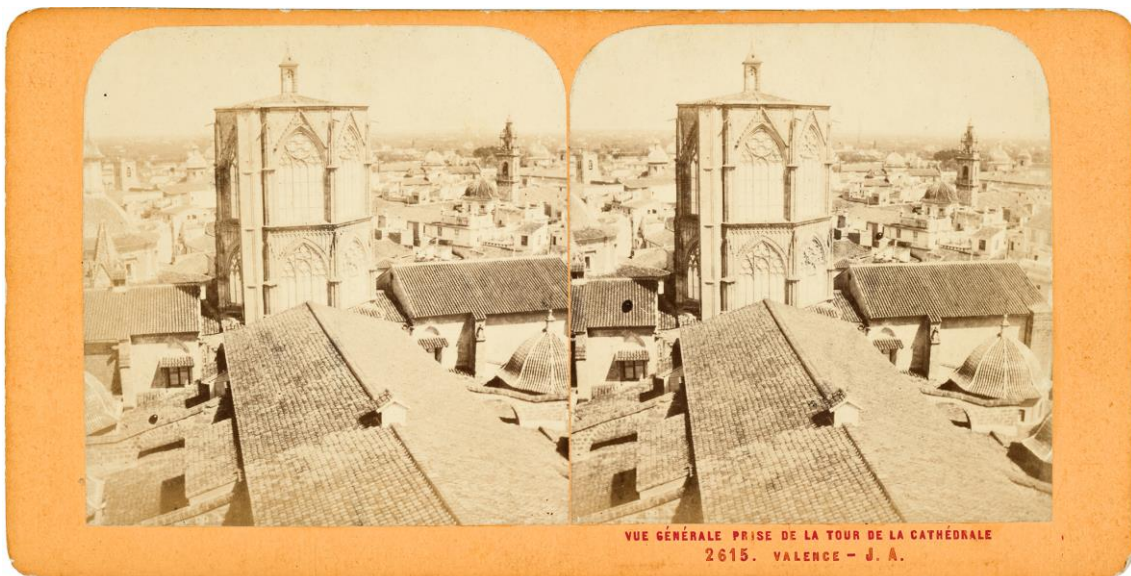


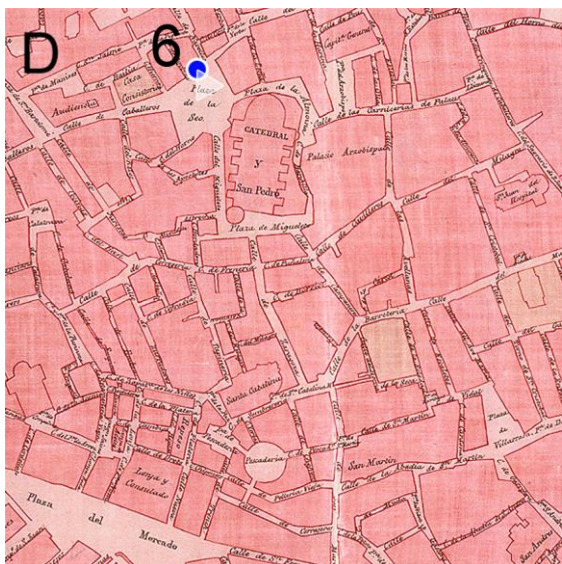
Fig. 16.49 Jean Jules Andrieu, 1867. N° 2615 *Vue générale prise de la tour de la Cathédrale*
 Álbumina sobre cartulina 8.8x17.5 cm
 Colección José Huguet



Fig. 16.50. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Uno de los cambios más significativos en la Catedral fue la demolición de las Casas de los Canónigos o *Cases dels Canonges*, en 1970, para recuperar la imagen original de la nave. Estas casas se habían adosado al lateral de la Catedral, entre la Puerta de los Apóstoles y la Torre del Miguelete. También se había adosado un reloj a la torre, a la altura de los aleros de las casas, que ocupaba un considerable espacio prismático.



[Ver estado actual en Google Street View](#)

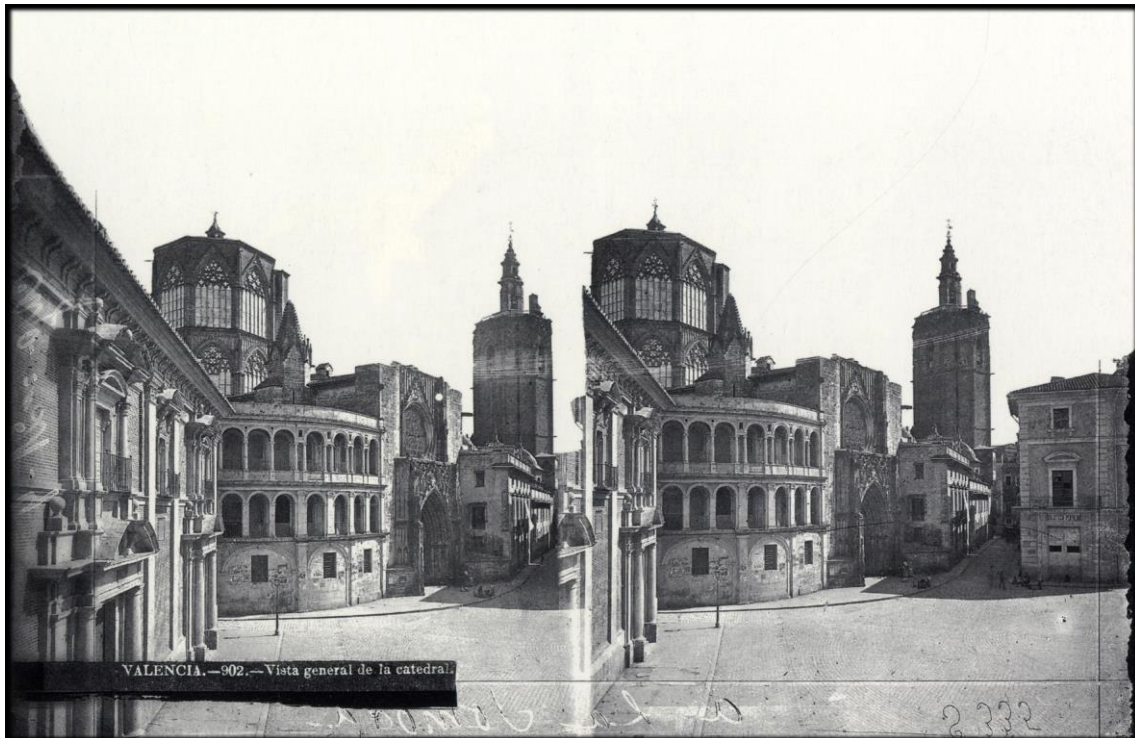


Fig. 16.51 Jean Laurent, 1870. 902 *Vista general de la Catedral*
 Positivo de una placa de vidrio al colodión húmedo. 13x18 cm
 Instituto del Patrimonio Cultural de España (Huguet, 2003)

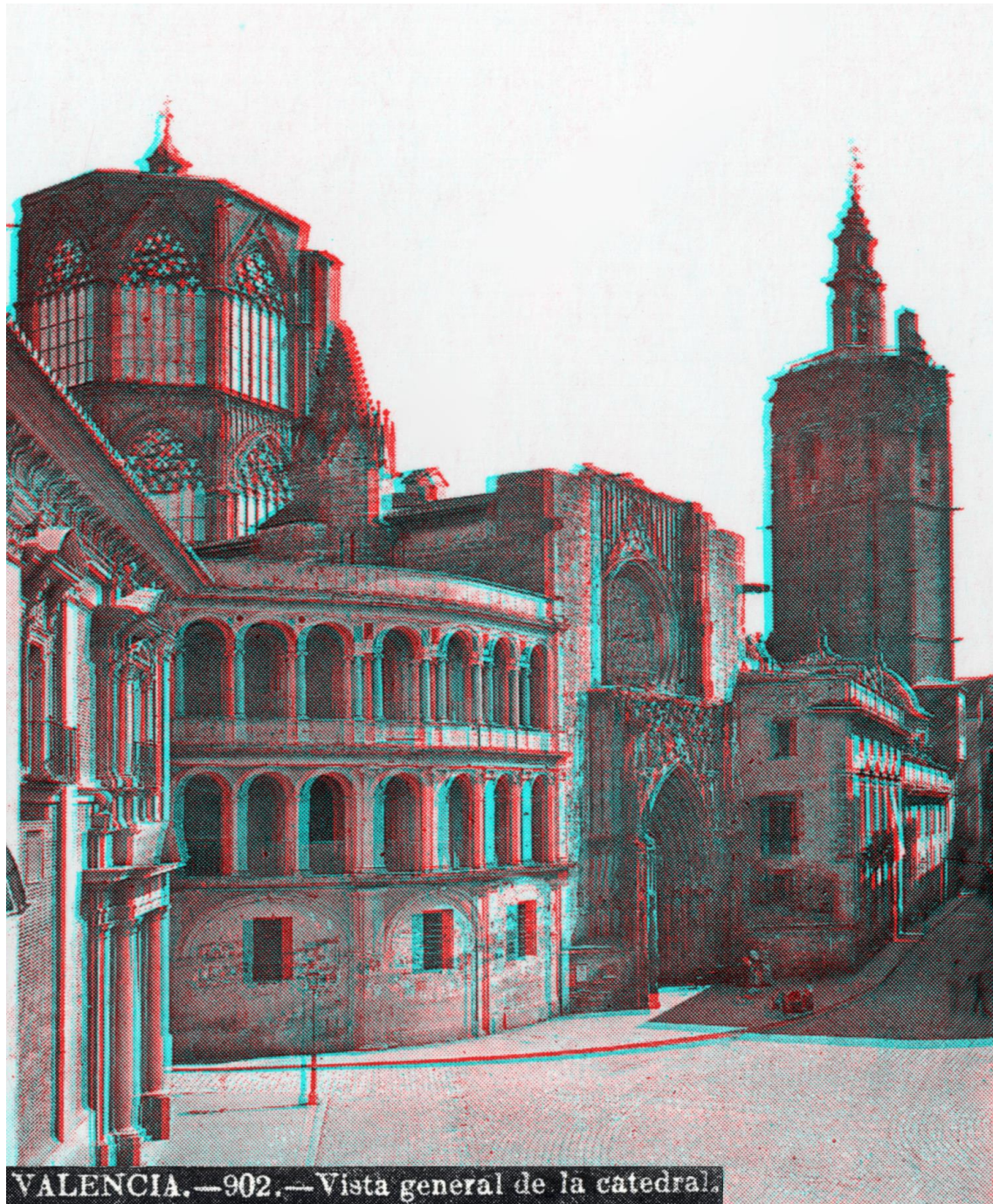


Fig. 16.52. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Aquí podemos ver una vista de la Plaza de Santa Catalina, cuando todavía no existía la Plaza de la Reina. La fotografía está tomada desde una vivienda situada en la manzana triangular que sería derruida en 1878 para dar origen a la plaza. También se demolería el Convento de Santa Tecla, anexo a esta manzana, para abrir la Calle de la Paz.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



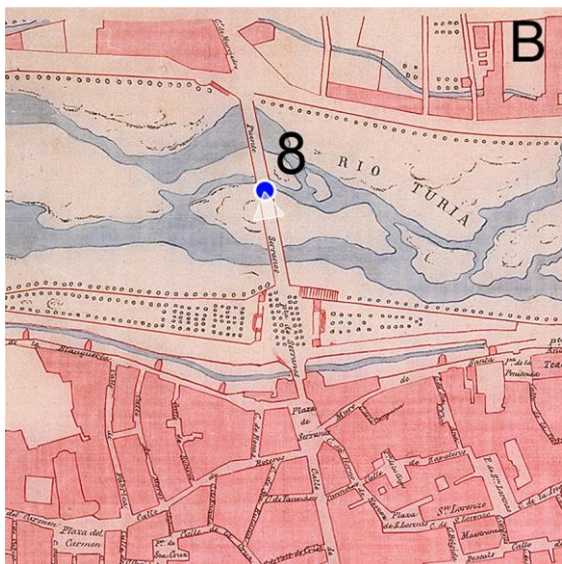
Fig. 16.53 Jean Laurent, 1970. Nº 897 Iglesia de Santa Catalina
 Positivo de una placa de vidrio al colodión húmedo. 13x18 cm
 Instituto del Patrimonio Cultural de España (Huguet, 2003)



Fig. 16.54 Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Las Torres de Serranos constituyen uno de los emblemas de la ciudad, declarado monumento histórico artístico Nacional desde 1931. En el momento de la demolición de las murallas, funcionaba como cárcel de la ciudad al igual que las Torres de Quart. Pueden verse algunos huecos con barrotes, practicados en su fachada delantera, para ventilar algunas celdas. Esto fue subsanado con la restauración llevada a cabo a finales del siglo XIX, en la que reconstruyeron también las almenas.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



Fig. 16.55. Lévy et Cie. 1888. Nº 2518 (14377) Valence. *Porte de Serranos*
 Positivo de una placa de vidrio al Gelatino-Bromuro coloreado a mano. 10x21 cm
 Archivo Roger-Viollet. París (Huguét, 1999)



Fig. 16.56. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



En esta imagen puede verse la desaparecida Plaza del Miguelete que quedaba delimitada por algunas de las manzanas de casas que serían derruidas en la década de 1960 para ampliar la Plaza de la Reina. Puede verse también el tranvía girando hacia la plaza de la Virgen. Los tranvías de la época iban con tracción animal.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



Fig. 16.57. Lévy et Cie. 1888. Nº 2565 (14415) *Valence. La tour de la Cathédrale*
 Positivo de una placa de vidrio al Gelatino-Bromuro. 13x21 cm
 Archivo Roger-Viollet. París (Huguet, 1999)



Fig. 16.58. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Vista desde la desaparecida Calle Zaragoza, cuyo fondo de perspectiva era la Puerta de los Hierros de la Catedral. En el título original de esta vista hay una errata, pues nombra la Puerta del Palau, que es la puerta románica del lado Este de la Catedral. Sin su razón de ser, la puerta de los hierros queda actualmente desubicada en medio de un espacio que no le hace justicia.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



Fig. 16.59 Lévy et Cie, 1888. N° 2566 (14416) Valence. La Cathédrale. Porte du Palau (Hierros)
 Positivo de una placa de vidrio al Gelatino-Bromuro. 10x21 cm
 Archivo Roger-Viollet. París (Huguet, 1999)



Fig. 16.60. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



La puerta gótica de la Catedral sigue conservándose gracias a las restauraciones y limpiezas efectuadas. El rosetón tuvo que ser prácticamente reconstruido en 1960 ya que había sido seriamente afectado por el mal de la piedra. Las 48 figuras originales de esta portada estaban policromadas y han sido sustituidas por copias.



[Ver estado actual en Google Street View](#)



Fig. 16.61 Frank Mason Good, ca.1870. 267 Valencia. Apostles' Door



Fig. 16.62. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



Vista del Paseo de la Alameda y una de las denominadas Torres de los Guardas, construidas en 1714 para albergar a los arrendatarios del paseo. La Alameda era el acceso al desaparecido Palacio Real desde el Grao. Su nombre viene de los álamos que mando Plantar el virrey de Valencia Ponce de León entre 1643 y 1645. Al fondo puede verse la torre del desaparecido Palacio de Ripalda, derribado en 1968.



[Ver estado actual en Google Street View](#)

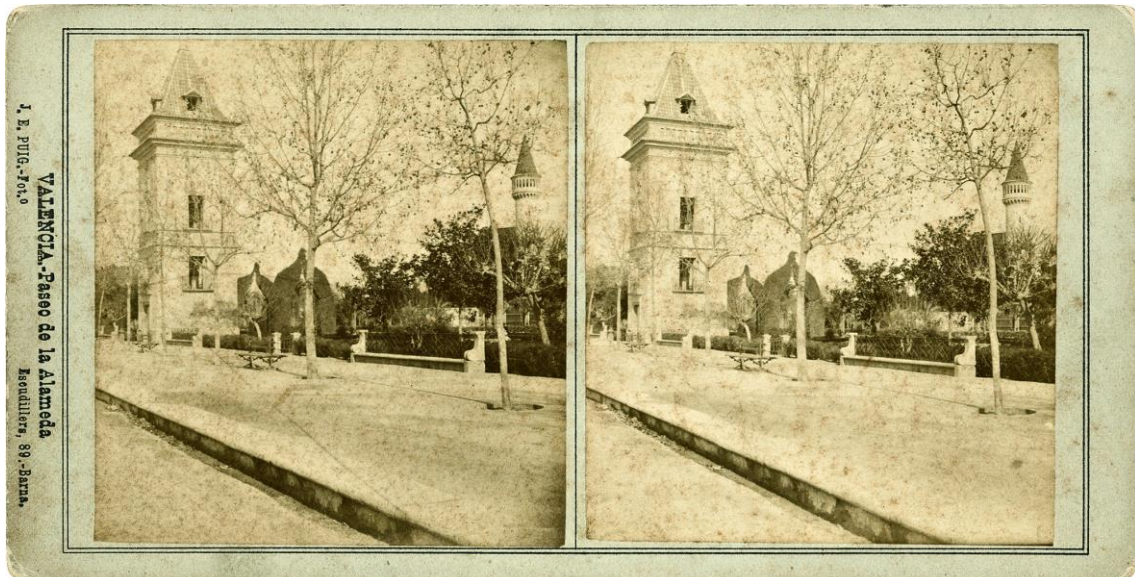


Fig. 16.63 José Esplugas Puig, ca 1890. *Valencia. Paseo de la Alameda*
 Albúmina sobre cartulina 9x17.9 cm
 Colección Javier Sánchez Portas



Fig. 16.64. Versión en anaglifo. Pedro Cabezos



17. LOS PANORAMAS ESFÉRICOS ESTEREOSCÓPICOS

La fotografía panorámica ha sido entendida tradicionalmente como aquella con la que se logra abarcar un gran campo visual. Desde un primer momento, los fotógrafos agudizaron su ingenio para poder ampliar el campo visual que les proporcionaban sus primitivos objetivos, desarrollando varias técnicas e incluso dispositivos y cámaras especiales. Los avances en el campo de la imagen digital nos han permitido ir un poco más allá en el campo de la fotografía panorámica. Con la aparición de software de *stitching* o cosido de imágenes se pueden unir varias fotografías para formar una imagen panorámica de amplio campo visual. Las imágenes producidas mediante el software de *stitching* pueden llegar a abarcar un campo visual de 360° en horizontal y 180° en vertical, formando un panorama esférico. Para visualizar correctamente este tipo de imágenes se necesita un software adecuado que permitirá al espectador sentirse inmerso en el escenario fotografiado.

Sin embargo, nunca antes se había planteado un método de captura y visualización eficaz que permitiera una navegación estereoscópica de este tipo de imágenes panorámicas. Por ello, he analizado en profundidad esta problemática con el fin de aportar un método de captura estereoscópico y las consideraciones necesarias para desarrollar un visor específico con el que poder visualizarlos de forma eficaz.

Empezaré ofreciendo una visión global de los panoramas, sus tipos y las técnicas de *stitching* actuales, lo que permitirá obtener una mejor comprensión de la metodología desarrollada y finalmente mostraré algunos ejemplos de aplicación con los panoramas de los principales monumentos de Roma, llevados a cabo en 2012 durante mi estancia de investigación en la Universidad de La Sapienza.

17.1. Panoramas de toma única

Este tipo de panoramas se obtienen a partir de una sola toma y para ello se han empleado métodos de captura como los que se muestran a continuación.

17.1.1. Panoramas por recorte

Con las cámaras actuales, cuando se tiene la necesidad encuadrar un objeto de gran tamaño, tenemos dos posibilidades: En la primera se trata de ajustar la distancia focal del objetivo al mínimo posible que nos permita abarcar todo el motivo, mientras que en la segunda tenemos que retirarnos del objeto hasta lograr encuadrar por completo el tema.

Los fotógrafos pioneros no tuvieron a su disposición objetivos de distancia focal variable, sino que solían poseer un único objetivo de focal fija, por lo que la opción más evidente era retirarse lo suficiente como para poder abarcar toda la escena y utilizar daguerrotipos de gran tamaño para aprovechar al máximo el cono luminoso proporcionado por el objetivo.

Recordemos que los daguerrotipos eran planchas de cobre plateado sobre las que se formaba la imagen invertida, que constituían un ejemplar único e irreplicable, ya que de él no se podían obtener copias en papel. Aparte de ello, debían ser introducidos en un marco con un vidrio de protección, porque cualquier roce o huella dactilar podía deteriorarlos. Las placas para daguerrotipo solían tener una proporción próxima al formato 4:3. Sus tamaños aproximados eran los siguientes:

- Placa completa: 6.5 x 8.5 pulgadas (16.5x21.5 cm)
- Media placa: 4.25 x 5.5 pulgadas (11x14 cm)
- Un cuarto de placa: 3.25 x 4.25 pulgadas (8x11 cm)
- Un sexto de placa: 2.75 x 3.25 pulgadas (7x8 cm)
- Un noveno de placa: 2 x 2.5 pulgadas (5x6 cm)

El fotógrafo podía colocar en el interior de la cámara cualquiera de estas placas, por lo que, a mayor tamaño de placa, mayor campo visual. Para dar más sensación de amplitud visual, el fotógrafo francés Joseph-Philibert Girault de Prangey (1804-1892) optó por emplear placas más alargadas en el sentido horizontal, cortando la placa convencional (Fig. 17.1). Ello tenía la ventaja añadida de eliminar las grandes cantidades de cielo que se registraban en las placas convencionales, cuando el fotógrafo se retiraba mucho para abarcar más escena en sentido horizontal.



Fig. 17.1 Girault de Prangey, 1842. Panoramas de Roma. Daguerrotipo 24x9.5 cm

Conviene aclarar que con esta técnica no se logra ampliar el ángulo visual, sino que la lejanía del fotógrafo permite que la escena entre dentro del campo visual correspondiente al objetivo estándar y la placa más grande. Sin embargo, el efecto del recorte evoca en nuestra mente una imagen de mayor amplitud visual. Esta técnica puede llevarse a la práctica con cualquier cámara digital. El recorte puede efectuarse con cualquier programa de edición digital, para adoptar una proporción más alargada (Fig. 17.2).



Fig. 17.2. Panorama por recorte. La proporción alargada evoca un mayor campo visual. Pedro Cabezos

17.1.2. Panoramas con objetivos gran angular

Con la invención en 1892, por parte de Kodak, de la película celuloide en rollo, empiezan a utilizarse diversos formatos hasta que se impuso el formato de 35mm (24x36 mm) a raíz de la salida al mercado de la Leica I (1925). Este formato sigue vigente en el ámbito de la fotografía digital en las cámaras con sensores *Full-frame*.

Al fijarse el tamaño del soporte sensible, el campo visual viene determinado por la distancia focal del objetivo, por lo que se hizo conveniente emplear cámaras de objetivos intercambiables como la Leica I Schraubgewinde, de 1930, o como la Contax I, de 1932, que admitía varios objetivos diseñados por la casa Zeiss. También aparecieron en el mercado los objetivos de distancia focal variable, denominados comúnmente como *Zooms*. Estos objetivos se utilizaban ya en 1834 en los telescopios, pero el primer objetivo varifocal para el formato de 35mm fue el Voigtländer Zoomar 36-82 mm/2.8, comercializado en 1959.

Los objetivos de 28 mm de distancia focal, son considerados como el gran angular típico para las cámaras de 35 mm o *full-frame* y proporcionan un ángulo de visión horizontal de unos 65°. En la Fig. 17.3 se muestra una comparación entre el campo visual, según la distancia focal empleada.

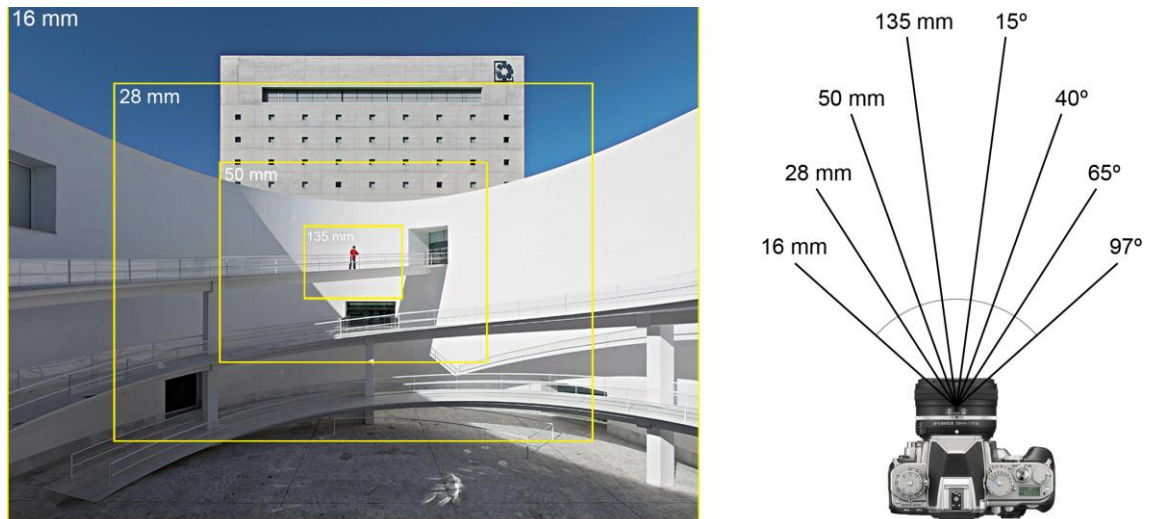


Fig. 17.3. Distancia Focal y Campo Visual. Museo de Caja Granada. Arq. A. Campo Baeza. Pedro Cabezos

Los objetivos de muy corta distancia focal, también denominados Ojos de pez, pueden llegar a abarcar un ángulo visual de hasta casi 180°, a costa de introducir notorias aberraciones ópticas a las que se unen las distorsiones de la perspectiva.

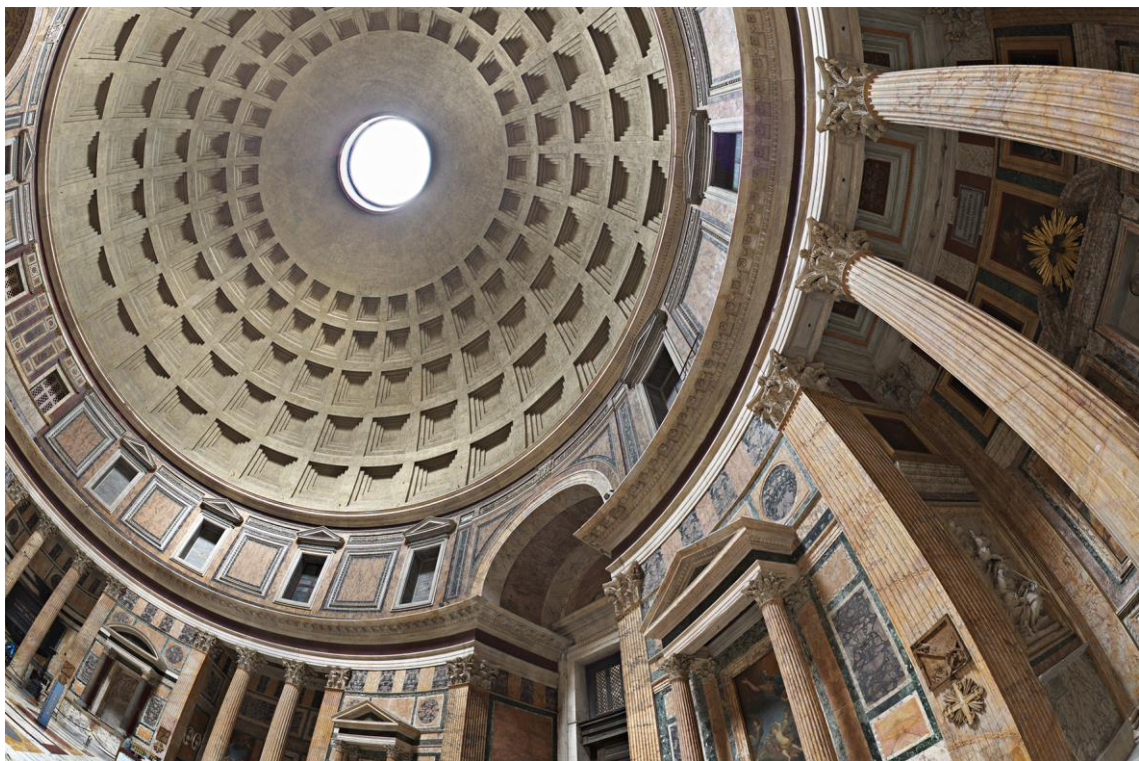


Fig. 17.4. Panteón de Roma. Imagen Panorámica equivalente a un ojo de pez de 6mm. Pedro Cabezos

17.1.3. Panoramas con cámaras especiales

La primera cámara panorámica fue patentada en 1843 por el austriaco Joseph Puchberger y consistía en una cámara oscura con un encastre en la que se disponía un daguerrotipo curvado, que conformaba una superficie cilíndrica. La cámara disponía de una lente pivotante, de 8 pulgadas de distancia focal, que giraba alrededor del eje de la superficie cilíndrica determinada por el daguerrotipo. El fotógrafo, mediante una manivela, debía girar lentamente la lente, a velocidad constante, hasta completar la exposición. La cámara admitía daguerrotipos de hasta 24 pulgadas de largo, unos 61 cm, lo que proporcionaba un ángulo visual de 150°. (Fig. 17.5)

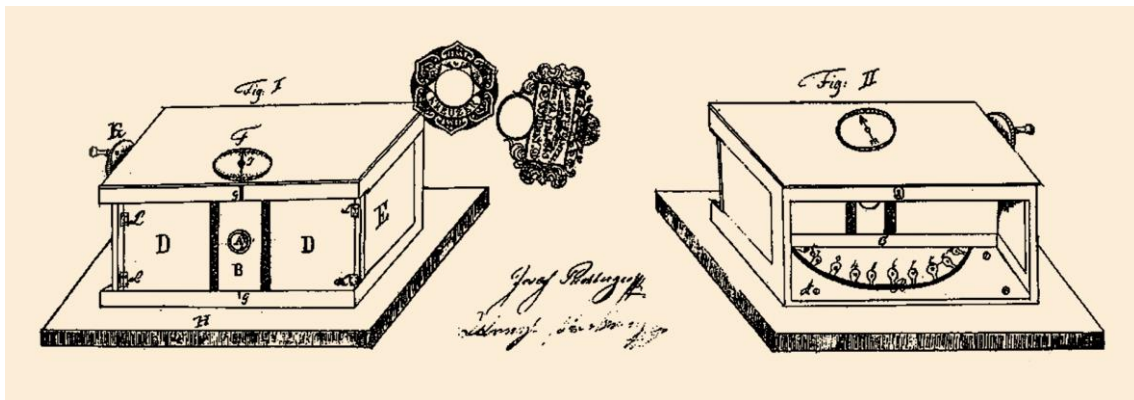


Fig. 17.5. Cámara panorámica de lente rotatoria patentada por Joseph Puchberger, 1843

Un año más tarde, el fotógrafo Frédéric Martens construyó una cámara similar, la Mégascope, con la que obtuvo excelentes daguerrotipos panorámicos (Fig. 17.6).

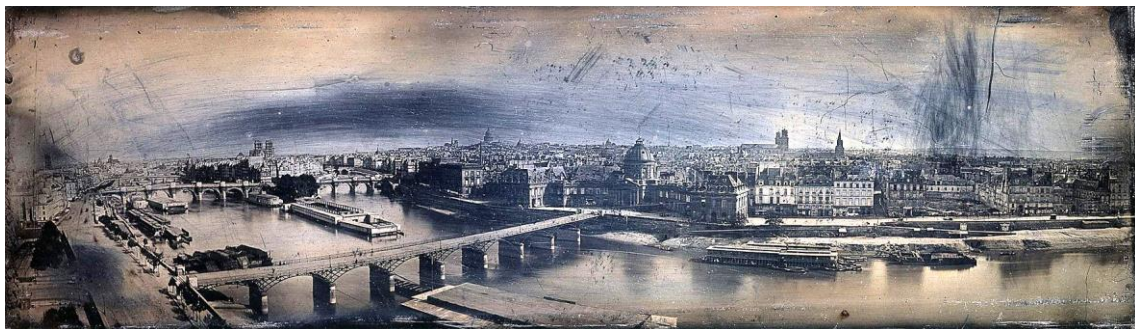


Fig. 17.6 Frédéric Martens, 1846. Panorama de París. Daguerrotipo 10.9x37,9 cm

Para observar el daguerrotipo obtenido sin distorsiones, el espectador hubiera tenido que colocarse en el eje de la superficie cilíndrica definida por el daguerrotipo, sobre el mismo punto en que pivotaba la lente que lo produjo. Sin embargo, al desarrollar el daguerrotipo, para disponerlo sobre un plano, se producen distorsiones en el sentido horizontal y las aristas no verticales de la escena aparecen curvadas. Este tipo de panoramas se denominan panoramas cilíndricos parciales y, aunque su imagen este desarrollada sobre un plano, los visores informáticos actuales nos permiten verlos sin distorsiones y sentirnos inmersos en ellos, tal como veremos más adelante.

Posteriormente se desarrollaron multitud de cámaras de funcionamiento similar, adaptadas a placas de vidrio curvadas al colodión húmedo, que más tarde también se adaptarían a la película en celuloide, como la *Cylindrograph* patentada por Paul Moessard en 1890 (Fig. 17.7 izda.), a la que hacía alusión Santiago Ramón y Cajal, en uno de sus artículos, visto en el capítulo de las aplicaciones científicas.

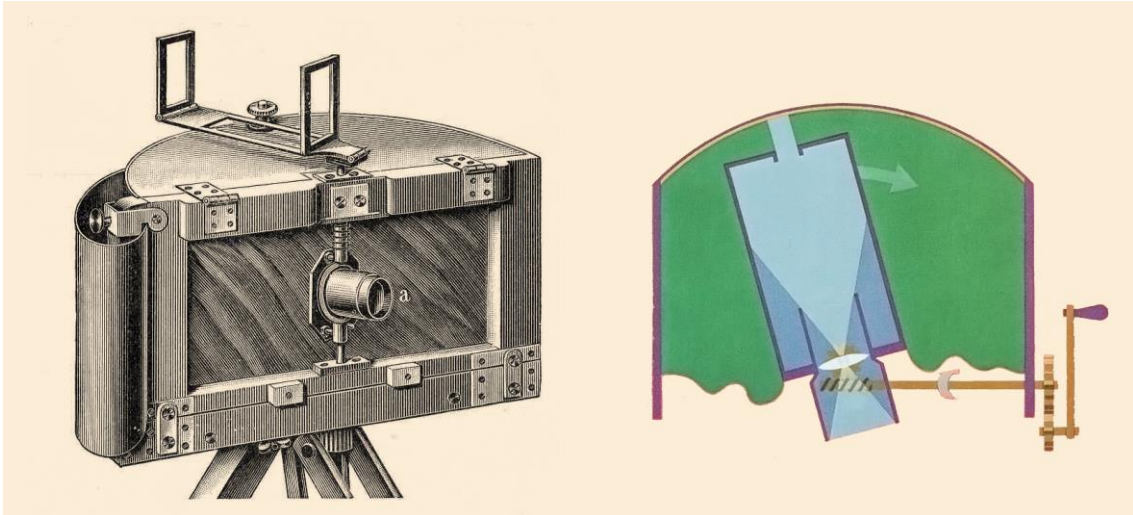


Fig. 17.7. Cámara *Cylindrograph* de 1890 (Izda.). Funcionamiento de una cámara de lente rotativa (dcha.)

También se fabricaron cámaras de lente rotativa para el formato de 35 mm, como la nipona *Widelux*, de 1948, y la soviética *Horizont*, fabricada por Zenit desde 1967, todavía comercializada con la denominación *Horizon* (Fig. 17.8).



Fig. 17.8. Cámaras panorámicas de lente pivotante en formato 35mm

La aparición del negativo flexible permitió también el desarrollo de cámaras panorámicas de rotación total, capaces de capturar un panorama cilíndrico completo, es decir, abarcando un campo de visión horizontal de 360°.

La primera cámara de rotación completa es la patentada por el australiano John Connon en 1888, en la que la cámara al completo gira horizontalmente alrededor del centro de perspectiva de la lente o punto nodal, mientras que la película flexible avanza en su interior a través de unos rodillos, de manera sincronizada y a la misma velocidad con la que gira la cámara.

Aunque el diseño inicial llevaba un mecanismo de avance manual, también hubo modelos con avance automático mediante un mecanismo de relojería.

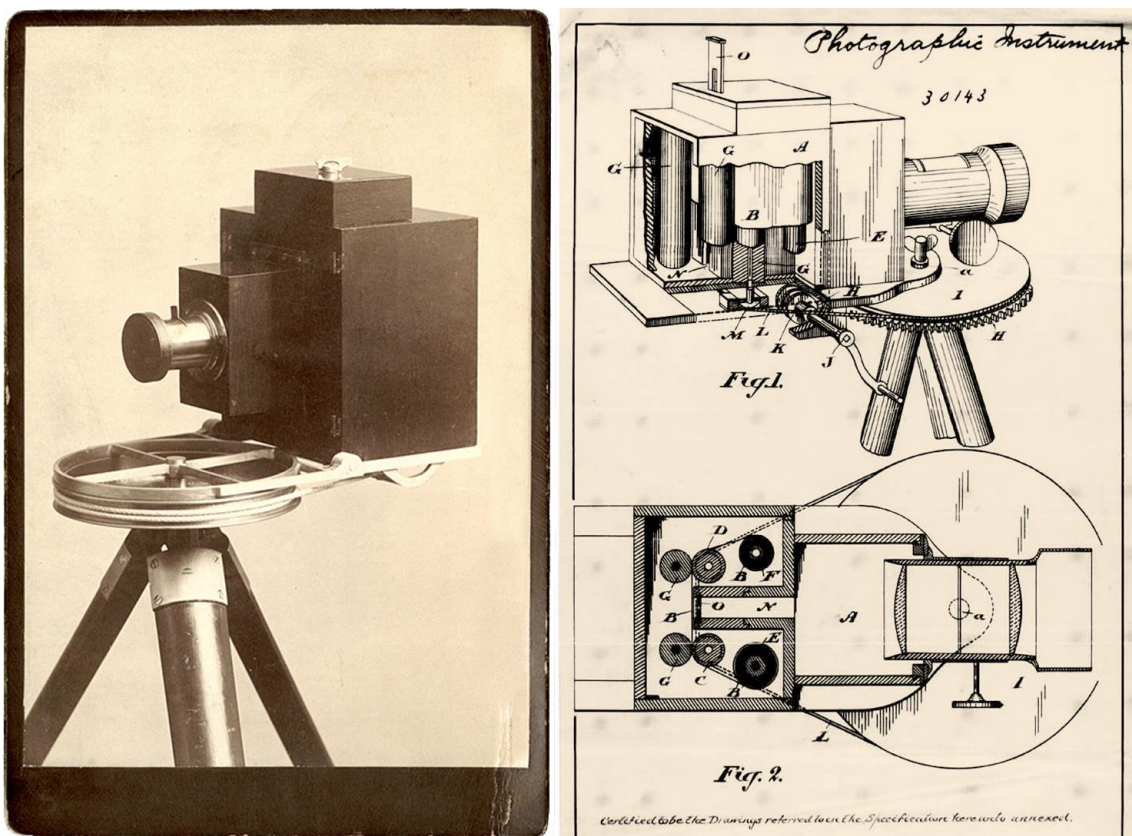


Fig. 17.9. Cámara panorámica de rotación completa de John Connon, 1888.

También aparecieron otras cámaras de este tipo como la Cirkut, comercializada por Kodak, la Globuscope o la Hulcherama. En el formato de 35mm cabe destacar el prototipo desarrollado por el ingeniero portugués Edgar Cardoso en 1973. Esta cámara incorporaba un mecanismo de rotación automático que utilizaba el motor del limpiaparabrisas de un Volkswagen escarabajo.

La Fig. 17.10 muestra al propio Edgar Cardoso con su prototipo y un panorama obtenido en el Palacio de *Belém*, en donde aparece junto al Presidente de la República de Portugal Américo Tomás.

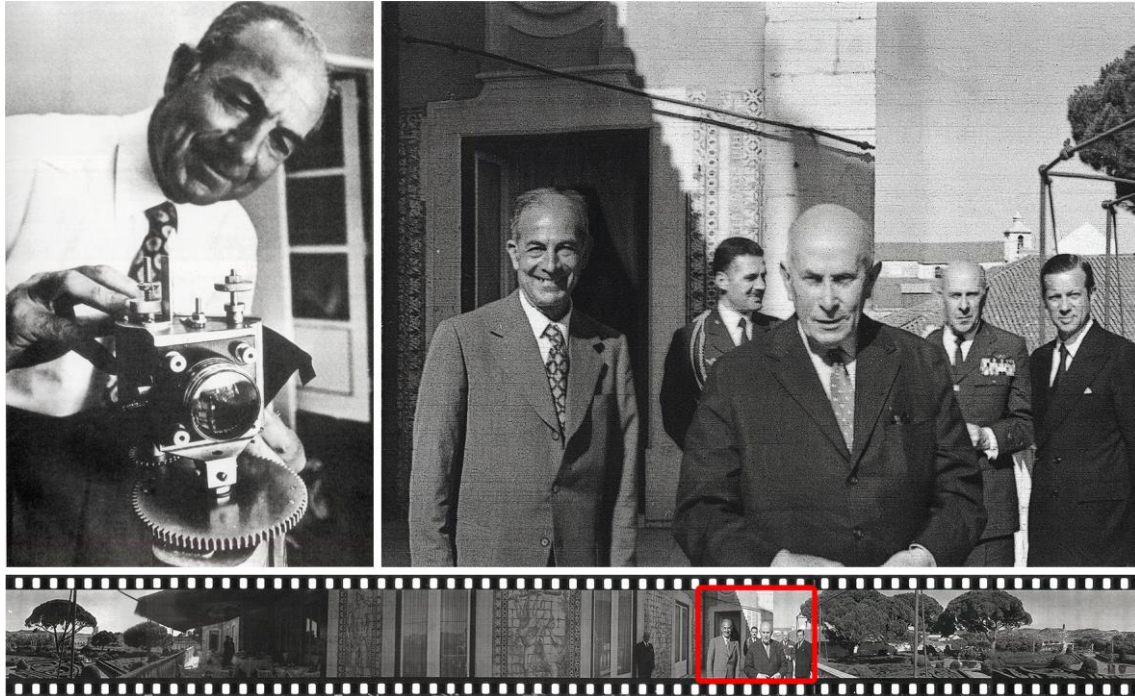


Fig. 17.10. Edgar Cardoso y su cámara panorámica de rotación completa de 35mm (izda.). Panorama cilíndrico obtenido en el Palacio de Belém durante la visita al Presidente Américo Tomás en 1973

Actualmente se comercializan algunas cámaras digitales de rotación completa como la Panoscan o la Seitz Roundshot, que logran capturar panoramas cilíndricos de altísima resolución en apenas dos segundos.



Fig. 17.11. Cámaras digitales panorámicas de rotación completa. Panoscan (izda.) y Roundshot (dcha.)

17.1.4. Panoramas catóptricos

Una forma bastante sofisticada de obtener panoramas con una sola toma es mediante un accesorio compuesto por una superficie especular, en la que se refleja la escena, como podría ser un paraboloide o una esfera cromada, que se instala sobre el objetivo de la cámara. El proceso consiste en tomar la imagen reflejada en la superficie especular y, posteriormente, mediante la utilización de un software específico que utiliza algoritmos de reproyección o remapeo, se logra transformar la imagen obtenida en una panorámica cilíndrica completa (Fig. 17.12).



Fig. 17.12. Paraboloides reflectantes para la captura de panoramas cilíndricos completos. Imagen original, reflejada por el paraboloides, y panorama cilíndrico completo resultante tras el proceso de remapeo digital

La desventaja de este sistema de captura es que la definición del panorama está limitada por la resolución de la cámara. Las grandes interpolaciones necesarias en el proceso de remapeo producen una pérdida de nitidez considerable, pero con la ventaja de que los objetos en movimiento no suponen ningún problema. Estos accesorios pueden obtenerse por un precio bastante asequible y son compatibles con la mayoría de las cámaras.

Este sistema se está empleando también para obtener video panorámico, de hecho, incluso ya hay accesorios de este tipo para teléfonos móviles, como GoPano para iPhone, que permite obtener tanto panoramas como video panorámico.

17.2. Panoramas de varias tomas

La idea de unir varias fotografías para aumentar el campo visual, también es tan antigua como la propia fotografía, pero la aparición de software de *stitching* o cosido de imagen ha revolucionado el campo de la fotografía panorámica, proporcionándonos un mundo de posibilidades.

17.2.1. Panografías

Una panografía es la unión de dos o más fotografías, tomadas desde un mismo punto de vista, rotando la cámara de forma que las tomas se solapen ligeramente entre ellas. Al disponer las fotografías sobre un plano, éstas aparentemente forman un panorama continuo, pero, en realidad, el panorama configurado de esta manera dista bastante de ser perfecto, pues no hay continuidad en la perspectiva, sino que cuando las fotografías se abaten sobre un plano, éstas sólo tienen en común los puntos que estén sobre la charnela o eje de giro del abatimiento y resulta imposible mantener la continuidad de la perspectiva, produciéndose un quiebro en las aristas que atraviesan la unión entre dos fotografías.

Henry Fox Talbot fue el primero en realizar panografías, pues con las copias en papel obtenidas a partir del Calotipo o Talbotipo, se podía realizar fácilmente este tipo de imágenes, cosa que con el daguerrotipo resultaba imposible. La Fig. 17.13 muestra una panografía del taller de Talbot en la localidad de Reading. Aparece él mismo, en el centro, manipulando una cámara junto a sus ayudantes. También puede verse el proceso de obtención de las copias, mediante la exposición solar de los chasis que mantienen en contacto el negativo y la copia.



Fig. 17.13 Panografía a partir de dos tomas realizadas por Henry Fox Talbot, 1844

Esta técnica se hizo extensiva cuando el colodión húmedo sustituyó al daguerrotipo y multitud de fotógrafos tomaron panoramas de sus ciudades, como las excepcionales vistas de Pascual Pérez y de Fárvaro Hnos. en el caso de Valencia (Fig. 17.14).

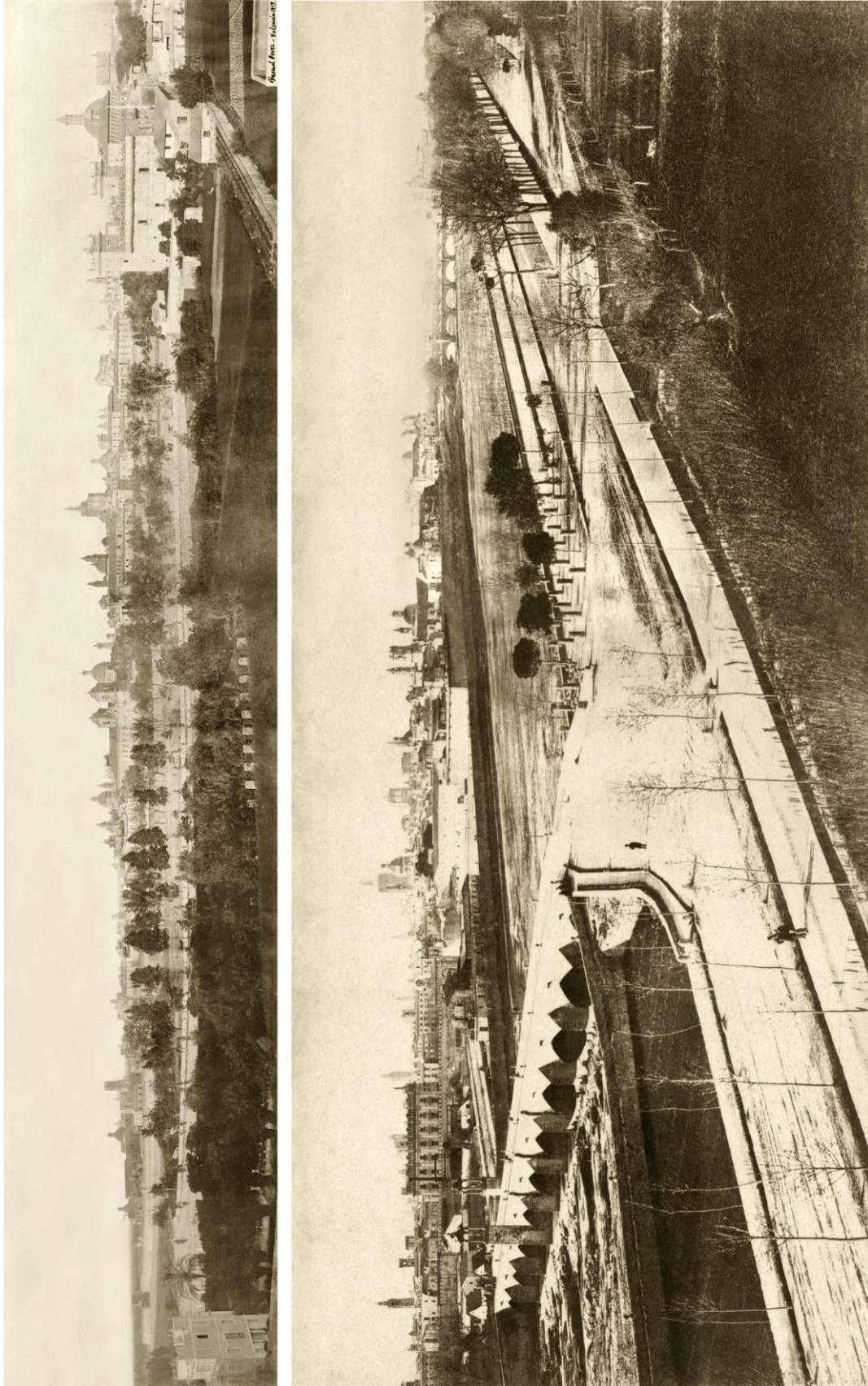


Fig. 17.14. Pascual Pérez, 1859 (dcha.) y Hermanos Fàrvaro ca. 1865 (izda.). Panografías de Valencia
 Colección Díaz Prósper

La sublime panografía de Pascual Pérez está realizada a partir de 4 fotografías, mientras que la atribuida a los Hermanos Fàrvaro, está realizada a partir de 2 tomas; una de ellas será recordada por el lector, pues fue mostrada en el capítulo anterior en formato CDV, al ser comparada con una de las vistas estereoscópicas encontradas. Ambas vistas resultan de sumo interés pues ofrecen una vista de la ciudad todavía amurallada.

Al tratarse de tomas bastante lejanas, la unión entre las fotografías se disimula bastante, pues el ángulo que forma el eje óptico de dos fotografías adyacentes es pequeño. A medida que este ángulo aumenta, se hace más evidente la discontinuidad de la perspectiva. También se puede agravar la situación si las fotografías no tienen un punto de vista común, pues se producirán errores de paralaje adicionales. Otros efectos que pueden causar problemas en la unión son las aberraciones introducidas por la lente, como las distorsiones radiales y las diferencias de exposición entre tomas. Sin embargo, las imperfecciones de las panografías no siempre resultan molestas, sino que muchos artistas, como David Hockney, las han utilizado como un recurso creativo con tintes cubistas. También el arquitecto Enric Miralles las empleó, con gran maestría, como una herramienta de análisis y representación (Fig. 17.15).



Fig. 17.15. Panografía del arquitecto Enric Miralles (izda) y del artista David Hockney (dcha)

17.2.2. Panoramas mediante software de cosido o stitching

Los problemas de unión entre imágenes que aparecen en las panografías, pueden resolverse mediante el software de *stitching* o cosido de imagen, que permite obtener una imagen panorámica, sin uniones visibles, a partir de un conjunto de fotografías tomadas desde un mismo punto de vista y con un cierto solape.

Hay multitud de programas de *stitching* en el mercado, como AutoPano Giga, PtGui o Hugin, éste último de libre distribución. Todos ellos funcionan de un modo muy similar y el proceso de unión consta de tres etapas esenciales: la detección de puntos homólogos entre imágenes, la orientación de las fotografías en el espacio y la reproyección o remapeo de las imágenes sobre una superficie para obtener el panorama definitivo.

En la primera etapa se usan algoritmos que detectan puntos homólogos entre las zonas de solape de las fotografías. Con los puntos obtenidos, otro algoritmo se encarga de orientar las fotografías en el espacio en torno al punto de vista, calculando tres giros en el espacio para cada fotografía: el ángulo horizontal (Yaw), el ángulo vertical (Pitch) y el ángulo alrededor del eje principal (Roll). Cada imagen se orienta espacialmente, según estos tres ángulos, de modo que las fotografías quedan tangentes a una esfera centrada en el punto de vista, cuyo radio es la distancia focal del objetivo³¹. Con esta configuración espacial, si el observador se sitúa en el punto de vista y mira en cualquier dirección, podrá ver una unión perfecta entre imágenes. Ahora se trata de proyectar el panorama, desde el punto de vista, sobre una superficie que puede ser un plano, un cilindro o una esfera.

La proyección sobre un plano produce una perspectiva lineal, por lo que esta opción es ideal cuando se trata de obtener un panorama parcial (Fig. 17.16). Es conveniente que el campo visual no sea excesivamente amplio, pues se producirán importantes distorsiones laterales como en cualquier perspectiva.

También podría obtenerse una proyección sobre un cilindro para obtener un panorama cilíndrico parcial, equivalente al que podríamos obtener con las cámaras panorámicas de objetivo pivotante vistas anteriormente, o bien, un panorama cilíndrico completo, si se parte de un conjunto de imágenes que configuren un anillo cerrado (Fig. 17.17). En este caso, el resultado sería equivalente al obtenido mediante una cámara panorámica de rotación completa, es decir, la imagen que se obtiene es el desarrollo del cilindro sobre el que se han proyectado las imágenes.

³¹ Puede verse el siguiente video explicativo que he realizado para mostrar el proceso de orientación de las imágenes en el espacio y cómo se visualiza correctamente el panorama cuando el observador se sitúa en el punto de vista de las imágenes:

http://youtu.be/4_EZBoUmb28

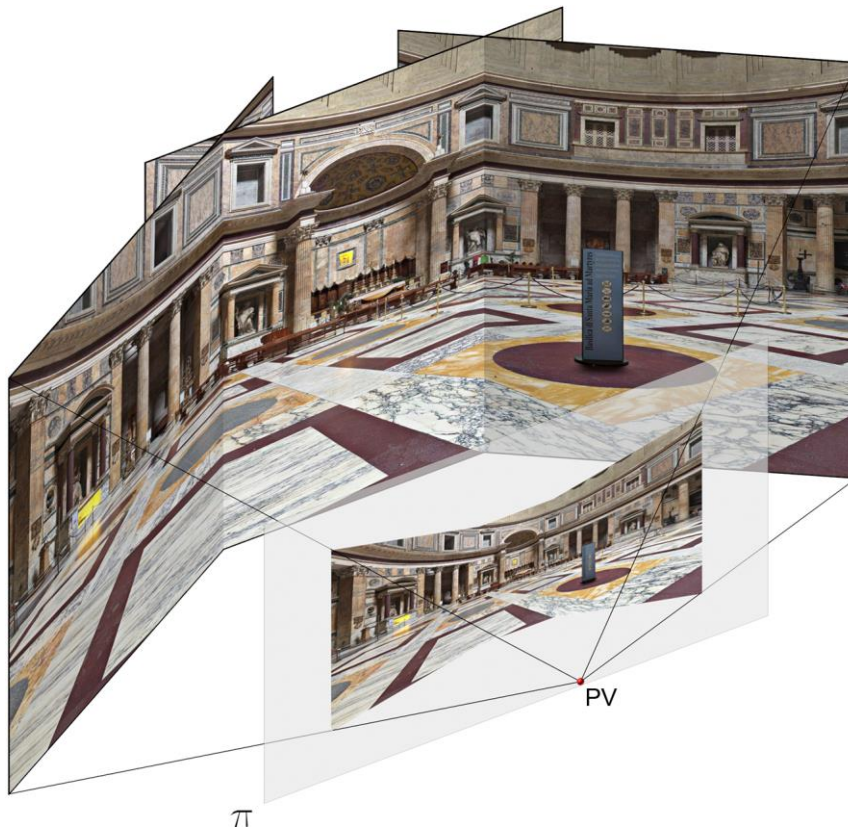


Fig. 17.16 Proyección de las imágenes sobre un plano para obtener un panorama parcial. Pedro Cabezos

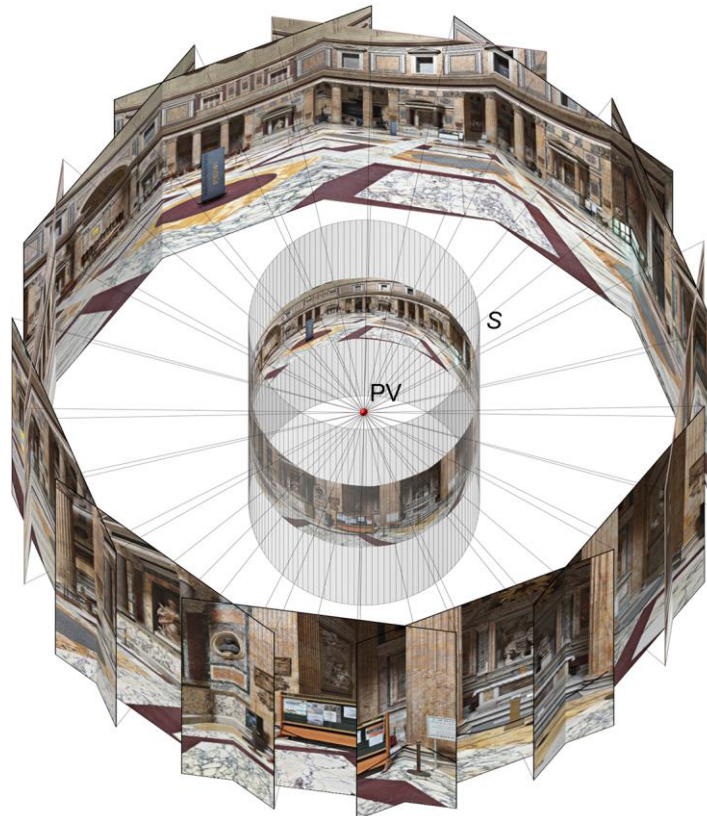


Fig. 17.17. Proyección de las imágenes sobre una superficie cilíndrica. Pedro Cabezos

La opción que nos permite capturar toda la escena completa es la proyección de las fotografías sobre una esfera, pero para ello se deben obtener un mayor número de imágenes para cubrir todo el campo visual (360° en horizontal y 180° en vertical). En la Fig. 17.18 se muestra la proyección de las imágenes sobre una superficie esférica; se han omitido algunas imágenes para poder ver el interior del panorama y la esfera sobre la que se proyectan las imágenes.

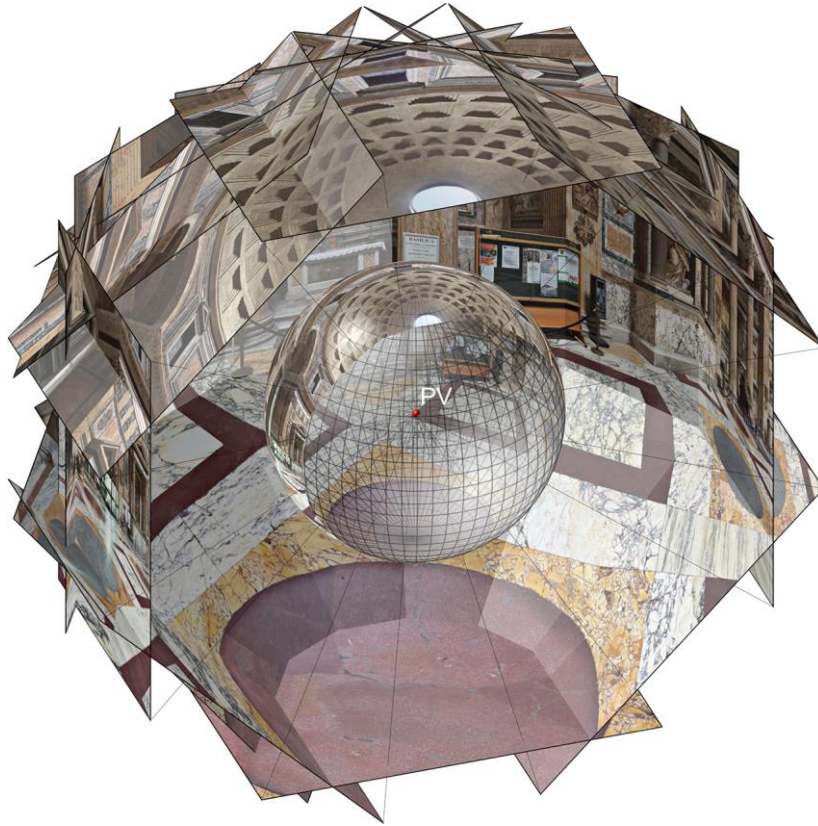


Fig. 17.18. Proyección de las imágenes sobre una superficie esférica. Pedro Cabezos



Fig. 17.19. Proyección equirrectangular del panorama esférico. Pedro Cabezos

El panorama resultante se obtiene mediante una proyección equirectangular³² de la esfera, al igual que en las representaciones cartográficas del globo terrestre (Fig. 17.19).

Para visualizar convenientemente este tipo de panoramas, es necesario emplear cualquier dispositivo digital como un Smartphone, Tablet o PC, en el que debe instalarse un sencillo visor que permitirá contemplar de forma inmersiva e interactiva el panorama. Para aumentar la sensación de inmersión, pueden utilizarse medios de realidad virtual como los visores personales, equipados con *head tracking*, o un entorno más sofisticado como el CAVE.

17.2.3. Requisitos y recomendaciones para la captura de las imágenes

Para que la unión de las imágenes que componen un panorama sea perfecta, se debe emplear cierto equipamiento adicional, como un cabezal panorámico y un trípode. El cabezal panorámico es un accesorio sobre el que se monta la cámara, que va acoplado al trípode. Este elemento consta de un brazo articulado y unas regulaciones, para que la cámara pivote alrededor de un punto fijo, que debería coincidir con el centro de perspectiva de la lente, también llamado Punto Nodal.

Existen multitud de cabezales panorámicos³³ en el mercado, algunos con accionamiento manual, como por ejemplo el cabezal Manfrotto 303 SPH o el Nodal Ninja, mientras que otros tienen un mecanismo de giro motorizado y programable, como por ejemplo Gigapan Epic Pro o Clauss Rodeon Vr (Fig. 17.20).

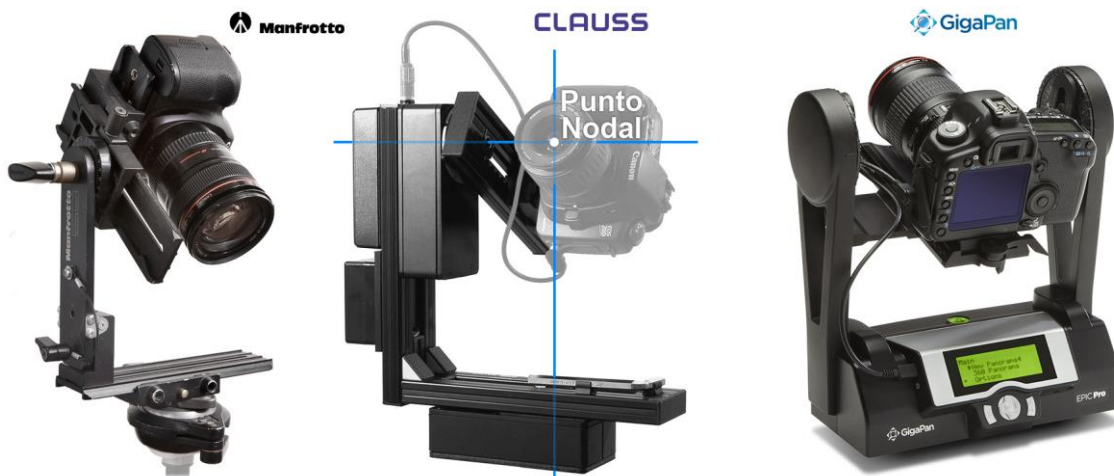


Fig. 17.20. Cabezal panorámico de accionamiento manual Manfrotto 303 SPH (Izda.)
Cabezales panorámicos motorizados Clauss Rodeon VR (ctr.) y GigaPan Epic Pro (dcha.)

³² Puede verse este video explicativo que he realizado para un mejor entendimiento de este tipo de proyección: <http://youtu.be/W7F6Ys-sF6g>

³³ Puede verse este otro video que he realizado para explicar las distintas posiciones de la cámara en la adquisición de un panorama esférico, en donde se ve claramente el giro alrededor del Punto Nodal del objetivo: <http://youtu.be/2zRNLgAMbc0>

Aparte de contar con el equipamiento fotográfico necesario, es conveniente seguir otra serie de pautas de carácter técnico y algunas recomendaciones que se enumeran a continuación.

- **Calibrar la posición del Punto Nodal:** Resulta crucial calibrar correctamente la posición de la cámara con respecto al cabezal, para que esta gire alrededor del Punto Nodal. Los cabezales tienen una serie de regulaciones que permiten situar la cámara en la posición óptima. Para determinar la posición exacta del Punto Nodal conviene seguir las instrucciones ofrecidas por el fabricante del cabezal. La posición es distinta para cada objetivo y, si se trata de un objetivo de distancia focal variable, se ha de tener presente que la posición del punto nodal varía con la distancia focal.
- **Solapar al menos 1/3 las fotografías:** Los algoritmos de detección de puntos homólogos necesitan un área mínima de solape entre fotografías para poder hallar un buen número. Por tanto, conviene establecer los intervalos de giro, de modo que se garantice un solape mínimo entre tomas adyacentes de un tercio del campo visual, tanto en el sentido horizontal, como en el vertical.
- **Bloquear el diafragma:** La profundidad de campo debe ser uniforme en las tomas, por ello es necesario bloquear el diafragma. Un diafragma $f/8$ es una buena opción, pues se obtiene buena profundidad de campo, evitando la pérdida de nitidez por difracción. Para determinar la exposición puede emplearse el programa de prioridad de apertura, dejando que la cámara utilice la medición matricial para determinar la velocidad de obturación adecuada.
- **Bloquear el enfoque:** Lo más sencillo sería enfocar a infinito, pero si se quiere maximizar la profundidad de campo, se puede enfocar a la distancia hiperfocal³⁴, correspondiente a la combinación de diafragma y distancia focal empleada.
- **Bloquear el balance de blancos:** Para evitar las discordancias de tonos entre fotografías es bastante recomendable bloquear el balance de blancos, utilizando un preajuste o realizando una medición sobre una carta de grises. Otra opción para usuarios avanzados sería utilizar el formato RAW (sin procesar), con el que el balance de blancos se establece posteriormente durante el proceso de revelado RAW.
- **Realizar *autobacketing*:** Aunque no es algo estrictamente necesario, sí que es conveniente si se quiere capturar todo el rango dinámico de la escena. El *autobacketing* u horquillado automático nos permite obtener varias capturas de

³⁴ La distancia hiperfocal es la distancia a la cual se maximiza la profundidad de campo para una determinada combinación de distancia focal y diafragma, para un umbral de nitidez establecido mediante el tamaño del círculo de confusión aceptable. Puede calcularse mediante tablas o en línea (<http://www.dofmaster.com/dofjs.html>), también hay aplicaciones para Smartphones

la misma toma, con diferencias de exposición. Normalmente se puede configurar el horquillado para tomar tres fotografías con diferencias de +0EV +3EV y -3EV. A partir de estas tres tomas y el software adecuado, se puede generar una sola imagen de alto rango dinámico o *High Dynamic Range* (HDR), en la que no habrá zonas quemadas, ni zonas negras sin detalle. Conviene aclarar que ningún dispositivo de visualización actual permite visualizar la gama tonal de las imágenes HDR, pero mediante la técnica del mapeo tonal se puede obtener una imagen LDR (Low Dynamic Range), optimizada para su visualización en cualquier pantalla actual.

17.3. El método de captura estereoscópico

La captura estereoscópica de los panoramas no es algo tan sencillo como pudiera parecer y uno podría pensar que se trata de realizar dos panoramas esféricos, tomados desde dos puntos separados por la distancia base, pero en realidad es algo más complejo, puesto que se trata de reproducir la trayectoria que describen nuestros ojos cuando pivotamos sobre nosotros mismos para contemplar el entorno que nos rodea.

Imaginemos que nos situamos sobre una peana que gira horizontalmente 360°. Al girar, el centro de perspectiva o punto nodal de cada ojo describe una circunferencia cuyo centro está en el eje de rotación de la peana, por tanto, los puntos de vista de cada ojo varían a medida que gira la peana. Sabemos que para que las imágenes de un panorama puedan unirse perfectamente, el punto de vista de todas ellas debe ser el mismo, pues de lo contrario se producen errores de paralaje, por lo que deberemos analizar qué posiciones del observador, en relación al eje de giro de la peana, nos interesan más.

Si quisiéramos minimizar la translación que sufre cada ojo en la rotación, deberíamos situarnos sobre la peana giratoria, de manera que su eje de giro pasara por el punto medio entre los ojos o posición de ojo cíclope. De este modo, ambos ojos describirían una circunferencia de diámetro igual a la distancia interpupilar, centrada en el ojo cíclope. Reproducir esta situación sería lo más conveniente para minimizar los errores de *stitching*, pero ambos panoramas serían algo imperfectos.

Otra posibilidad sería colocarnos de forma que el punto nodal de uno de nuestros ojos estuviera situado sobre el eje de giro de la peana, en cuyo caso, el ojo restante orbitaría alrededor del primero, formando una circunferencia de radio igual a la distancia interpupilar. Al simular esta situación fotográficamente, uno de los panoramas sería perfecto, pues el punto de vista permanece fijo en el espacio, mientras que el panorama correspondiente al otro ojo sufriría mayores errores de paralaje que en el supuesto anterior, ocasionando defectos de *stitching* más evidentes, sobre todo

en los motivos próximos a la cámara. Por lo tanto, deberemos escoger entre cualquiera de estos dos supuestos cuando queramos realizar la captura de un panorama estereoscópico, analizando en cada caso las ventajas e inconvenientes de cada método de captura.

Para tomar simultáneamente las imágenes correspondientes a los dos panoramas, harían falta dos cámaras y un cabezal panorámico adaptado a este fin específico, o bien, emplear una cámara estereoscópica sobre un cabezal panorámico convencional, pero lo más sencillo es emplear una sola cámara y realizar la captura de los panoramas de forma alternada. La Fig. 17.21 muestra la posición de la cámara, con respecto al eje de giro, en cada una de las opciones consideradas.

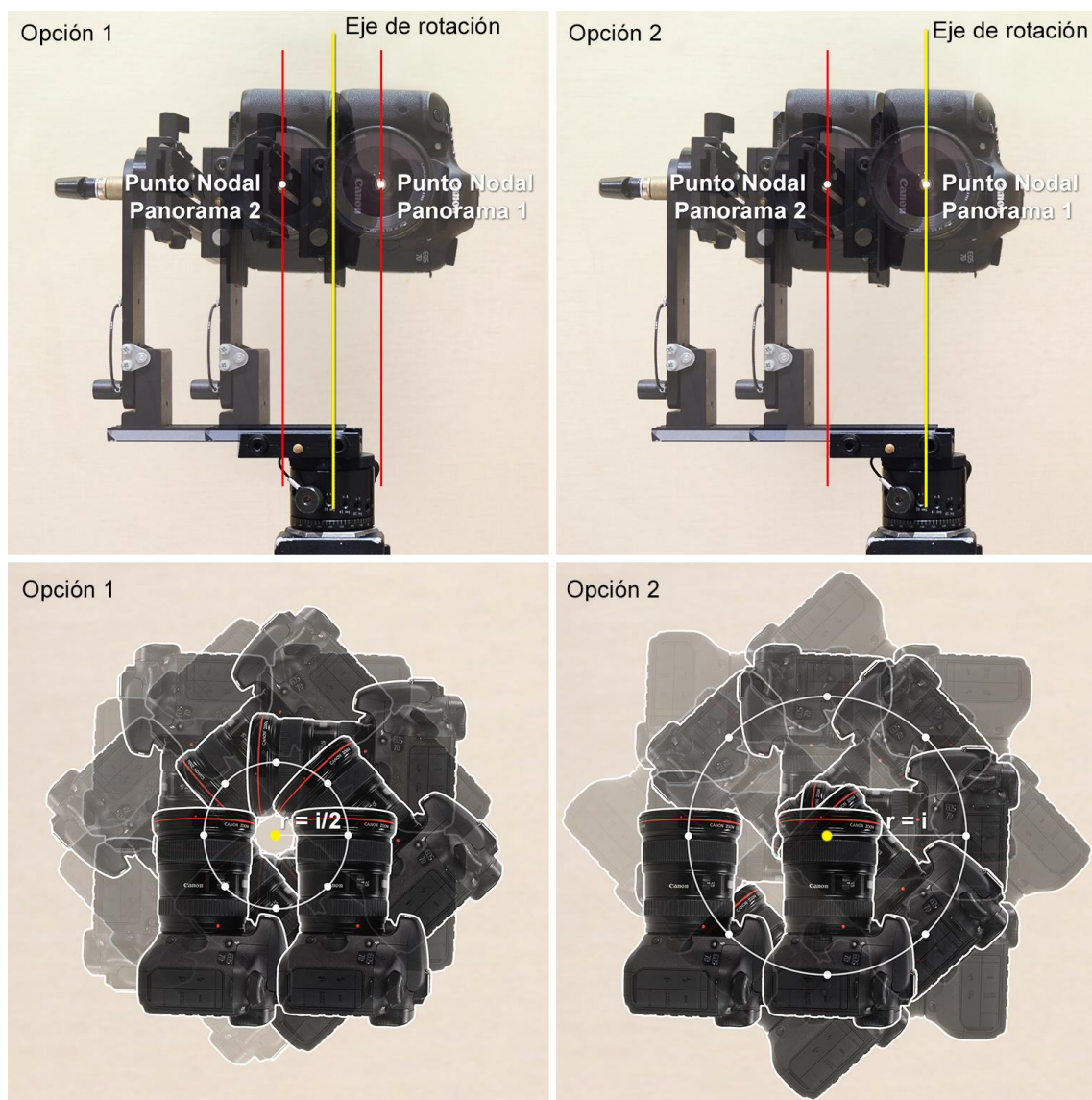


Fig. 17.21 Posiciones de la cámara con respecto al eje de giro en ambas opciones. Pedro Cabezos

Durante mi estancia de investigación en la Universidad de Roma “La Sapienza”, realicé la captura de múltiples panoramas esféricos estereoscópicos de los principales

monumentos de la ciudad. La legislación Italiana prohíbe el uso de trípode sin el consentimiento previo de las autoridades, por lo que tuve que obtener los permisos pertinentes.

Para la captura utilicé un cabezal panorámico Manfrotto 303 SPH, de operación manual, y una cámara Canon 7D de formato APS-C, equipada con un objetivo Canon 17-40L, cuya distancia focal equivalente es de 27-64mm. Calibré la posición del punto nodal para la distancia focal menor (27 mm), que es la que proporciona un mayor campo visual. Para garantizar el solape mínimo entre fotografías fue necesario establecer 38 posiciones de toma: Un primer anillo horizontal de 12 tomas, girando 30° horizontalmente entre ellas, un segundo anillo de 12 tomas con el eje óptico a +45° con respecto al plano horizontal, un tercer anillo de 12 tomas con el eje óptico a -45° con respecto al plano horizontal y, finalmente, una toma cenital (Zenit) y una mirando hacia abajo, ortogonalmente al suelo (Nadir).

Cabe destacar que en la toma Nadir, aparece el propio cabezal panorámico y el trípode, por lo que para evitar su aparición en el panorama, realicé una fotografía adicional de la superficie sobre la que se había posicionado el trípode. Como normalmente esta superficie suele ser plana, puede obtenerse una rectificación de esta toma para poder suplantar la imagen dejada por el trípode en el panorama, mediante una operación de postproducción.

Para lograr captar todo el rango dinámico de la escena realicé un horquillado automático de tres tomas en intervalos de +0EV, +3EV y -3EV, lo que supuso un total de 114 fotografías por panorama, más las 3 tomas correspondientes del parche Nadir.

Opté por seleccionar un diafragma $f/8$ como solución de equilibrio entre profundidad de campo y pérdida de nitidez por efecto de la difracción. La exposición global del panorama se determinó teniendo en cuenta la toma más luminosa y se estableció la velocidad de obturación de modo que, en la toma menos expuesta del horquillado, las altas luces no llegaran a quemarse. Esta técnica es lo que se conoce como derecheo del histograma y con ello se logra minimizar el ruido en la imagen. Por este mismo motivo ajusté el valor de ISO al mínimo nativo de la cámara, es decir, ISO 100.

El balance de blancos no fue un problema porque se utilizó el formato RAW y su ajuste fue realizado posteriormente mediante el revelado conjunto de todas las imágenes, asignándoles a todas ellas el mismo valor.

Cuando se requiere un ajuste preciso del balance de blancos, una técnica muy adecuada es utilizar una carta de grises como la X-Rite ColorChecker Grayscale, realizando una toma bajo las condiciones lumínicas de la escena, que posteriormente servirá de referencia para establecer el parámetro óptimo del balance de blancos en el software de revelado RAW. De igual modo, cuando la reproducción del color resulta

crucial, puede emplearse la carta X-Rite ColorChecker, que contiene 24 parches de color, para crear un perfil de color de la cámara específico para las condiciones de iluminación de la escena, de modo que la concordancia del color resulta muy precisa.



Fig. 17.22. Evaluación de la exposición en la zona de altas luces y ajustes finales del cabezal en el panorama de Sant'Ivo alla Sapienza. Fotografías realizadas por Hugo Barros

El enfoque se realizó de forma manual a la distancia hiperfocal que, para la distancia focal de 27mm, un diafragma $f/8$ y un círculo de confusión de 0.01mm, resulta ser de 3.63 m.

Para la captura estereoscópica opté por la segunda de las opciones, expuestas anteriormente, con el fin de obtener, al mismo tiempo, un panorama sin errores de paralaje, que resulta muy adecuado para el visionado en modalidad monoscópica. Este panorama se corresponde con la toma del ojo derecho, mientras que, en el panorama correspondiente al ojo izquierdo, la cámara orbita horizontalmente alrededor del punto en el que fue tomado el primero, a una distancia equivalente a la interpupilar, en consonancia con un planteamiento ortoestereoscópico. Este segundo panorama tendrá algunas imperfecciones de cosido debido al desvío del punto nodal con respecto al punto de giro.

La mayoría de las personas tenemos una predominancia ocular, lo que origina que un estímulo proveniente de nuestro ojo predominante, prevalezca sobre el otro. Esto hace que al presentar el panorama perfecto ante el ojo predominante, el observador no note los pequeños defectos que presenta el otro panorama. La predominancia ocular suele estar ligada a la lateralidad, de modo que en las personas diestras su ojo predominante suele ser el derecho y, recíprocamente, en las zurdas suele ser el izquierdo. Como estadísticamente hay más personas diestras que zurdas, hice corresponder el panorama sin errores de paralaje con el ojo derecho.

El mayor inconveniente que surge al realizar la captura de los panoramas de forma alternada es que se deben sortear los motivos en movimiento de la escena, como por ejemplo las personas, con el fin de evitar las incoherencias entre ambos panoramas.



Fig. 17.23. Proceso de captura del panorama dibujado por mi compañero Hugo Barros

El proceso de montaje de las imágenes se ha realizado con el software de *Stitching Hugin*³⁵, de libre distribución, del que tuve la ocasión de hablar anteriormente a la hora de realizar algunas transformaciones proyectivas. Utilizando la metodología expuesta se tomaron varios panoramas de los siguientes enclaves:

- *Pantheon* (27 a.C.- 125 d.C.)
- *Chiesa di Sant'Ignazio* (Pinturas de Andrea Pozzo, 1685-1694)
- *Chiesa di Sant'Ivo alla Sapienza* (Francesco Borromini, 1642-1660)
- *Chiesa di San Carlo alle Quattro Fontane* (Francesco Borromini, 1634-1644)
- *Chiesa di Sant'Agnese in Agone* (G. Rainaldi y F. Borromini, 1652-1672)
- *Tempietto di San Pietro in Montorio* (Donato Bramante, 1502-1510)
- *Corridoio di Sant'Ignazio* (Pinturas de Andrea Pozzo, 1680)
- *Teatro Olimpico*, Vicenza (Andrea Palladio, 1580-1585)

A continuación, se muestran algunos de los panoramas obtenidos, representándose sólo la proyección equirectangular correspondiente al panorama del ojo derecho. De momento no se ha desarrollado ningún visor específico para la modalidad estereoscópica, porque han de tenerse en cuenta algunas consideraciones que veremos más adelante. Por ello se aporta un vínculo para poder realizar la navegación

³⁵ Se puede obtener más información en: <http://hugin.sourceforge.net/>

inmersiva en modo monoscópico, para lo que será necesario tener conexión a Internet y un navegador con el plugin de Adobe Flash instalado.

Una vez se haya cargado el panorama, basta pulsar y arrastrar con el ratón para cambiar la dirección de visualización y poder mirar en cualquier otra dirección. Mediante la rueda del ratón se puede aumentar o disminuir el ángulo de apertura visual.



Pantheon [Navegar panorama](#)



Sant'Ignazio [Navegar panorama](#)



Sant'Ivo alla Sapienza [Navegar panorama](#)



San Carlino [Navegar panorama](#)



Sant'Agnese in Agone [Navegar panorama](#)



San Pietro in Montorio [Navegar panorama](#)



Corridoio di Sant'Ignazio [Navegar panorama](#)



Teatro Olimpico [Navegar panorama](#)

17.4. Los problemas de visualización

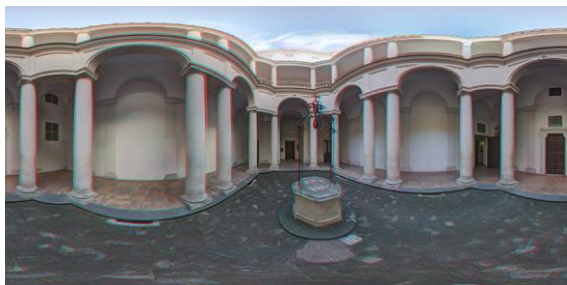
Los visores actuales de panoramas esféricos utilizan las librerías gráficas para crear una esfera virtual alrededor de la cual se mapea la imagen equirectangular y se sitúa el punto de vista del observador en el centro de la esfera.

Sin embargo, para visualizar un panorama esférico estereoscópico, se deben conjugar ambos panoramas, de modo que cada ojo vea la vista que le corresponde, adoptando el campo de visión y paralaje adecuados en relación a las condiciones de visualización, con el fin de evitar las distorsiones perceptivas.

Una solución para salir del paso, utilizando un visor convencional, sería realizar un anaglifo a partir de las dos proyecciones equirectangulares obtenidas, pero no es lo más conveniente, puesto que, en este caso, el paralaje es fijo y podría no adecuarse a las condiciones de visualización. También el campo visual debería estar relacionado con el tamaño de la pantalla y la posición del observador. Otro inconveniente es la coordinación de los panoramas en las vistas cenitales en donde con un visor convencional podrían producirse errores de epipolarización cuando la cámara rota sobre su eje, produciéndose así paralajes con componente vertical.

Por este motivo es preciso desarrollar un visor específico que ofrezca una visualización compatible con los visores personales y dispositivos 3D actuales, además del anaglifo. El desarrollo de este visor abriría una nueva línea de investigación y lo que aquí se plantea son las consideraciones acerca de los parámetros necesarios para su desarrollo futuro.

De todos modos, no quisiera dejar de mostrar, aunque no sea de un modo absolutamente perfecto, los siguientes ejemplos de panoramas esféricos estereoscópicos, realizados en anaglifo, para ser visualizados haciendo uso de un visor convencional. Se trata del Claustro de *San Carlino* y el interior del *Tempietto di San Pietro in Montorio* de Bramante.



Claustro de *San Carlino* [Navegar panorama](#)



Tempietto di Bramante [Navegar panorama](#)



17.5. Desarrollo de un visor específico

En principio es necesario que los dos panoramas (ojo derecho y ojo izquierdo) estén perfectamente nivelados y sus direcciones iniciales sean paralelas. El visor debe calcular los parámetros de convergencia ocular y campo visual en relación a las condiciones de visualización, por tanto, deben conocerse de antemano una serie de parámetros como son la anchura (a) de la ventana estereoscópica y la distancia de observación (d), que deberá determinar el usuario. También será necesario conocer otros parámetros como la resolución horizontal de la pantalla (Rh) y la vertical (Rv), expresada en píxeles, que pueden obtenerse de las variables de entorno de propio sistema operativo y por tanto no deberán ser introducidas por el usuario. Dado que la proporción ancho/alto de la pantalla puede ser determinada por estas dos últimas variables, podrá calcularse igualmente la altura de la ventana estereoscópica (b), sin necesidad de demandarla al usuario.

Con estos parámetros puede obtenerse el ángulo de visión diagonal (φ), cuyo valor vendrá determinado por la ecuación:

$$\varphi = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2 \cdot d} \right)$$

Siendo:

- φ , ángulo de apertura del campo visual
- a , ancho de la ventana estereoscópica
- b , alto de la ventana estereoscópica
- d , distancia entre el observador y la ventana estereoscópica

Este ángulo determina la porción que debe obtenerse de cada panorama para ser mostrada al ojo correspondiente.

Normalmente el espectador demandará los cambios en la dirección de visualización mediante una operación pulsar y arrastrar, por lo que se debe registrar continuamente la dirección de *panning* para hallar los incrementos en el vector de visualización (\vec{V}), que puede expresarse según sus coordenadas esféricas. También sería interesante dotar al visor de la capacidad de registrar los parámetros ofrecidos por el giroscopio de los dispositivos móviles o de los sistemas de *Head Tracking* de algunos visores personales, para producir una visualización que responda a los movimientos de la cabeza, con el fin de aumentar la sensación inmersiva.

Las coordenadas del vector de visualización (\vec{V}), junto con el ángulo de apertura visual (φ), irán determinando en todo momento la porción de imagen que debe obtenerse, en tiempo real, a partir de cada panorama, para componer el par estereoscópico que

debe ser montado según el formato de salida elegido por el usuario. Las opciones más básicas serían la opción de montaje en anaglifo y la SBS paralelo, que resulta compatible con la mayoría de dispositivos 3D.

El efecto de convergencia ocular puede llevarse a cabo mediante una translación horizontal entre las imágenes que configuran el par, tal como se vio en el capítulo de la toma estereoscópica, por lo que la traslación horizontal (Th), expresada en píxeles, necesaria para simular la convergencia ocular puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$Th = \frac{i \cdot Rh}{a}$$

Siendo:

Rh , resolución horizontal de la pantalla (px)

a , ancho de la ventana estereoscópica (mm)

i , distancia interpupilar media (65 mm)

La composición del par y su salida gráfica debería producirse en tiempo real, para garantizar la fluidez de la visualización, lo que supone el principal reto para programar esta aplicación, sobre todo en su aplicación a las plataformas móviles.

18. CONCLUSIONES Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Al finalizar esta etapa de investigación me siento muy satisfecho de los resultados, especialmente de todo lo que he aprendido y madurado tras todo este tiempo dedicado en cuerpo y alma a la investigación en el campo de la estereoscopia. Esta Tesis me ha dado la oportunidad de conocer a muchas personas especialistas en la materia, de las que he podido enriquecerme con sus interesantes consejos y su inestimable colaboración.

Al abordar el apartado de conclusiones conviene señalar que, aunque cada apartado de estudio o capítulo de esta Tesis lleva implícito sus propias conclusiones y resultados, quisiera, a modo de resumen, señalar los principales hitos de cada una de las aportaciones realizadas, añadiendo también algunos ejemplos de aplicación en los que se han puesto en práctica todas las técnicas y metodologías desarrolladas en la Tesis.

Algunos de los ejemplos han sido realizados a partir de modelos arquitectónicos virtuales, muchos de ellos modelados a partir de los antiguos tratados de estereotomía de la piedra como el de Alonso de Vandelvira. En el caso de las esculturas he tenido el privilegio y honor de poder acceder a las esculturas realizadas por el gran escultor valenciano Andreu Alfaro (1929-2012), gracias a la inestimable colaboración de su hijo Andreu Alfaro Hofmann, quien me brindó todas las facilidades para poder realizar las fotografías.

18.1. Conclusiones

El estudio de la visión humana y de las claves que determinan la percepción de la profundidad, nos permite poner de manifiesto los recursos gráficos que, junto con la disparidad retinal, acentúan el efecto de relieve. De este modo, los recursos de iluminación con sombras arrojadas y los gradientes de textura son dos claves monoculares que complementan en gran medida a la disparidad, por lo que su inclusión en los gráficos generados por ordenador nos ayudará a ensalzar el efecto estereoscópico.

La consideración y análisis de las últimas teorías en el campo del confort visual estereoscópico, me ha permitido desarrollar una metodología de captura estereoscópica propia, en la que se tienen en cuenta los límites de paralaje impuestos por cada una de las investigaciones analizadas. El estudio pone también de manifiesto los motivos que pueden ocasionar distorsiones perceptivas, que deben evitarse para que el resultado perceptivo resulte proporcionado y confortable.

El análisis de las publicaciones estereoscópicas en el campo de la Geometría Descriptiva me ha permitido deducir muchos recursos utilizados por los maestros de este arte, sobre todo en el uso de las anamorfosis estereoscópicas, que resulta ser un recurso de gran utilidad en el medio impreso. Este tipo de representaciones

anamórficas resultan muy llamativas, puesto que el efecto de relieve suele resultar más evidente que en las representaciones frontales por del efecto de las distorsiones propias de las anamorfosis. El hecho de que el espectador cambie ligeramente su posición provoca una distorsión volumétrica que se percibe como un movimiento de la figura, que enfatiza todavía más la ilusión óptica. La obtención de las anamorfosis pueden realizarse mediante una transformación proyectiva, cuando se trata de una toma real, pero, si se trata de una imagen sintética obtenida a partir de un escenario y una cámara virtual, en realidad no es necesario, pues bastará con abrir lo suficiente el campo visual de la cámara como para abarcar la escena, mientras que el eje visual permanece ortogonal al plano del cuadro. La ausencia de distorsiones radiales en las cámaras virtuales tiene como resultado una proyección cónica siempre perfecta, independientemente del campo visual empleado.

El estudio del funcionamiento y nuevos formatos compatibles con los dispositivos 3D actuales me ha permitido desarrollar una metodología de creación y edición de material estereoscópico, basado en software de libre distribución, para generar contenido estereoscópico compatible con estos nuevos dispositivos y con las vías de divulgación a través de Internet, que son, sin duda alguna, uno de los medios de comunicación con más proyección de futuro.

Las limitaciones en la concordancia del color en los medios de impresión actuales son uno de los mayores problemas a la hora de generar material estereoscópico en las publicaciones. Los libros clásicos utilizaban tintas especiales para representar los anaglifos de síntesis negra, pero en el caso de la síntesis policroma el proceso se complica y no queda más remedio que asumir las limitaciones y obrar en consecuencia. Por este motivo he conseguido desarrollar un método de optimización de los anaglifos para minimizar el fenómeno del *ghosting*, presente en este tipo de publicaciones, que puede arruinar completamente el efecto estereoscópico. El método propuesto resulta muy efectivo como puede comprobarse en la versión impresa de esta Tesis o en alguno de los artículos ya publicados (Cabezos & Cisneros, 2014).

La recopilación histórica de algunas de las aplicaciones científicas de la estereoscopia quiere reivindicar y poner de manifiesto la validez de esta disciplina dentro del campo científico, en el que cada vez cobran más importancia los aspectos divulgativos y la aplicación de las nuevas tecnologías como vías de comunicación.

El fascinante mundo de la fotografía antigua era uno de los temas más desconocidos para mí, pero sumergirme en su estudio ha supuesto una experiencia realmente apasionante y poder haber tenido acceso a fotografías originales de mediados del siglo XIX, en la que aparecen monumentos desaparecidos de mi ciudad, ha resultado un excitante viaje en el tiempo. La investigación me ha permitido elaborar un censo de las fotografías realizadas en Valencia, por los editores de tarjetas estereoscópicas

comerciales durante el siglo XIX. La selección de ejemplares digitalizados permite conocer estereoscópicamente muchos de los monumentos perdidos durante la demolición de las murallas, así como analizar los principales cambios urbanísticos del periodo de expansión de la ciudad a partir de los planes de ensanche.

Siempre he sido un apasionado la fotografía en general, la estereoscopia y la fotografía panorámica, por lo que decidí afrontar el reto de intentar conjugar la estereoscopia con los panoramas esféricos, ideando un método de captura que pudiera resultar eficiente. Aunque se trata de un tema complejo, no exento de dificultades. Los resultados obtenidos son muy satisfactorios, a falta de desarrollar un visor específico que permita obtener una visualización óptima de los panoramas obtenidos. No podía haber un mejor escenario que la Ciudad Eterna para poner en práctica la metodología expuesta, así que una vez obtenidos los permisos pertinentes, pude acceder a fotografiar sus principales monumentos. Jamás podré olvidar la emoción que pude sentir la mañana que fui a fotografiar el Pantheon, al encontrarme prácticamente solo ante aquella maravilla arquitectónica, con un silencio sepulcral solamente interrumpido por el sonido del disparo de la cámara, que producía un eco estremecedor. Este tipo de experiencias suelen ocurrir sólo una vez en la vida, por lo que reitero mi agradecimiento a las autoridades italianas, concretamente a la *Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici per il Comune di Roma*, por haberme dado el permiso para acceder al monumento, una hora antes de la apertura al público.

18.2. Conclusions

The study of human vision and depth cues has allowed to determine the graphical resources that, along with retinal disparity, improve the relief effect. Resources like lighting effects, such as shadow casting and texture gradients, are some monocular cues that greatly complement depth perception, so including these effects in computer generated graphics will help us to highlight the stereoscopic effect.

After studying and analyzing the most recent theories in the analysis of stereoscopic visual comfort, I was able to design a new methodology for stereoscopic capture, always taking into account the parallax limits established by each of the analysed authors. The study also revealed the factors that can cause perceptual distortions, which should be avoided to ensure that perceptual result is proportionate and comfortable.

The study of stereoscopic publications related to Descriptive Geometry has allowed me to deduce many techniques that were employed by the masters of this art, especially those related to stereoscopic anamorphosis, which is a really useful resource mainly in the printed media. This type of anamorphic representations are outstanding, since the

relief effect is often more noticeable than in frontal representations, due to the distortions produced by the anamorphic effect. In fact, when the viewer changes its position slightly, it causes a volumetric distortion that is perceived as a movement of the figure, which emphasizes even more the optic illusion.

In case of a conventional photographed stereoscopic pair, the anamorphosis can be achieved by projective transformation. However, in the case of a CGI generated pair, this isn't necessary, as it could be easily obtained directly in each shot by opening the camera field of view. That way it would cover the complete scene, while the visual axis remained orthogonal to the picture plane. The absence of radial distortions in CGI cameras results in perfect perspective projections, regardless of the visual field used.

Acquiring some knowledge about current 3D devices and their supported media formats has allowed me to develop a methodology to create and edit stereoscopic content, compatible not only with all these new devices but also with many websites. This will ensure that it will be commonly used in a short term.

The limitation of current printing devices to match colors is currently one of the biggest problems for reproducing anaglyphs in the printed media. Classic books used special dyes to reproduce black synthesized anaglyphs, but, in the case of polychrome synthesis anaglyphs, this process becomes more complicated and it leaves us no other choice than to assume its limitations and to act consequently. For this reason, I have succeeded in developing a method to optimize anaglyphs, minimizing the ghosting effect, which is a common flaw in these kinds of publications, and which could completely ruin the stereoscopic effect.

The research has allowed me to conduct a census of the photographs with stereoscopic views that were taken in Valencia by the editors of commercial cards during the nineteenth century. The selection of digitized copies has allowed us to get to know stereoscopically many lost monuments and urban spaces of this period.

I have always been fascinated with photography, stereoscopy and panoramic photography, so I decided to accept the challenge of creating stereoscopic spherical panoramas, devising a method to capture them efficiently. This is a complex issue that involves plenty of difficulties; nevertheless, the results have been very satisfactory.

18.3. Nuevas líneas de investigación

El campo de la fotografía histórica estereoscópica es un terreno prácticamente inexplorado en el que aún queda mucho material por descubrir y sacar a la luz, no solo perteneciente a los editores comerciales conocidos, sino también a otros fotógrafos cuyas fotografías constituyen documentos gráficos de suma valía.

La fotografía estereoscópica con drones es otro campo inexplorado, con el que se abre un amplio abanico de posibilidades para representar los monumentos arquitectónicos a vista de pájaro.

La realización de panoramas estereoscópicos de los principales monumentos de la ciudad de Valencia es otra posible vía de investigación futura, así como realizar fotografías estereoscópicas de los principales monumentos para documentar su estado actual con todo el rigor de las técnicas desarrolladas en la Tesis.

Los novedosos visores personales, cada vez más económicos, permiten una visualización estereoscópica inmersiva de bajo coste, alguno de ellos utilizando tan solo un Smartphone, por lo que la realización de materiales interactivos estereoscópicos con fines divulgativos representa toda una vía de experimentación.

La incipiente técnica del video panorámico 360º también supone todo un reto ante la posibilidad de idear una variante estereoscópica, aunque, a priori, parece un problema bastante complejo de resolver.

La aplicación de la metodología desarrollada a la realización de material docente estereoscópico es otra de las líneas de investigación abiertas en beneficio del aprendizaje y la motivación de los alumnos.

18.4. Ejemplos de aplicación

Los ejemplos mostrados a continuación se presentan en dos versiones, la frontal y la anamórfica. Las condiciones de visualización son las que se muestran en el esquema siguiente.

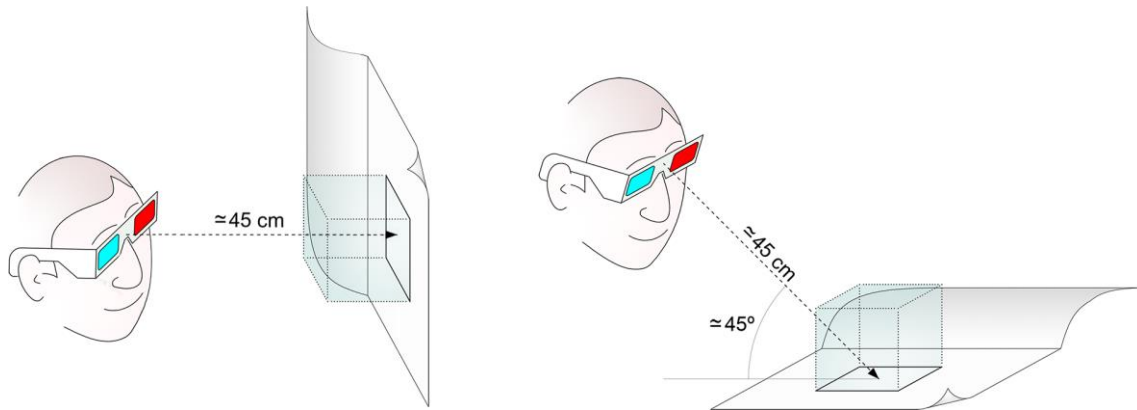


Fig. 18.1. Condiciones de visualización para los anaglifos frontales (izda.) y los anamórficos (dcha.)

Si se visualiza la versión digital de la Tesis, se debe tener presente que el escalado de la página en pantalla se corresponda con un formato A4, pues los cambios de escala pueden desvirtuar el efecto estereoscópico. El papel milimetrado sobre el que se apoyan las figuras se representa a escala 1:1 en las figuras anamórficas, por lo que éste puede servir de referencia para establecer el escalado idóneo en pantalla, además de las medidas del formato de la hoja. Para visualizar correctamente los anaglifos anamórficos sería idóneo utilizar un Tablet, para poder contemplar la pantalla oblicuamente según la posición indicada.

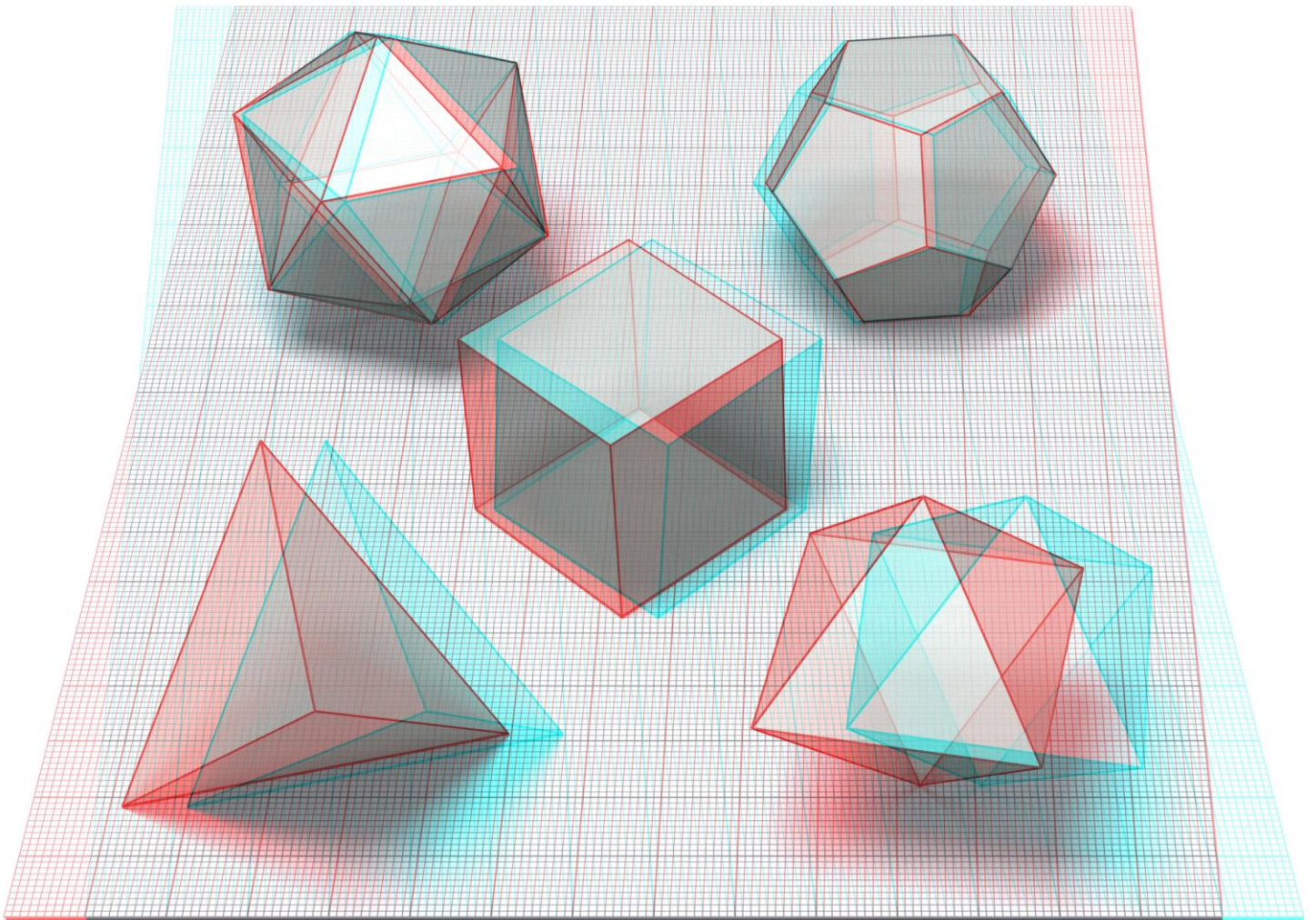


Fig. 18.2. Poliedros Regulares



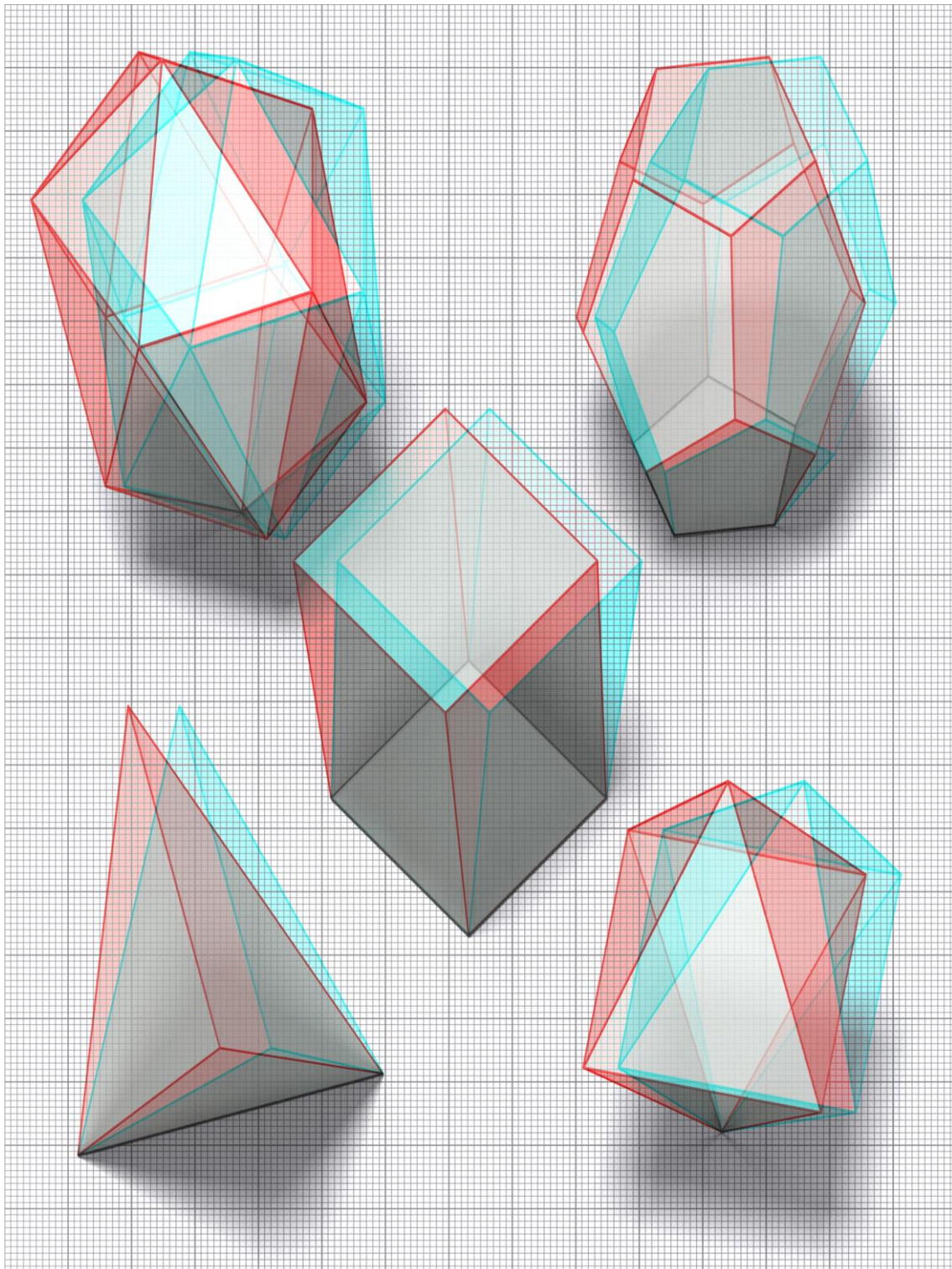


Fig. 18.3. Poliedros Regulares



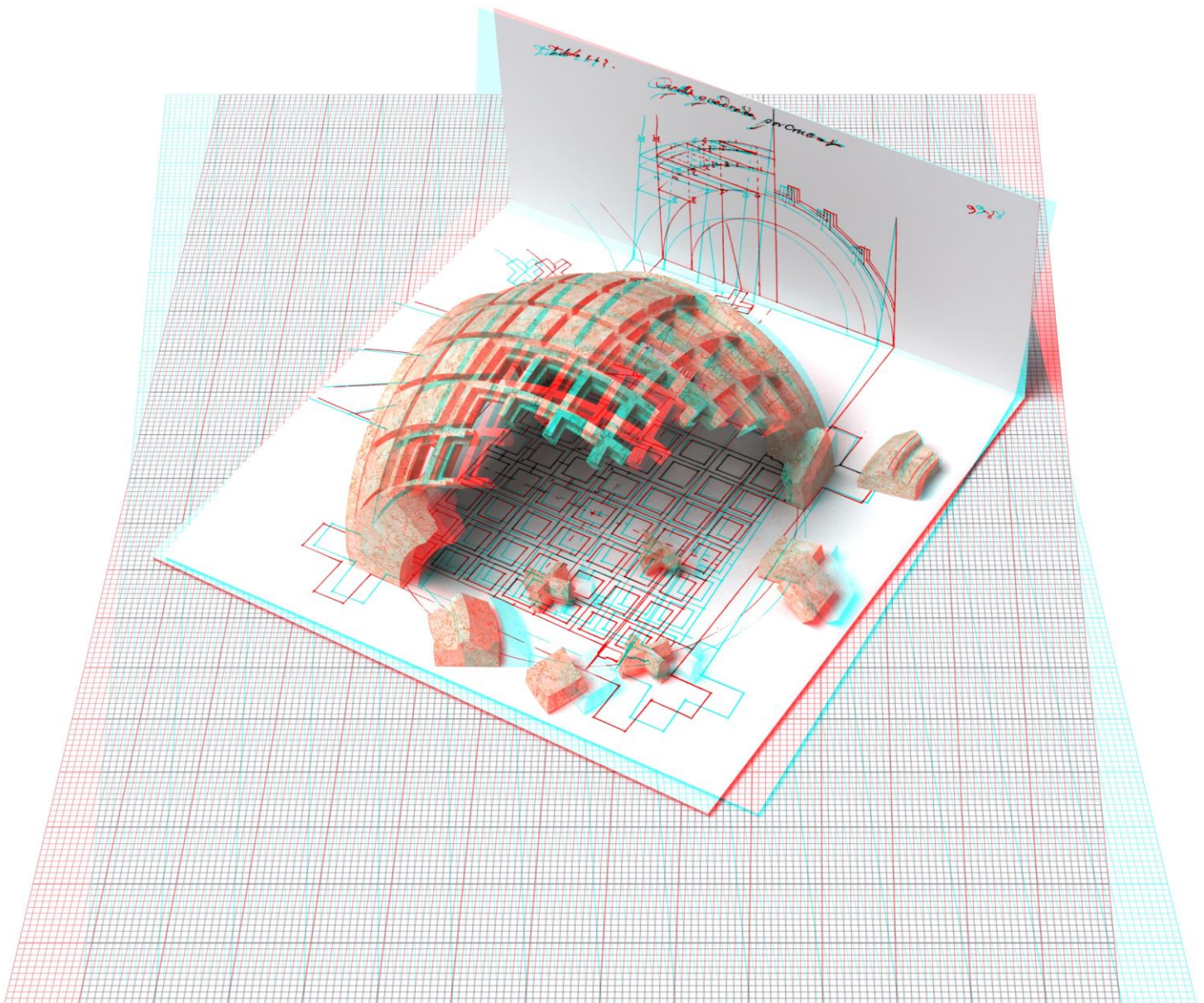


Fig. 18.4. Capilla cuadrada por Cruceros. Tratado de Vandevira



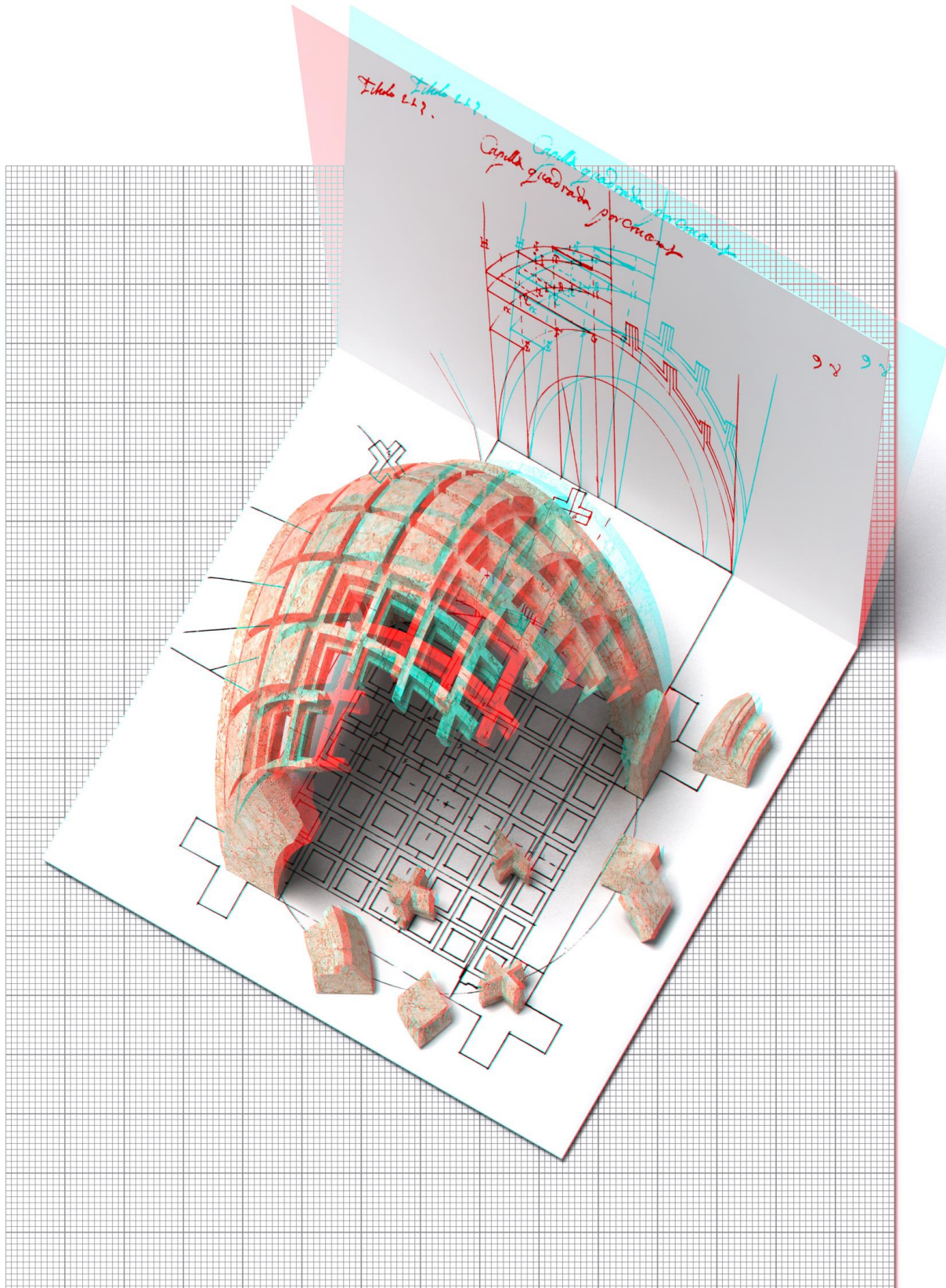


Fig. 18.5. Capilla cuadrada por Cruceros. Tratado de Vandevira



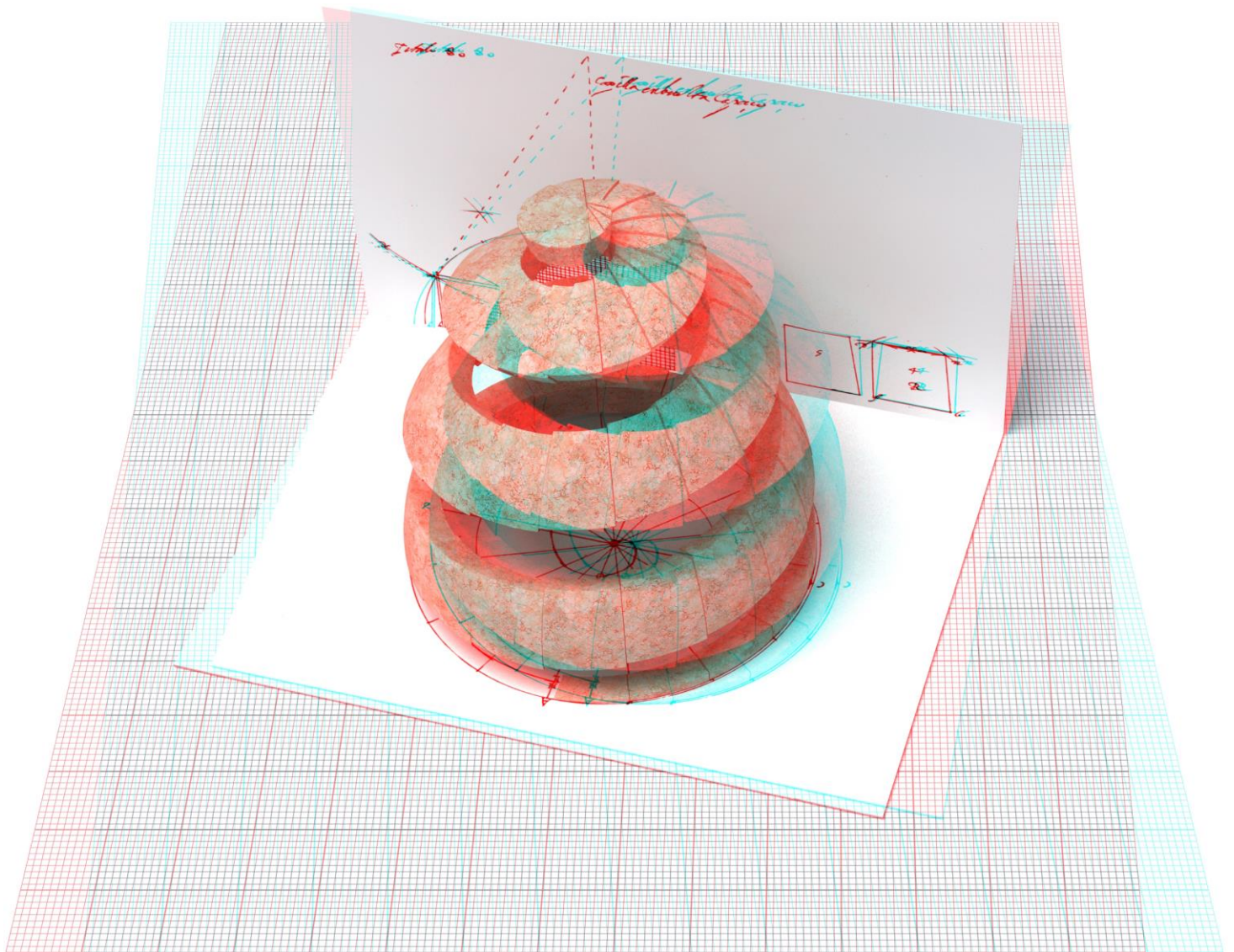


Fig. 18.6. Capilla redonda en vuelta capazo. Tratado de Vandelvira



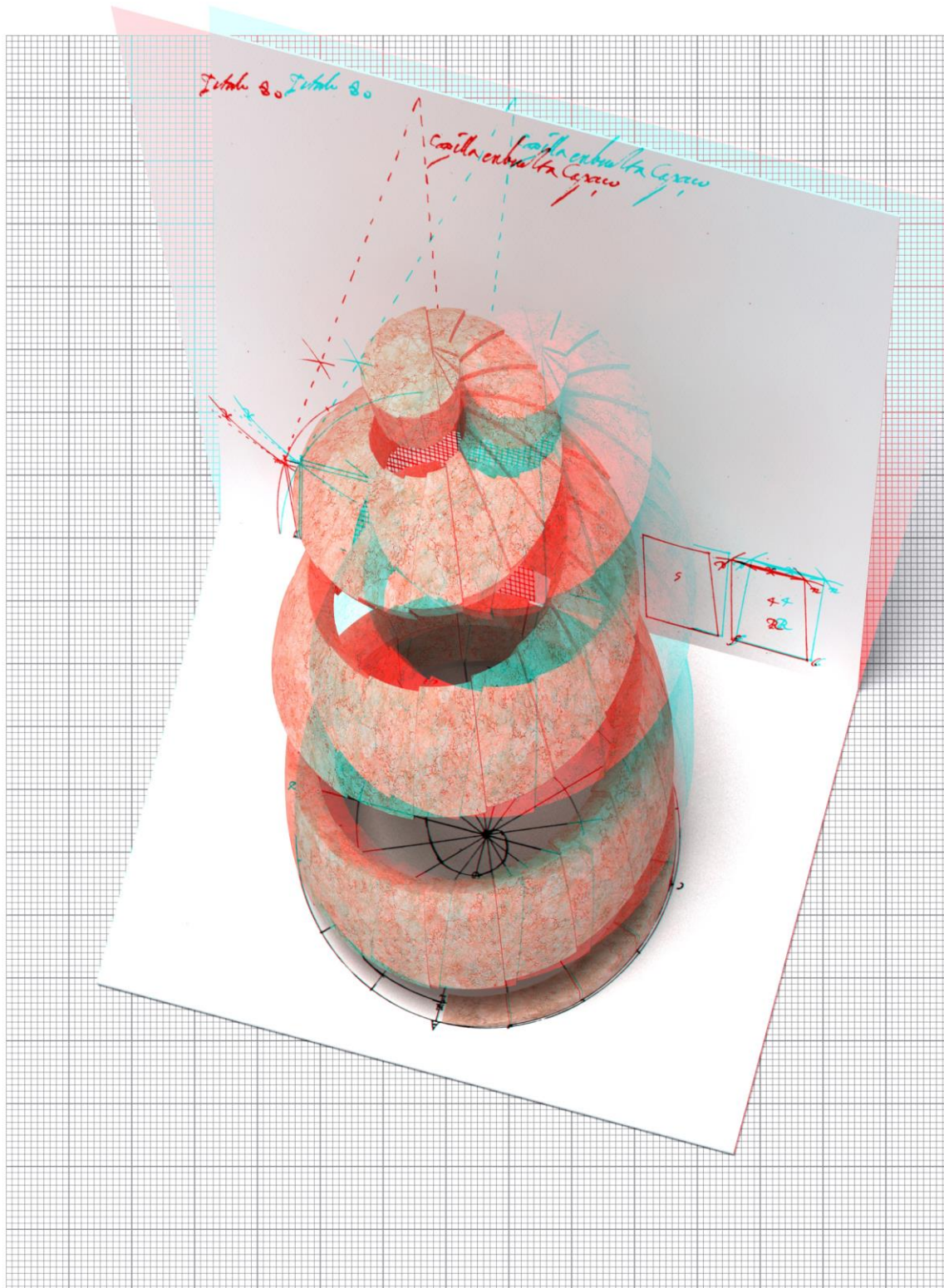


Fig. 18.7. Capilla redonda en vuelta capazo. Tratado de Vandelvira



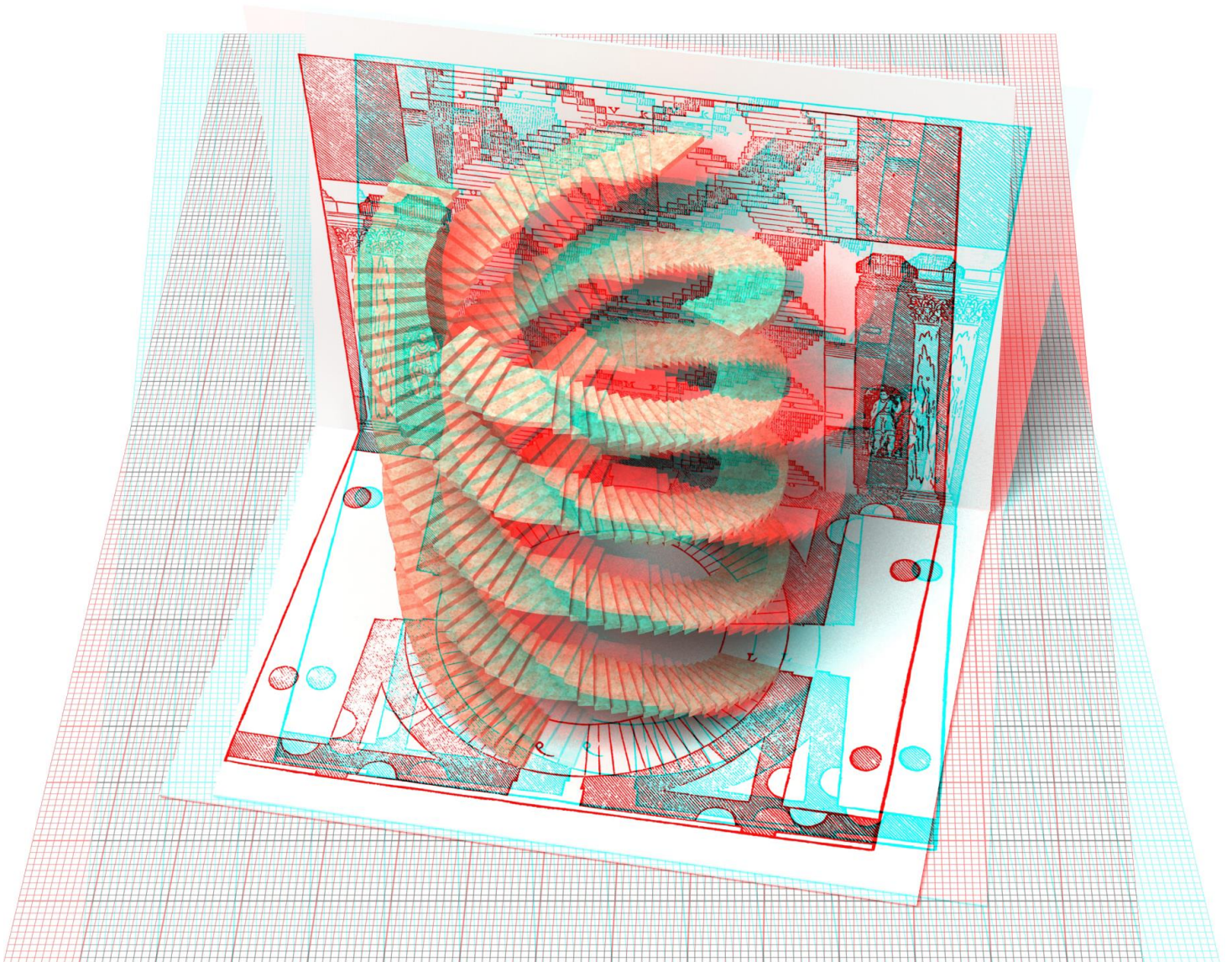


Fig. 18.8. Escalera descrita en los cuatro libros de arquitectura de Andrea Palladio



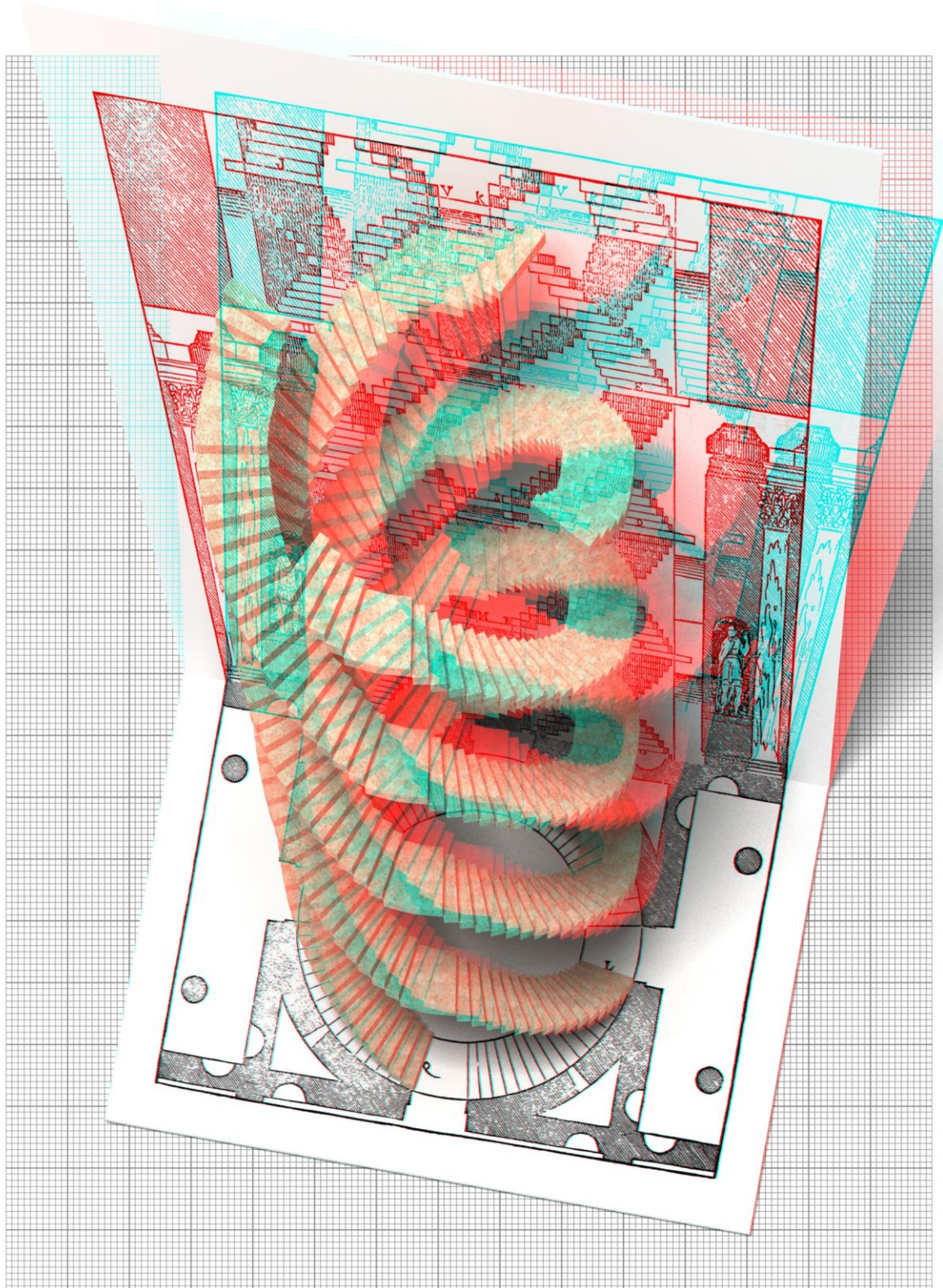


Fig. 18.9. Escalera descrita en los cuatro libros de arquitectura de Andrea Palladio



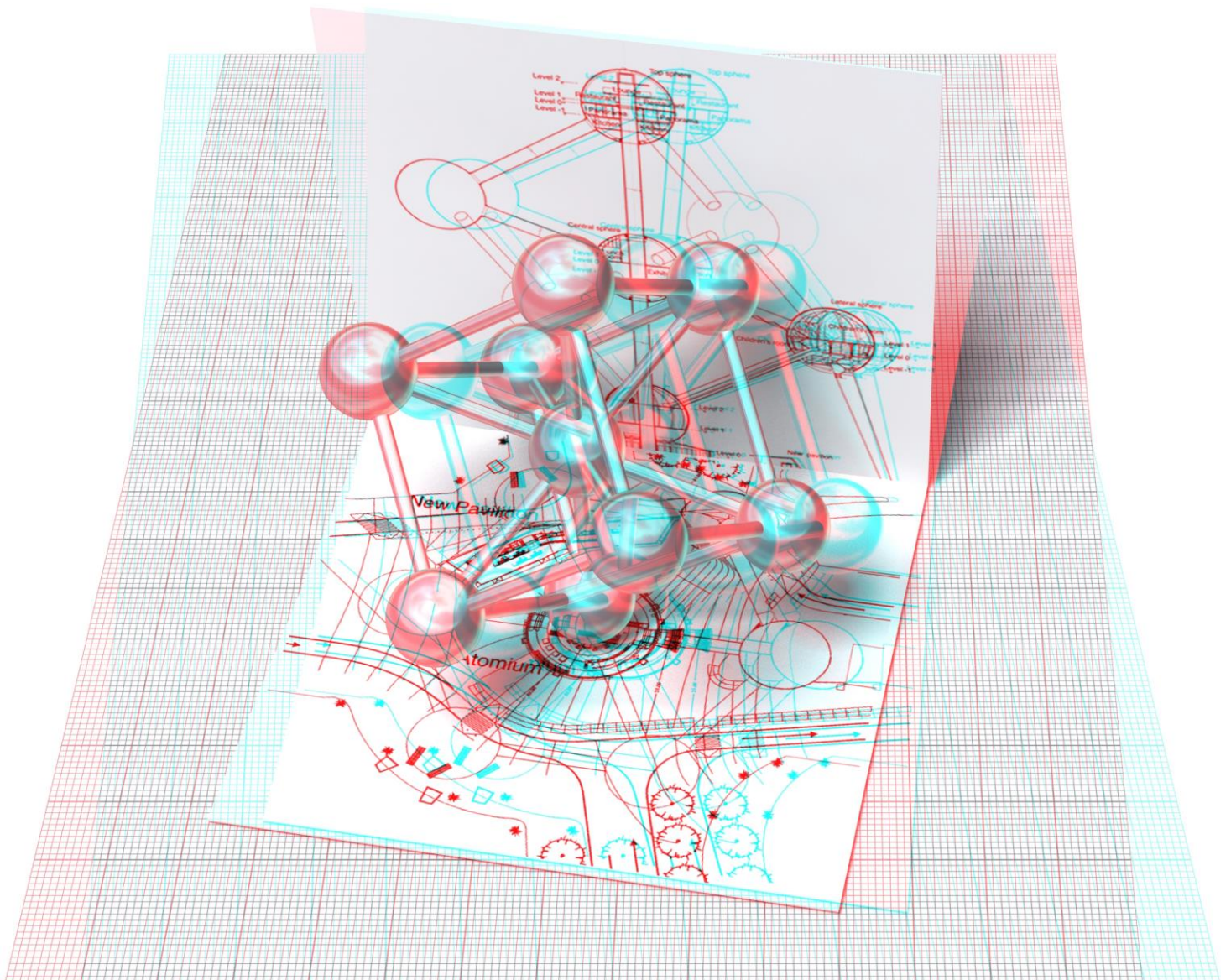


Fig. 18.10. Atomium de Bruselas de André Waterkeyn



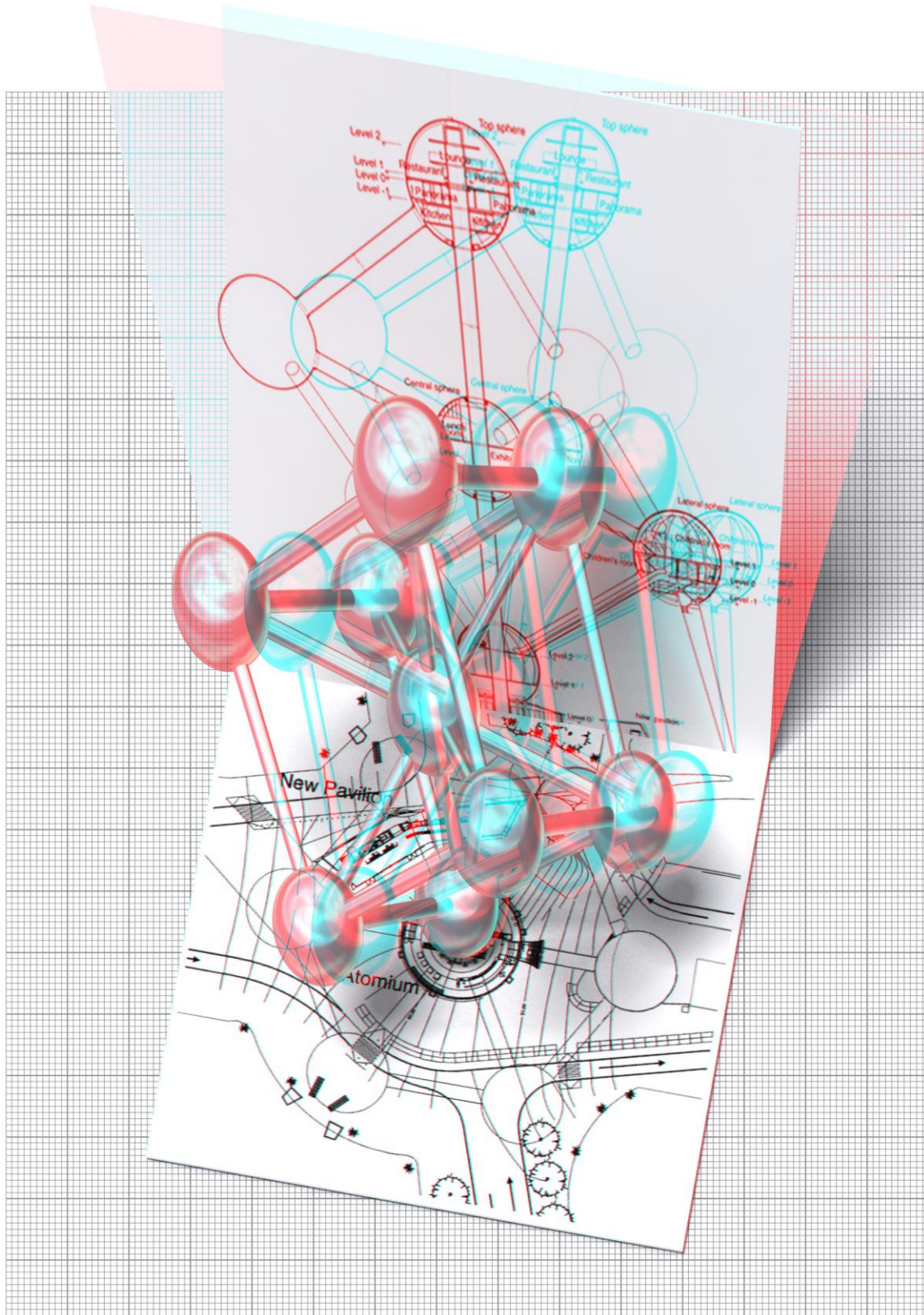


Fig. 18.11. Atomium de Bruselas de André Waterkeyn



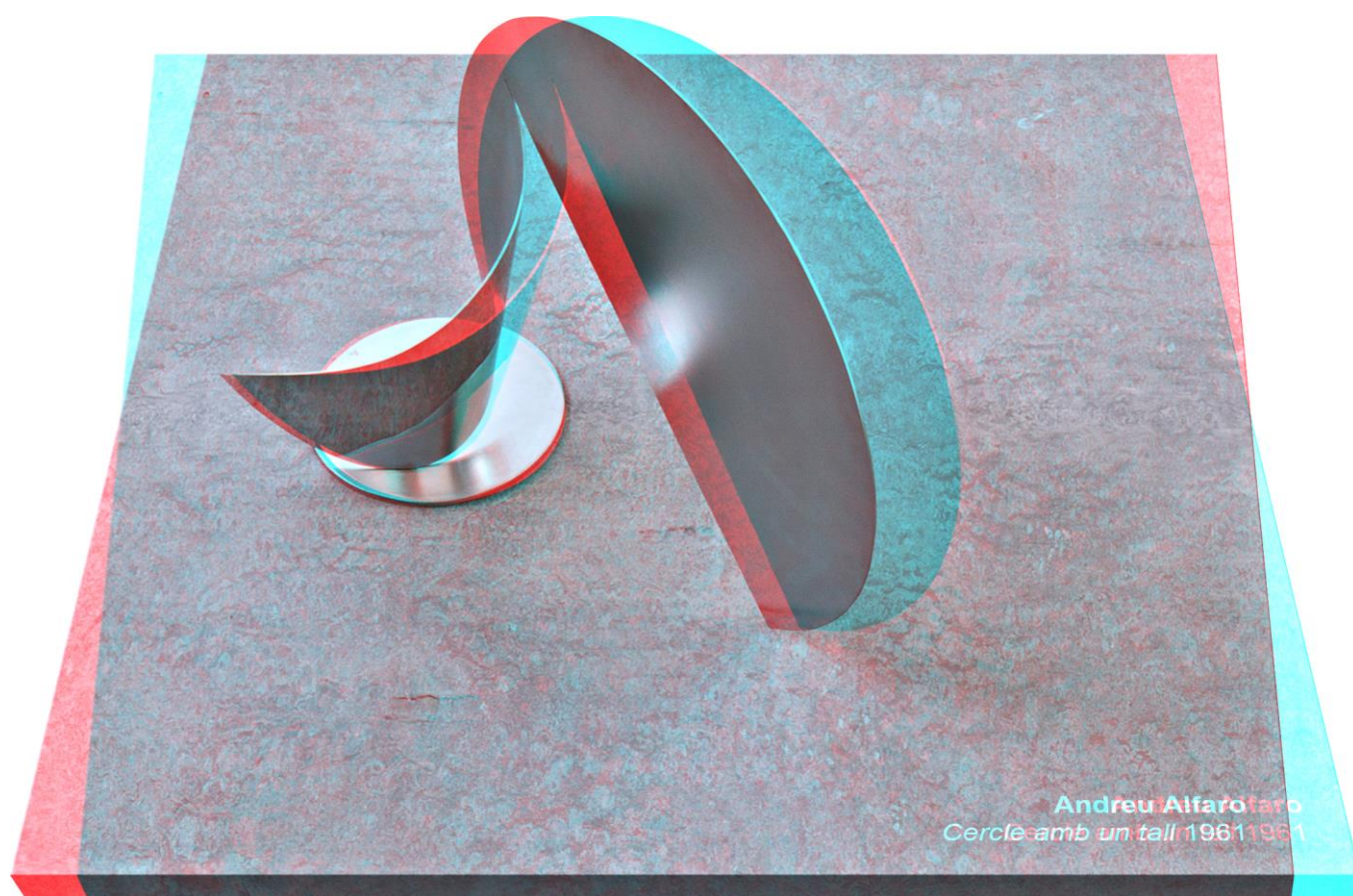


Fig. 18.12. Andreu Alfaro, 1961. *Cercle amb un tall*. Acero inoxidable. 46 x 56 x 25 cm





Fig. 18.13. Andreu Alfaro, 1961. *Cercle amb un tall*. Acero inoxidable. 46 x 56 x 25 cm



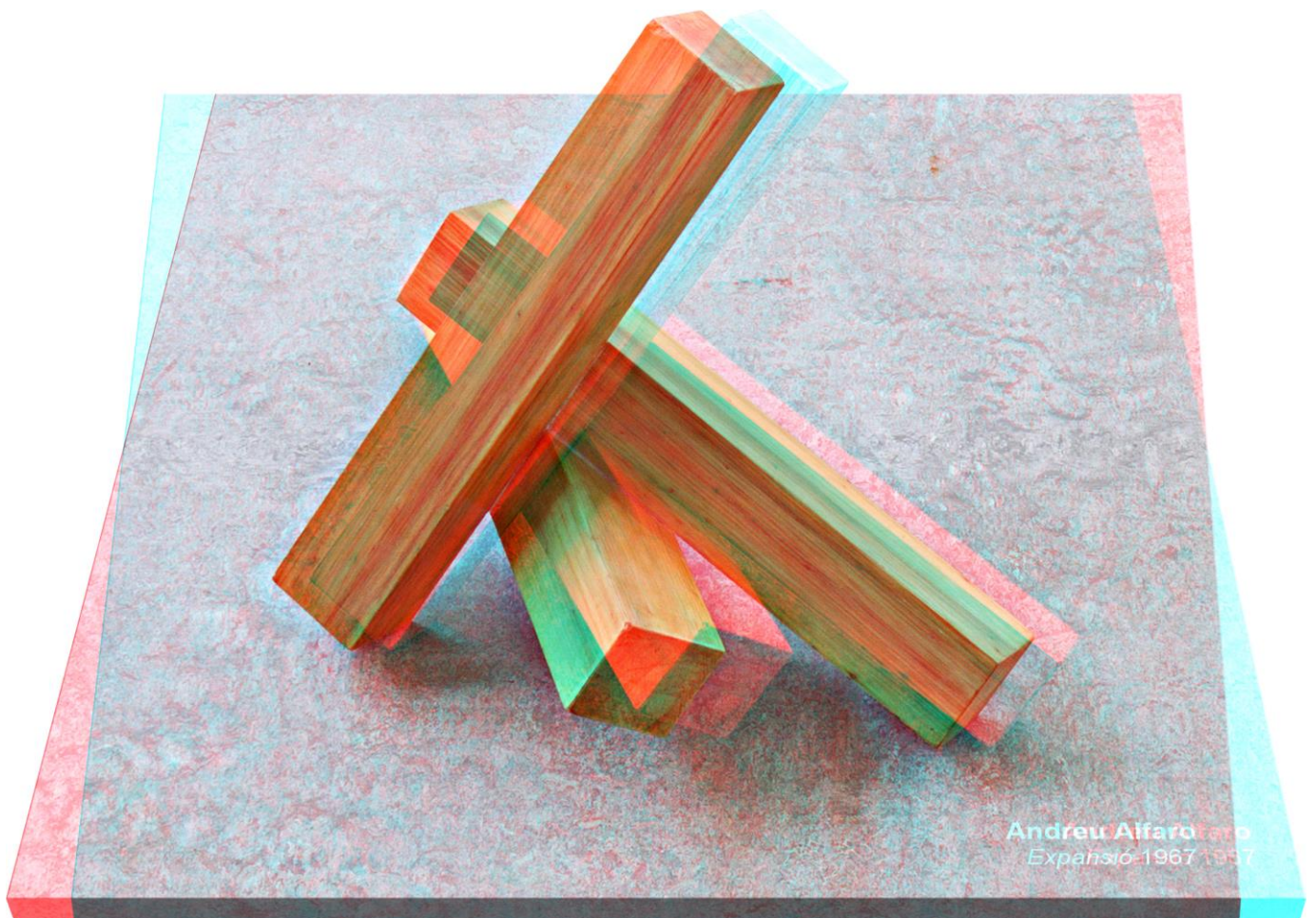


Fig. 18.14. Andreu Alfaro, 1967. *Expansió*. Madera. 38 x 54 x 36 cm





Fig. 18.15. Andreu Alfaro, 1967. *Expansió*. Madera. 38 x 54 x 36 cm



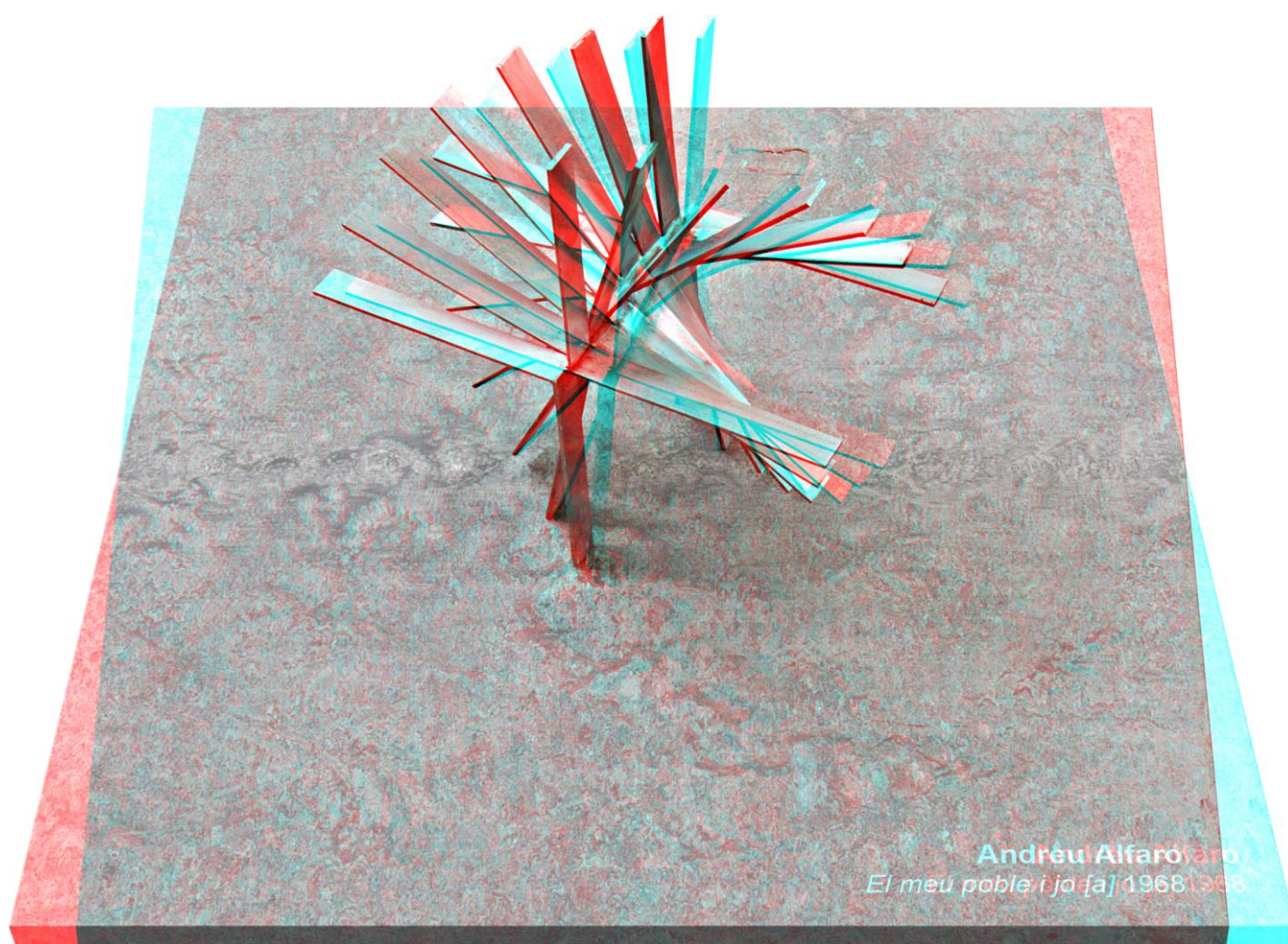


Fig. 18.16. Andreu Alfaro, 1968. *El meu poble i jo*. Acero inoxidable. 31 x 31 x 16 cm



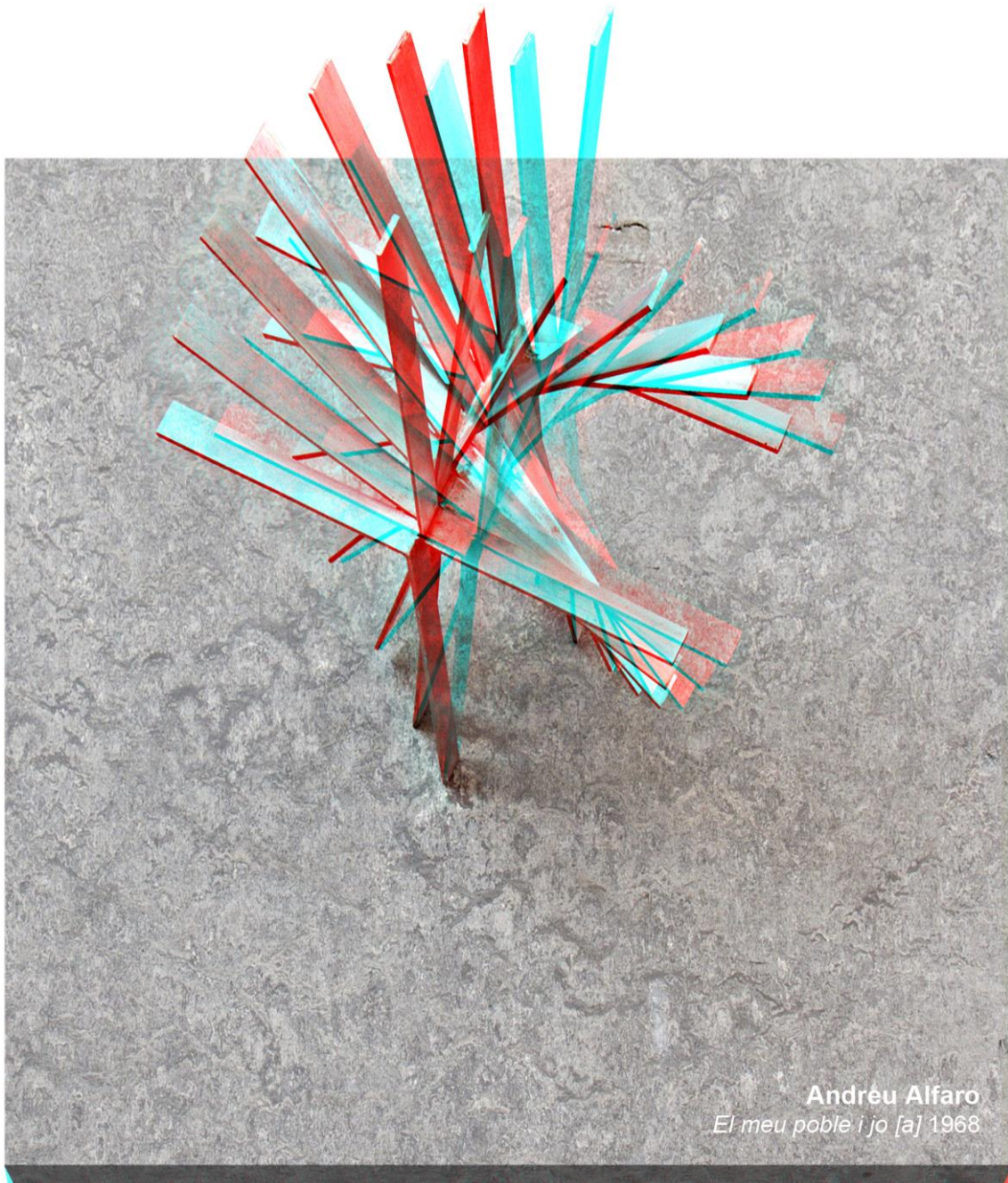


Fig. 18.17. Andreu Alfaro, 1968. *El meu poble i jo*. Acero inoxidable. 31 x 31 x 16 cm



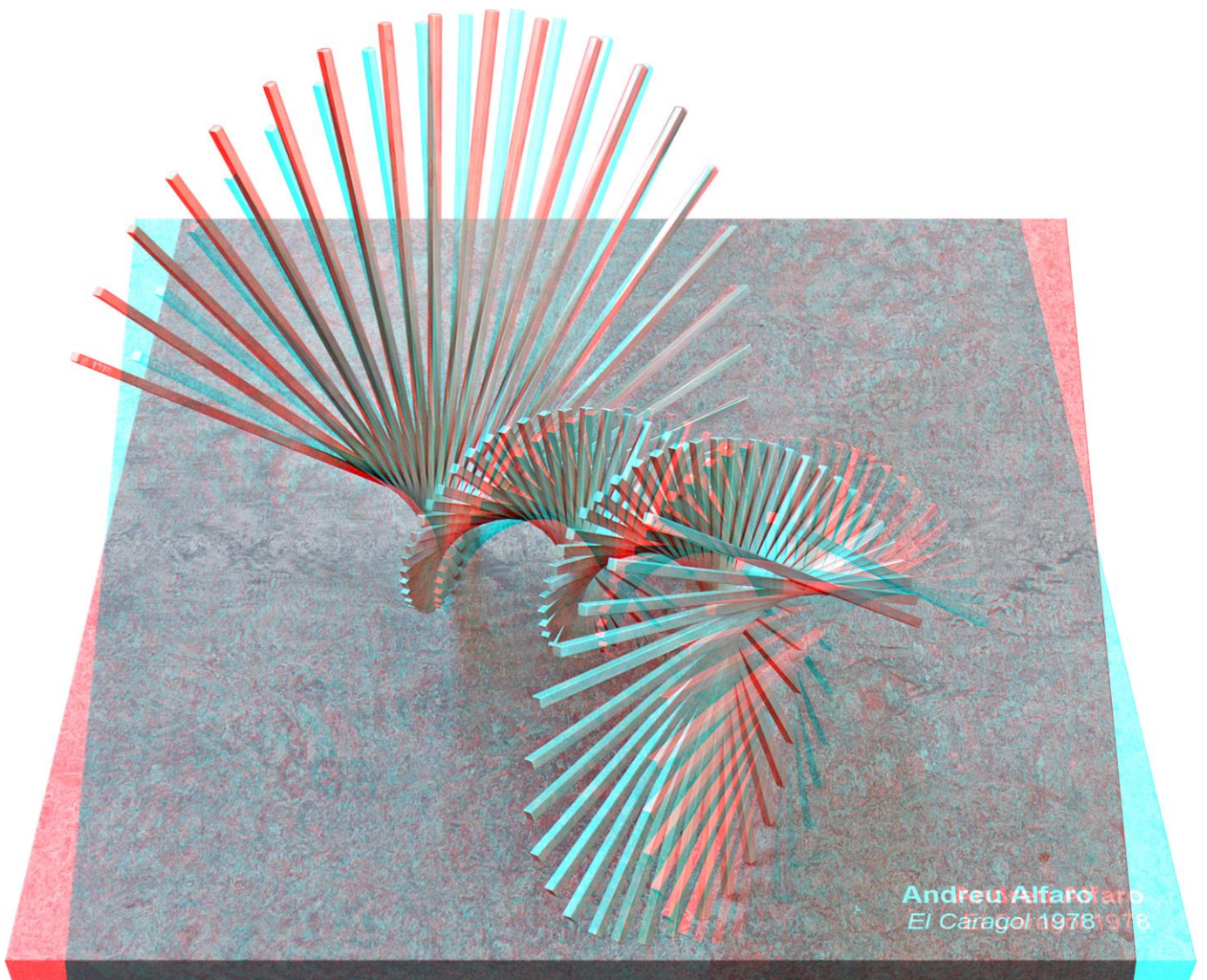


Fig. 18.18. Andreu Alfaro, 1978. *El caracol*. Acero inoxidable. 27 x 38 x 38 cm



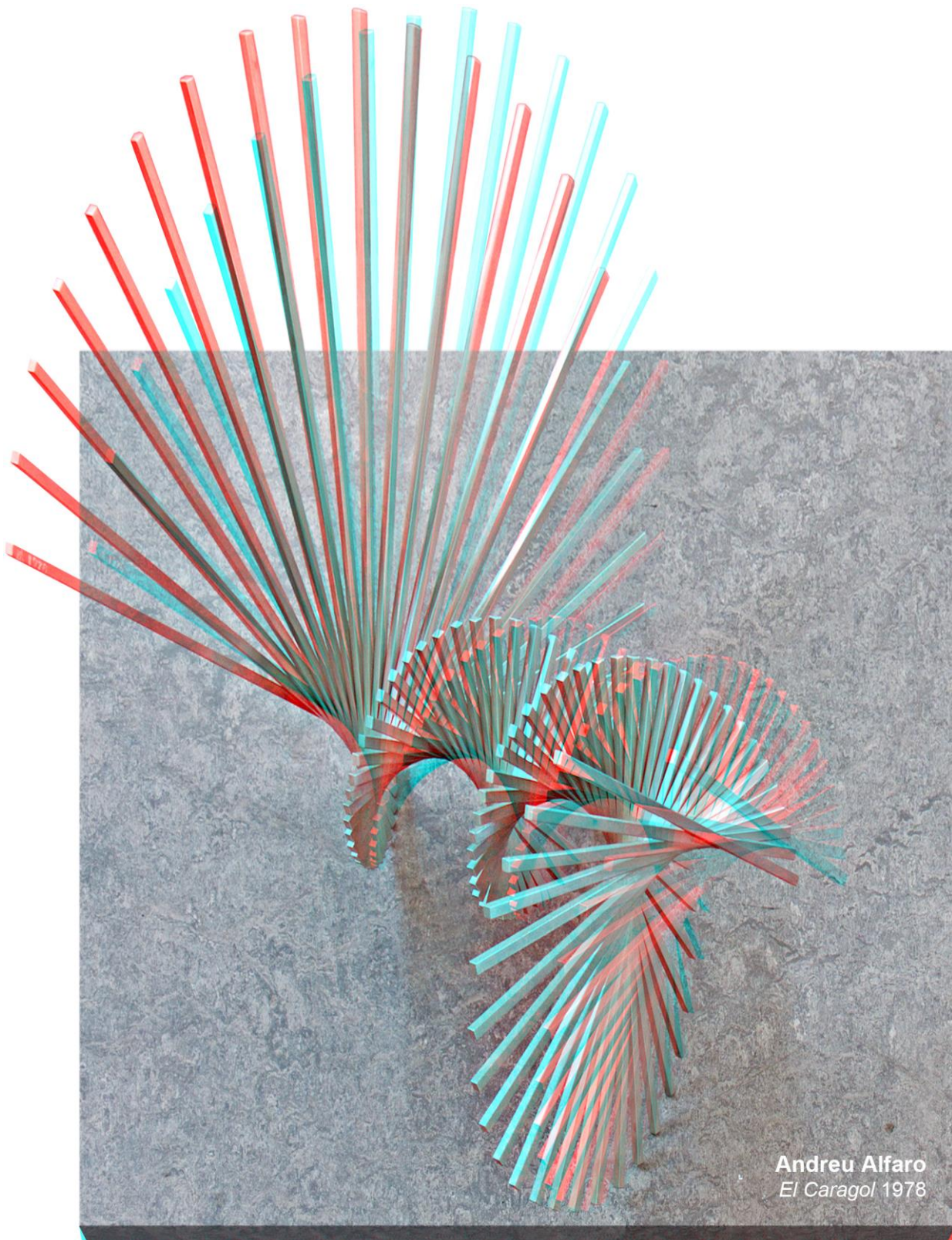


Fig. 18.19. Andreu Alfaro, 1978. *El caracol*. Acero inoxidable. 27 x 38 x 38 cm



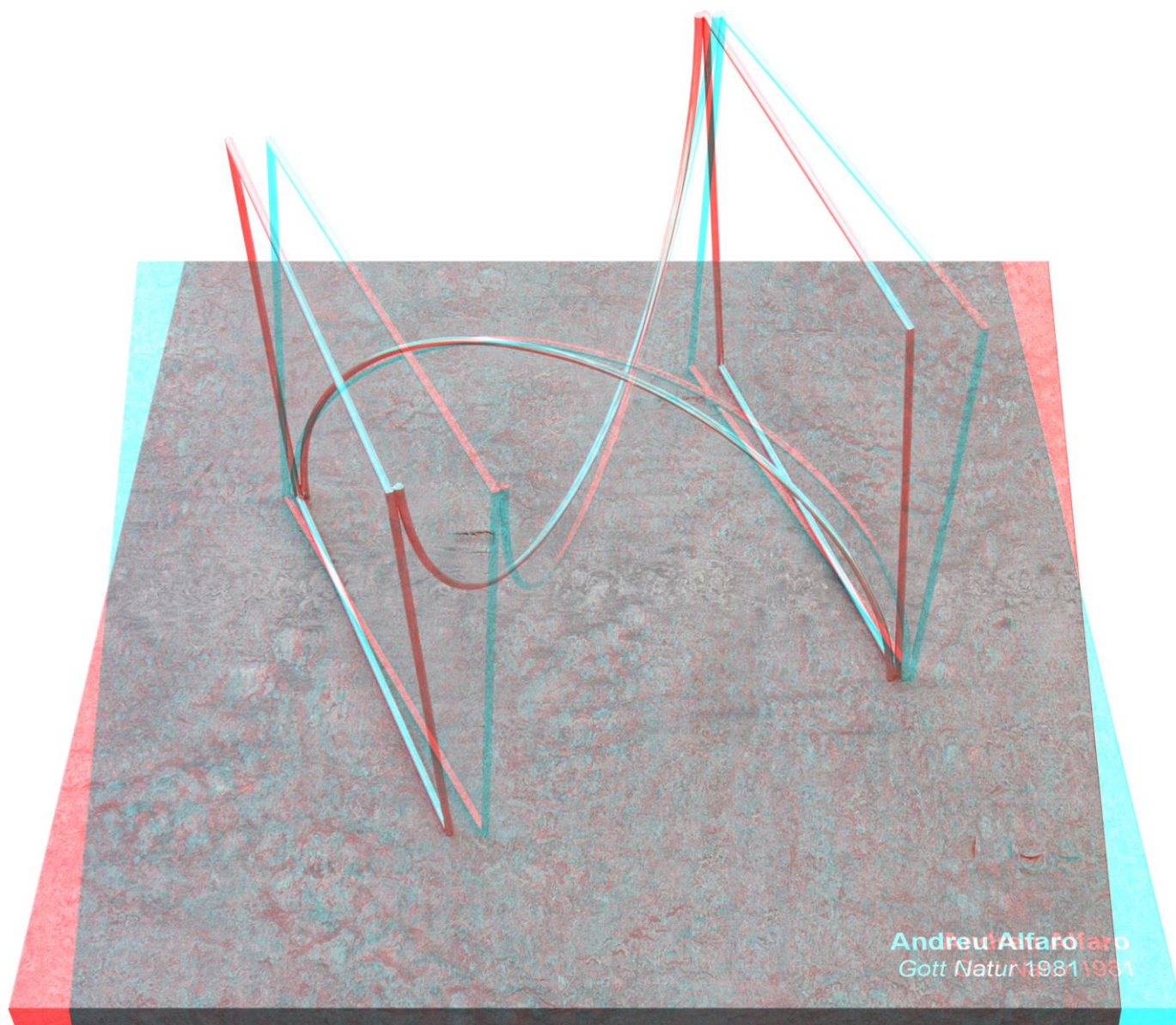


Fig. 18.20. Andreu Alfaro, 1981. *Gott Natur*. Acero inoxidable. 40 x 40 x 40 cm



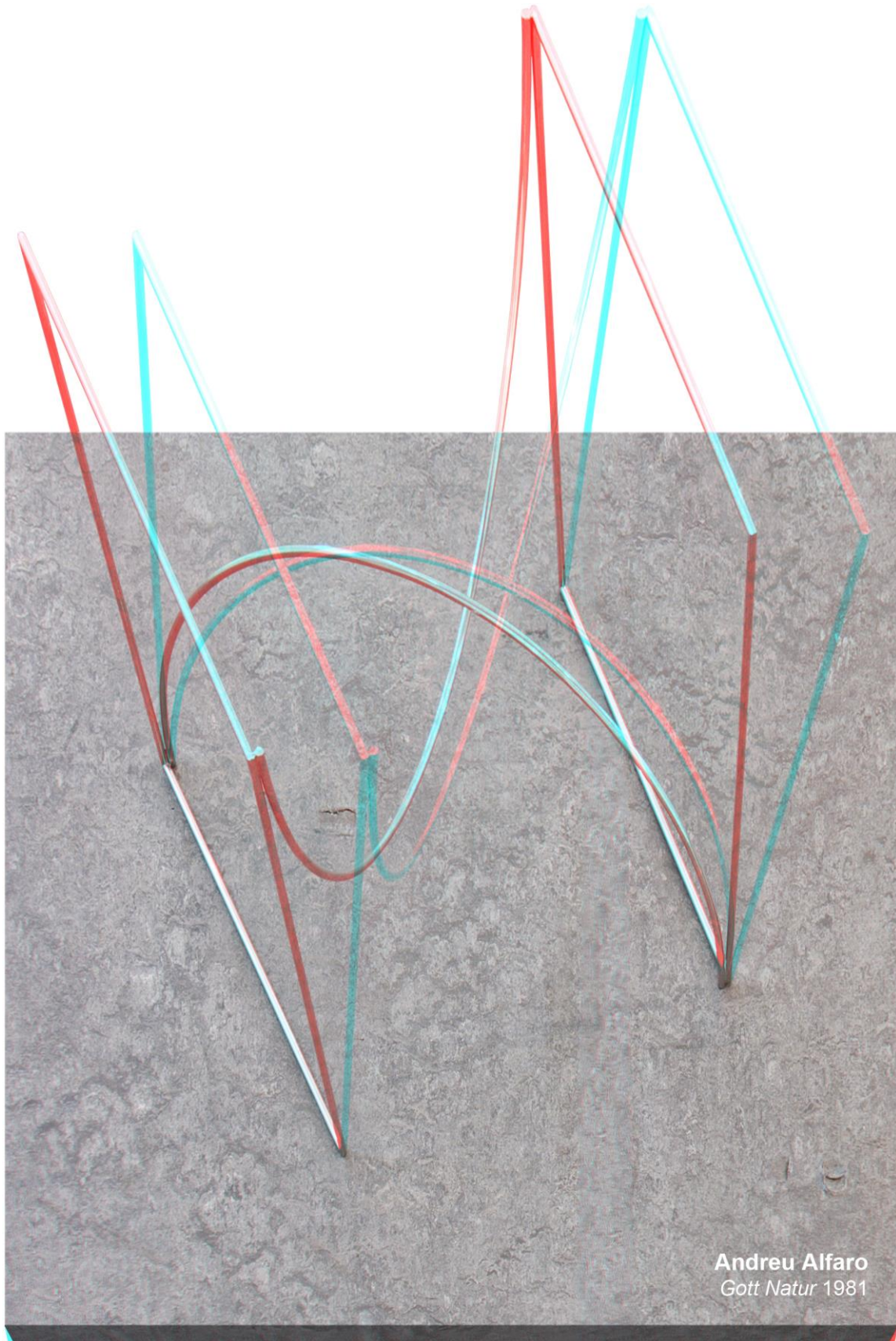


Fig. 18.21. Andreu Alfaro, 1981. *Gott Natur*. Acero inoxidable. 40 x 40 x 40 cm



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR GUTIÉRREZ, A., 1993. *Aplicación de la Estereoscopia en la Representación Gráfica*.
- AGUILLON, F.D., 1613. *Opticorum Libri Sex*.
- ALBERTI, L.B., 1435. *De Pictura*.
- ALBERTZ, J., 2002. Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **34**, pp. 19-25.
- BALTRUSAITIS, J., 1969. *Anamorphoses ou magie artificielle des effets merveilleux*. Paris: Olivier Perrin.
- BARBARO, D., 1568-1569. *La pratica della prospettiva*. Venecia.
- BARLOW, H.B., BLAKEMORE, C. & PETTIGREW, J.D., 1967. The neural mechanism of binocular depth discrimination. *The Journal of physiology*, **193**(2), pp. 327.
- BATTISTI, E., 1976. *Filippo Brunelleschi*. Electa editrice.
- BEARE, J.I., 1906. *Greek Theories of Elementary Cognition: From Alcmaeon to Aristotle*. Clarendon Press.
- BEMAN, W.W., 1913. *The American Mathematical Monthly*, **20**(7), pp. p. 229.
- BERGUA, A., 1999. *A stereoscopic atlas of the nervous system by Santiago Ramón y Cajal*. Science Stereobook edition.
- BERTHIER, A., 1896. Images stéréoscopiques de grand format. *Cosmos Revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des sciences*, **34**, pp. 227-233-205-210.
- BLANCHÈRE, H.D.L., 1862. *Monographie du stéréoscope et des épreuves stéréoscopiques*. Paris: Amyot.
- BORDINI, S., 1984. Storia del panorama. La visione totale nella pittura del XIX secolo.
- BREWSTER, D., 1856. *The stereoscope: Its history, theory & construction*.
- BREWSTER, D., 1851. II. Description of several new & simple stereoscopes for exhibiting, as solids, one or more representations of them on a plane. *Transactions of the Royal Scottish Society of Arts*, **3**, pp. 247-259.
- BREWSTER, D., 1849. Account of a binocular camera, & of a method of obtaining drawings of full length or colossal statues, & of living bodies, which can be exhibited as solids by the stereoscope. *Journal of the Franklin Institute*, **48**(2), pp. 159-160.
- BREWSTER, D., 1849. Description of a binocular camera. *Report of the British Association for the Advancement of Science. Transactions of the Sections*, **5**.
- BROWN, T., 1903. *Stereoscopic phenomena of light & sight*. Gutenberg Press.
- BUNIM, M.S., 1940. *Space in medieval painting & the forerunners of perspective*. Columbia University Press.
- BURTON, H.E., 1945. The optics of Euclid. *JOSA*, **35**(5), pp. 357-372.

- CABEZOS BERNAL, P.M. & CISNEROS VIVÓ, J.J., 2012. Fotogrametría con cámaras digitales convencionales y software libre. *EGA.Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 20, pp. 88-99.
- CABEZOS BERNAL, P.M. & CISNEROS VIVÓ, J.J., 2012. Stereoscopic Images in Education. *Disegnare, idee immagini-ideas images*, 43, pp. 44-55.
- CABEZOS BERNAL, P.M., CISNEROS VIVÓ, J.J. & SOLER SANZ, F., 2014. Anamorfosis, su historia y evolución. *EGA.Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 23, pp. 148-161.
- CANCER MATINERO, J.R., 2011. *Col·lecció Díaz Prósper, patrimoni i memòria : fotografies 1839-1900*. Valencia: Valencia : Universitat de València.
- CANCER MATINERO, J.R., 2006. *Retratistas fotógrafos en Valencia : (1840-1900)*. Valencia: Valencia : Institució Alfons el Magnànim.
- CANCER MATINERO, J.R., 2004. *Fotógrafo Peydró : una mirada personal*. Valencia]: Valencia : Ajuntament de València.
- CASAGRANDE, V.A. & NORTON, T.T., 1991. Lateral geniculate nucleus: a review of its physiology & function. *The neural basis of visual function*, 4, pp. 41-84.
- CASTILLO, J.M., 2012. *La composición de la Imagen. Del Renacimiento al 3D*. Editorial Paraninfo.
- CAZES, L., 1895. *Stéréoscopie de précision. Théorie et pratique*. Paris, Michelet, .
- CHUECA PAZO, M., GARCÍA GARCÍA, F., JIMÉNEZ MARTÍNEZ, M.J. & VILLAR CANO, M., 2008. *Compendio de historia de la ingeniería cartográfica*. Valencia: Editorial UPV.
- CLARK, B., 2010-last update, 3D Production & Post. Available: http://www.panasonic.com/business/provideo/includes/pdf/3D_Production_Post_whitepaper.pdf2014].
- CLAUDET, A., 1853. *Du stéréoscope et de ses applications à la photographie*. Paris: Lerebours et Secretan.
- CLAUDET, A., 1852. Lettre de M. Claudet. *Cosmos Revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des sciences*, 3.
- COLARDEAU, E., *Traité général de stéréoscopie*. Paris : (fr): J. de Francia,.
- COUSIN, J., 1560. *Livre de perspective*.
- CUTTING, J.E., VISHTON, P.M. & BRAREN, P.A., 1995. How we avoid collisions with stationary & moving objects. *Psychological review*, 102(4), pp. 627.
- DA VINCI, L., 1651. *Trattato della pittura*.
- DARRAH, W.C., 1977. *The world of stereographs*. Land Yacht.
- DAY, R.H., 1989. Images, depth cues, & cross-cultural differences in perception. *Behavioral & Brain Sciences*, 12(01), pp. 78-79.
- DELLA FRANCESCA, P., 1475. *De prospectiva pingendi*.
- DELUCIA, P.R. & HOCHBERG, J., 1991. Geometrical illusions in solid objects under ordinary viewing conditions. *Perception & psychophysics*, 50(6), pp. 547-554.

- DENIA RÍOS, J.L., 2011. *Epipolarización de un par fotogramétrico, sin parámetros de orientación interior*. Lugo: Escuela Politécnica Superior de Lugo.
- DÍAZ-AGUADO Y MARTÍNEZ & CÉSAR, 2003. La fotografía de obras públicas de Laurent y Cia. en la comunidad valenciana. *Las fotografías Valencianas de J. Laurent*. Ayuntamiento de Valencia, pp. 61.
- DODGSON, N.A., 2004. Variation & extrema of human interpupillary distance, *Proceedings of SPIE 2004*, pp. 36-46.
- DONDERS, F.C. & MOORE, W.D., 1864. *On the anomalies of accommodation & refraction of the eye: With a preliminary essay on physiological dioptrics*. The New Sydenham Society.
- DROUIN, F., 1894. *Le Stéréoscope: et la photographie stéréoscopique*. C. Mendel.
- DUBOIS, E., 2001. A projection method to generate anaglyph stereo images, *Acoustics, Speech, & Signal Processing, 2001. Proceedings.(ICASSP'01). 2001 IEEE International Conference on 2001*, IEEE, pp. 1661-1664.
- DUCERCEAU, J.A., 1576. *Leçons de perspective*.
- DUCOS DU HAURON, L., 1897. *La triplice photographique des couleurs et l'imprimerie*. París: Gauthier-Villars et fils.
- DUFAUX, F., PESQUET-POPESCU, B. & CAGNAZZO, M., 2013. *Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission & Rendering*. John Wiley & Sons.
- DUKE-ELDER, S., 1961. *System of Ophthalmology: Anatomy of the visual system*. H. Kimpton.
- DURERO, A., 1525. *Underweysung der Messung mit dem Zyrkel und Richtscheyt*.
- ELLIOT, J., 1852. The stereoscope. *London, Edinburgh & Dublin Philosophical Magazine & Journal of Science*, **3**, pp. 397.
- EMMER, M., 1996. Architecture & mathematics: Soap bubbles & soap films. *Nexus: Architecture & Mathematics*, , pp. 53-65.
- EMOTO, M., NIIDA, T. & OKANO, F., 2005. Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic television. *Display Technology, Journal of*, **1**(2), pp. 328-340.
- ESTEVAN CLAVILLAR, J., 1935. Anaglifos en negro. *Memorial de ingenieros del ejército*, **3**, pp. 111-118.
- Estevan Clavillar J. Anáglifos en negro vistos con estereóscopo sin lentes. Madrid: Gráficas Ruiz Ferry; 1935.
- FAIRMAN, H.S., BRILL, M.H. & HEMMENDINGER, H., 1997. How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data. *Color Research & Application*, **22**(1), pp. 11-23.
- FALLACARA, G. & PARISI, N., 2004. *Querelle di paternità. La Galleria Spada tra il Borromini e il Bitonti*. *Studi Bitontini*, **77**, pp. 37-61.
- FANGI, G., 2009. Further Developments of the Spherical Photogrammetry for Cultural Heritage—, *XXII Cipa Symposium, Kyoto 2009*, pp. 11-15.
- FERNÁNDEZ RIVERO, J.A., 2011. Los fotógrafos Lamy y Andrieu. In: AAVV, ed, *Una imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*. Fundación Mapfre, pp. 81.

- FERNÁNDEZ RIVERO, J.A., 2004. *Tres dimensiones en la historia de la fotografía : la imagen estereoscópica*. Málaga: Miramar.
- FERNÁNDEZ SORA, A., 1988. *Aportación metodológica generalizada para la construcción de Anaglifos*.
- FIGUIER, L., 1867. *Los grandes inventos antiguos y modernos en las ciencias, la industria y las artes*. Gaspar, Editores.
- FIGUIER, L., 1867. *Les merveilles de la science ou Description populaire des inventions modernes*. París: Librairie Furne.
- FONTANELLA, L., 1981. *La historia de la fotografía en España desde sus orígenes hasta 1900*.
- FONTANELLA, L., KURTZ, G., 1996. *Charles Clifford: fotógrafo de la España de Isabel II*. Madrid: El Viso.
- FRANCO TABOADA, J.A., 2011. *Geometría descriptiva para la representación arquitectónica*. Santiago de Compostela: Andavira
- FRENCH, J.W., 1921. The interocular distance. *Transactions of the Optical Society*, **23**(1), pp. 44.
- GALLI BIBIENA, F., 1711. *L'Architettura civile, preparata su la geometria e ridotta alle prospettive*. Parma.
- GÁMIZ GORDO, A., 2004. Paisajes urbanos sobre fotos de Clifford hacia 1853-55. *Revista EGA*, (9), pp. 111.
- GARCÍA HIDALGO, J., 1691. *Principios para estudiar el nobilísimo y real arte de la pintura....* Madrid: .
- GARÓFANO SÁNCHEZ, R., 2002. *Andaluces y marroquíes en la colección fotográfica Lévy (1888-1889)*. Cádiz: Diputación de Cádiz.
- GARÓFANO SÁNCHEZ, R., 2002. *Andaluces y marroquíes en la colección fotográfica Lévy (1888-1889)*.
- GARÓFANO, R., 2011. Fundamentos y desarrollo de la fotografía estereoscópica. *Una imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*. Fundación Mapfre, pp. 23.
- GAUTHIER, I., TARR, M.J., ANDERSON, A.W., SKUDLARSKI, P. & GORE, J.C., 1999. Activation of the middle fusiform face area increases with expertise in recognizing novel objects. *Nature neuroscience*, **2**(6), pp. 568-573.
- GEHARDT, W., 1899. Das Auerlieht in der Mikrophotographie mit besonderer Berücksichtigung der gebräunlichen Präparatfärbungen. *Photographische Rundschau*, , pp. 43.
- GERNSHEIM, H., 1988. *The rise of photography, 1850-1880*. Thames & Hudson.
- GIBSON, J.J., 1950. *The perception of the visual world*. .
- GLIOZZI, G. & GLIOZZI, M., 1929. *Elementi di geometria*. Turín: Società Editrice Internazionale.
- GLIOZZI, G. & GLIOZZI, M., 1929. *Geometria elementare*. Turín: Società Editrice Internazionale.
- GLIOZZI, G. & GLIOZZI, M., 1929. *Tavole di Anaglifi Geometrici per le scuole medie inferiori*. Turín: Società Editrice Internazionale.
- GOLDSTEIN, E.B., 1988. *Sensación y percepción*. Madrid: Debate.
- GOLDSTEIN, E., 2009. *Sensación y percepción*. Madrid: Thomson.

- GONZALEZ GARCÍA, A., 1986. *Tratado de pintura*. Madrid: Madrid : Akal.
- GONZÁLEZ, F., JUSTO, M., PÉREZ, R. & DURÁN, Y., 2000. Los estereogramas de puntos al azar, la oftalmología y Ramon y Cajal. *Archivos-Sociedad Espanola De Oftalmología*, **75**(12), pp. 843-844.
- GRAF, U., 1941. Konstruierte Anaglyphen'. *Bildmessung und Luftbildwesen*, **16**(2), pp. 59-66.
- GRAF, U., 1940. Anaglyphen aus parallelprojizierten Teilbildern. *Deutsch. Mathematik*, **5**, pp. 317.
- GRAF, U., 1939. Anaglyphenbilder als Affin- und Projektivmodelle. *Ebend*, **4**, pp. 432.
- GRAF, U., 1938. Anaglyphenbilder und Reliefperspektive. *Deutsch. Mathematik*, **3**, pp. 438.
- GRAF, U., 1938. Sphärische Geometrie, Trigonometrie der Ebene und Kartenentwürfe. *Leipzig: Quelle & Meyer (in German)*.(1941), "Konstruierte Anaglyphen," *Bildmessung und Luftbildwesen*, **16**, pp. 59-66.
- GREENSLADE, T.B., 1972. The first stereoscopic pictures of the Moon. *American Journal of Physics*, **40**(4), pp. 536-540.
- GREGORY, R.L. & VALTUEÑA, J., 1965. Ojo y cerebro: psicología de la visión. Guadarrama
- GREGORY, R.L., 1997. Knowledge in perception & illusion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.Series B: Biological Sciences*, **352**(1358), pp. 1121-1127.
- GREGORY, R.L., 1973. *Illusion in nature & art*. Londres: Gerald Duckworth & Company.
- GREGORY, R.L. & HEARD, P., 1979. Border locking & the Café Wall illusion. *Perception*, **8**(4), pp. 365-380.
- GUESDON, A., ca.1855. *L'Espagne a vol d'oiseau*. París: Hauser y Delarue.
- HAAS, R. & DUNLOP, B., 2001. *The city is my canvas*. Munich: Prestel.
- HANNAVY, J., 2013. *Encyclopedia of nineteenth-century photography*. Routledge.
- HARTLINE, H.K. & GRAHAM, C.H., 1932. Nerve impulses from single receptors in the eye. *Journal of Cellular & Comparative Physiology*, **1**(2), pp. 277-295.
- HAYES, R., 1989. *3-D movies: a history & filmography of stereoscopic cinema*. McFarland Jefferson.
- HERNÁNDEZ LATAS, J.A., 2013. Instantaneidad y estereoscopía: el viaje fotográfico a través de España de la compañía parisina J. Lévy et Cie, a finales del siglo XIX. *Revista Arte y Ciudad*, (3.1), pp. 31-58.
- HERNÁNDEZ LATAS, J.A., 2009. Zaragoza en la fotografía estereoscópica de principios del siglo XX: «El Turismo Práctico», *La ciudad de Zaragoza de 1908 a 2008* 2009, Instituto " Fernando El Católico", pp. 509-522.
- HERNÁNDEZ LATAS, J.A., 2005. Viajes fotográficos o «manía fotográfico-turística» de Santiago Ramón y Cajal. *Quórum.Revista de pensamiento iberoamericano*, (11), pp. 13-21.
- HERNÁNDEZ LATAS, J.A., 2000. Viajes fotográficos de Santiago Ramón y Cajal. Zaragoza: Cortes de Aragón.
- HERNÁNDEZ LATAS, J.A., 2012. *Zaragoza en la mirada ajena*. Zaragoza: Cortes de Aragón.
- Herrera Oria F. Album de anaglifos geométricos para el estudio de la geometría métrica en el espacio. Madrid: Blas y cia; 1920.

- HERSCHEL, J.F.W., 1872. *Outlines of astronomy*. New York: Appleton.
- HERVÁS LEÓN, M., 2005. La serie de vistas estereoscópicas de España de J. Andrieu y un paseo por el Madrid de 1867. *Archivo español de arte*, **78**(312), pp. 381-396.
- HIRUMA, N. & FUKUDA, T., 1993. Accommodation response to binocular stereoscopic TV images & their viewing conditions. *SMPTE journal*, **102**(12), pp. 1137-1140.
- HOFFMAN, D.M., GIRSHICK, A.R., AKELEY, K. & BANKS, M.S., 2008. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance & cause visual fatigue. *Journal of vision*, **8**(3), pp. 33.1-3330.
- HOWARD, I.P. & ROGERS, B.J., 2012. *Perceiving in Depth*. Oxford University Press.
- HOWARD, I.P. & ROGERS, B.J., 1995. *Binocular vision & stereopsis*. Oxford University Press.
- HUBEL, D.H., 1982. Exploration of the primary visual cortex, 1955–78. *Nature*, **299**(5883), pp. 515-524.
- HUBEL, D.H. & WIESEL, T.N., 1962. Receptive fields, binocular interaction & functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of physiology*, **160**(1), pp. 106.
- HUBEL, D.H. & WIESEL, T.N., 1961. Integrative action in the cat's lateral geniculate body. *The Journal of physiology*, **155**(2), pp. 385-398.
- HUGUET CHANZÁ, J., 1996. *Valencia en 1888*. Ayuntamiento de Valencia.
- HUGUET CHANZÁ, J., ALEIXANDRE, J. & MERITA, J., 1992. *Memoria de la luz: fotografía en la Comunidad Valenciana, 1839-1939*. Valencia: Generalitat Valenciana.
- HUGUET CHANZÁ, J., 1990. *Historia de la fotografía valenciana*. Valencia: Levante-El Mercantil Valenciano.
- HUGUET, C., 2003. *Las fotografías Valencianas de J. Laurent*. Ayuntamiento de Valencia.
- HUMPHREY, A.L. & SAUL, A.B., 1994. The temporal transformation of retinal signals in the lateral geniculate nucleus of the cat: Implications for cortical function. *Thalamic networks for relay & modulation*, , pp. 81-89.
- HYMAN, I., 1974. *Brunelleschi in perspective*. Prentice Hall.
- IAN, S., 2013. Good, Frank Mason (1839-1929). In: J. HANNAVY, ed, *Encyclopedia of Nineteenth-Century Photography*. Nueva York: Routledge, pp. 1000.
- IVES, F.E., 1903. *Parallax stereogram & process of making same*. US Patent 725,567 edn. Estados Unidos: .
- IVES, F.E., 1902. A novel stereogram. *Journal of the Franklin Institute*, **153**(1), pp. 51-52.
- IVES, H.E., 1930. Parallax panoramagrams made with a large diameter lens. *JOSA*, **20**(6), pp. 332-340.
- JULIÁ, J.E., 2000. *Las Transiciones en la Fotogrametría, 2000*.
- KANIZSA, G., 1979. *Organization in vision: Essays on Gestalt perception*. Praeger New York.
- KITAOKA, A., 2003. Phenomenal characteristics of the peripheral drift illusion. *Vision*, **15**, pp. 261-262.
- KÖHLER, O., GRAF, U. & CALOV, C., 1938. *Mathematische Raumbilder*. 2. Aufl. 24 plastoreoskopdrucke edn. Berlin : (deu): Plastoreoskop,.

KRAUTHEIMER, R., 1982. Ghiberti.

KUFFLER, S.W., 1952. Neurons in the retina: organization, inhibition & excitation problems, *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 1952, Cold Spring Harbor Laboratory Press, pp. 281-292.

KUZE, J. & UKAI, K., 2008. Subjective evaluation of visual fatigue caused by motion images. *Displays*, **29**(2), pp. 159-166.

LAMBOOIJ, M., FORTUIN, M., HEYNDERICKX, I. & IJSSELSTEIJN, W., 2009. Visual discomfort & visual fatigue of stereoscopic displays: a review. *Journal of Imaging Science & Technology*, **53**(3), pp. 30201-30201.

LAUSSE DAT, A., 1899. *La métrophotographie*. Gauthier-Villars.

LAYER, H.A., 1979. Stereoscopy: Where Did It Come From? Where Will It Lead? *Exposure*, **17**(3), pp. 34-48.

LEGGAT, R., 1995-last update, A History of photography. Available: <http://www.mpritchard.com/photohistory/>.

LEREBOURS, N., 1853. *Catalogue et prix des instruments d'optique, de physique, de chimie, de mathématiques, d'astronomie et de marine qui se trouvent ou s'exécutent dans les magasins et ateliers de Lerebours et Secretan, Opticiens de SM l'Empereur...* Plon, frères.

LINDBERG, D., 1978. The intromission-extramission controversy in Islamic visual theory: Alkindi versus Avicenna. *Studies in Perception: Interrelations in the History & Philosophy of Science*.

LINDBERG, D., 1976. Theories of vision from Al-Kindi to Kepler. *Chicago: The University of Chicago*.

LITTLE, A.M., 1971. *Roman perspective painting & the ancient stage*. Star Press.

LORENZ, D., 2012. *Fotografie und Raum Beiträge zur Geschichte der Stereoskopie*. Munich: Waxmann.

LOWE, D.G., 2004. *Method & apparatus for identifying scale invariant features in an image & use of same for locating an object in an image*. US Patent 6,711,293 edn. Estados Unidos: .

LYNES, J.A., 1979. Brunelleschi's perspectives reconsidered. *Perception*, **9**(1), pp. 87-99.

MANETTI, A., 1482-1489. *Vita di Filippo Brunelleschi*.

Jules Ainaud. Molt més que un fotògraf al servei de Laurent [homepage on the Internet]. . 2010. Available from: <http://www.girona.cat/sgdap/docs/fj5ix36marti-jep-ainaud.pdf>.

MARTÍN GONZÁLEZ, S., 2007. *Otra forma de ver el sistema diédrico*. Madrid: Pearson Educación.

MAY, B., PELLERIN, D. & FLEMING, P., 2013. *Diableries : stereoscopic adventures in hell*. London Stereoscopic Company.

MAYNÉS, P., 2003. Jean Laurent y el papel leptográfico. *Las fotografías Valencianas de J. Laurent*. Ayuntamiento de Valencia, pp. 37.

MAYO, H., 1833. *Herbert Mayo's Outlines of Human Physiology*, **3**, pp. 288.

MENDIBURU, B., 2011. *3D TV & 3D cinema: tools & processes for creative stereoscopy*. Taylor & Francis.

MENDIBURU, B., 2009. *3D movie making: stereoscopic digital cinema from script to screen*. Taylor & Francis US.

- MENKHOFF, I., 2010. *Optical Illusions: Amazing Deceptive Images-Where Seeing Is Believing*. Parragon Incorporated.
- MEYDENBAUER, A., 1912. *Handbuch der Messbildkunst in Anwendung auf Baudenkmäler-und Reise-Aufnahmen*. Knapp.
- MEYDENBAUER, A., 1867. Ueber die Anwendung der Photographie zur Architektur-und Terrain-Aufnahme. *Zeitschrift für Bauwesen*, **17**, pp. 61-70.
- MIGLIARI, R., 2007. *Sul tema dell'evoluzione delle tecniche di rappresentazione: disegno e metodo sperimentale*. In: F. AVELLA, C. FIORE & M. MILONE, eds, *Designare. Il disegno e le tecniche di rappresentazione nella scuola palermitana*. pp. 24-33.
- MIGLIARI, R., 2005. La prospettiva e Panofsky, Panofsky & Perspective. *Disegnare, idee immagini-ideas images*, **31**, pp. 28-43.
- MIGLIARI, R., 1989. Stereoscopia e anaglifi. *L'omologia e le sue applicazioni alla rappresentazione progettuale e tecnica*. Roma: KAPPA, pp. 537-715.
- MISHKIN, M. & UNGERLEIDER, L.G., 1982. Contribution of striate inputs to the visuospatial functions of parieto-preoccipital cortex in monkeys. *Behavioural brain research*, **6**(1), pp. 57-77.
- MON-WILLIAMS, M. & TRESILIAN, J.R., 1999. Some recent studies on the extraretinal contribution to distance perception. *PERCEPTION-LONDON*, **28**, pp. 167-182.
- MORAL, A., 2011. Captura de la luz y conservación de la memoria: la evolución de los procesos fotográficos (1839-1870). *Una imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*. Fundación Mapfre, pp. 211.
- MUCKE, H., 1970. *Anaglyphen, Raumzeichnungen*. Leipzig: Teubner.
- MUCKE, H. & SIMON, H., 1961. *Anaglyphen zur darstellenden Geometrie: Zweitafelprojektion. Entwurf u. Ausführung d. Raumbilder u. Zeichn.: Helmut Mucke, text, Hans Simon. Raumbilder*. Berlin: Volk u. Wissen.
- MUCKE, H., 1973. *Anaglyphen zur Struktur der Stoffe*. Colonia: Aulis Verlag Deuner.
- MÜNSTERBERG, H., 1897. Die verschobene Schachbrettfigur. *Zeitschrift für Psychologie*, **15**, pp. 184-188.
- MUTTONI, F., 1740-1760. *Architettura di Andrea Palladio Vicentino di nuovo ristampata... con le osservazioni dell'architetto NN*. Venice: .
- NAVARRO DE ZUVILLAGA, J., 1996. *Imágenes de la perspectiva*. Madrid: Siruela.
- NAVAS LABIANO, E., 1977. *Irún en el siglo XX*. San Sebastián: Sociedad Guipuzcoana de Ediciones y Publicaciones.
- NEWHALL, B., 2001. *Historia de la fotografía*. Editorial Gustavo Gili.
- NEWTON, I., 1704. *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light*. Londres: .
- NICERON, J.F., 1638. *Le perspective curieuse....* Paris: .
- NOJIRI, Y., YAMANOUE, H., HANAZATO, A. & OKANO, F., 2003. Measurement of parallax distribution & its application to the analysis of visual comfort for stereoscopic HDTV, *Electronic Imaging 2003* 2003, International Society for Optics & Photonics, pp. 195-205.

- OEHLER, P.R., 2002. *Keystone distortion correction system for use in multimedia projectors*. .
- OGLE, K.N. & PRANGEN, A., 1953. Observations on vertical divergences & hyperphorias. *Archives of Ophthalmology*, **49**(3), pp. 313.
- OSTERBERG, G., 1935. *Topography of the layer of rods & cones in the human retina*. Nyt Nordisk Forlag.
- PÁL, I., 1959. *Terlattatos abrazolo mertan*. Budapest: Muszaki Könyvkiado.
- PÁL, I., MAROSSZÉKI, M. & STARK, H., 1974. *Raumgeometrie in der technischen Praxis*. Akadémiai Kiadó.
- PÁL, I. & MOLEÓN, J.P., 1965. *Geometría descriptiva con figuras estereoscópicas*. Madrid: Aguilar.
- PALOMINO DE CASTRO, ANTONIO ACISCLO, 1715-1724. *El museo pictórico y escala óptica*. Madrid: .
- PANOFSKY, E., 1927. *Die Perspektive als "symbolische Form"*. Teubner.
- PANUM, P.L., 1858. *Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen*. Berlin: Schwers.
- PÈLERIN, J., 1505. *De artificiali perspectiva*.
- PELLERIN, D., 1995. *La photographie stéréoscopique sous le second Empire*. Paris: Biblioteque national de France.
- PERCIVAL, A.S., 1892. The relation of convergence to accommodation & its practical bearing. *Ophthalmological Review*, **11**, pp. 313-328.
- PERREGAUX, C. & WEBER, A., 1914. *Die plastische Darstellung im Gebiete der Geometrie mittels der Complementärfarben*. Biel: Magron.
- PIAZZI SMYTH, C., 1859. *Report on the Tenerife Expedition of 1856*. Londres: Royal Society.
- PIAZZI SMYTH, C., 1858. *Teneriffe, an astronomer's experiment*. Londres: Lovell Reeve.
- PIERCE, A.H., 1898. The illusion of the kindergarten patterns. *Psychological review*, **5**(3), pp. 233.
- PIÑAR, J., 2011. Una imagen de España. *Una imagen de España. Fotografos estereoscopistas franceses (1856-1867)*. Fundación Mapfre, pp. 9.
- PINNA, B. & BRELSTAFF, G.J., 2000. A new visual illusion of relative motion. *Vision research*, **40**(16), pp. 2091-2096.
- PIRENNE, M.H. & ARENA, L., 1974. *Optica, perspectiva, visión en la pintura, arquitectura y fotografía*. Victor Leru.
- PLATEAU, J., 1873. *Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires*. Gauthier-Villars.
- POLYAK, S.L., 1941. The retina: the anatomy & the histology of the retina in man, ape, & monkey, including the consideration of visual functions, the history of physiological optics, & the histological laboratory technique. .
- PONZO, M., 1910. Intorno ad alcune illusioni nel campo delle sensazioni tattili, sull'illusione di Aristotele e fenomeni analoghi. *Archiv für die gesamte Psychologie*, **16**, pp. 307-345.
- PORTA, G.B.D., 1593. *De Refractione. Optices Parte*.

- POZZO, A., 1693. *Perspectiva pictorum et architectorum*. Roma: .
- QUIRÓS LINARES, F., 1991. *Las ciudades españolas a mediados del siglo XIX : Vistas de ciudades españolas de Alfred Guesdon. Planos de Francisco Coello*. Valladolid: Ambito.
- RAMACHANDRAN, V. & ROGERS-RAMACHANDRAN, D., 2012. Rivalidad Binocular. *Cuadernos Mente y Cerebro*, **3**, pp. 16-19.
- RAMÓN Y CAJAL, S., 1918. *La microfotografía estereoscópica y biplanar del tejido nervioso*.
- RAMÓN Y CAJAL, S., 1910. Obtención de estereofotografías (proceder de Berthier-Ives) con un solo objetivo. *Anales de la Sociedad Española de Física y Química*, **8**, pp. 129.
- RAMÓN Y CAJAL, S., 1901. Recreaciones estereoscópicas y binoculares. *La fotografía*, (2), pp. 40-48.
- RIBES, D., 2007. *La mirada de l'arquitecte: Demetrio Ribes i la seua càmera estereoscòpica*.
- RICE, S., 1999. *Parisian views*. The MIT Press.
- ROBERTS, D.E., 2003. History of lenticular & related autostereoscopic methods. *Leap Technologies.Hillsboro*, , pp. 16.
- ROCK, I., 1984. Perception New York. *Scientific American Library*, , pp. 60.
- RODRIGEZ MOLINA, M.J. & SANCHIS ALFONSO, J.R., 2013. *Directorio de Fotógrafos en España (1851-1936)*. Valencia: Archivo General y Fotográfico de la Diputación de Valencia.
- ROLLMANN, W., 1853. Notiz zur Stereoskopie. *Annalen der Physik*, **165**(6), pp. 350-351.
- ROLLMANN, W., 1853. Zwei neue stereoskopische Methoden. *Annalen der Physik*, **166**(9), pp. 186-187.
- ROLLS, E.T. & TOVEE, M.J., 1995. Sparseness of the neuronal representation of stimuli in the primate temporal visual cortex. *Journal of neurophysiology*, **73**(2), pp. 713-726.
- RULE, J.T., 1938. Stereoscopic Drawings. *J.Opt.Soc.Am*, **28**, pp. 313-322.
- SABRA, A., 1980. Form in ibn al-Haytham's theory of vision. *Zeitschrift für Geschichte der Arabisch-Islamischen Wissenschaften*, **5**, pp. 115-140.
- SÁEZ, J.P., 1969. *Dibujo Técnico con Dibujos Anaglíficos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- SAINZ, J., ORTEGA, J. & RAMÍREZ, J.A., 2005. *El dibujo de arquitectura: teoría e historia de un lenguaje gráfico*. Reverté.
- SÁIZ, B., SANTONJA, A. & MUÑOZ, V., 2010. Realidad Virtual: Aportaciones TIC a la docencia y sus aplicaciones en el desarrollo del proyecto, *XIII Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 27 mayo 2010, UPV.
- SÁNCHEZ GARCÍA, J.J. & FERNÁNDEZ-BARREDO SEVILLA, Y., 2011. Las herramientas de captación y visión estereoscópicas. *Una imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*. Fundación Mapfre, pp. 223.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, C., 2011. Los editores Ferrier-Soulier y Gaudin. *Una imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*. Fundación Mapfre, pp. 61.

SÁNCHEZ GÓMEZ, C. & FERNÁNDEZ RIVERO, J.A., 2011. Joseph Carpentier: Pionero de la fotografía estereoscópica sobre España. *Una imagen de España. Fotógrafos estereoscopistas franceses (1856-1867)*. Fundación Mapfre, pp. 47.

SCHAAF, L., 1980. Piazz Smyth at Tenerife: Part I the expedition & the resulting book. *History of Photography*, **4**(4), pp. 289-307.

SCHILLER, P.H. & MALPELI, J.G., 1977. Properties & tectal projections of monkey retinal ganglion cells. *Journal of neurophysiology*, **40**(2), pp. 428-445.

SCHMIDT, R., 1983. *Geometria descriptiva con figuras estereoscópicas*. Barcelona etc.: Reverté.

SCHMIDT, R., 1977. *Darstellende Geometrie: mit Stereo-Bildern*. Bauverlag.

SCHÖRNER, E., 1977. *Darstellende geometrie: konstruktionsgrundlagen für studium und praxis*. Carl Hanser.

SCHÖRNER, E., 1960. *Der Raumbild-Lehrbuch darstellenden Geometrie für Ingenieurschulen*. Munich: Oldenbourg.

SCHÖRNER, E., 1948. *Mathematische Plastoskop-Modelle: für den Unterricht in der räumlichen und darstellenden Geometrie und in den Grundlagen des technischen Zeichnens*. Mathematische Plastoskop-Gesellschaft Wendt & Company.

SCHWARZ, H.A., 1890. *Gesammelte mathematische abhandlunge*. Berlin: Springer.

SCHWENKEL, D., 1972. Raumllich perspektive Darstellung von Bauwerken durch automatisch gezeichnete Anaglyphenbilder'. *Bildmessung und Luftbildwesen*, **40**(3), pp. 144-147.

SCOLARI, M., 2005. *Il disegno obliquo: una storia dell'antiprospektiva*. Marsilio.

SECKEL, A., 2004. *Masters of Deception: Escher, Dalí & the Artists of Optical Illusion*. Sterling Publishing Company, Inc.

SERLIO, S., 1537-1575. *Tratado de Arquitectura*.

SEY, J.A., 1861. La fotografía puesta al alcance de todos. *Juan Olivares*, .

SHARIF, M.M., 1966. *A history of Muslim Philosophy*. O. Harrassowitz.

SHEARD, C., 1934. The prescription of prisms. *American Journal of Optometry*, **11**(10), pp. 364-378.

SHIBATA, T., KIM, J., HOFFMAN, D.M. & BANKS, M.S., 2011. The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of vision*, **11**(8), pp. 11.

SIRIGATTI, L., 1596. *La pratica di prospettiva*. Venecia: .

SMARDON, R.C., PALMER, J.F. & FELLEMAN, J.P., 1986. *Foundations for visual project analysis*. Wiley New York.

SOLER SANZ, F., 1996. *Perspectiva cónica*. Valencia: Valencia : Universidad Politécnica de Valencia.

SOUGEZ, M., 2006. *Historia general de la fotografía*.

SOUGEZ, M., 1981. *Historia de la fotografía*.

SOUGEZ, M. & PÉREZ GALLARDO, H., 2003. *Diccionario de historia de la fotografía*. Madrid: Cátedra.

- SPERANZA, F., TAM, W.J., RENAUD, R. & HUR, N., 2006. Effect of disparity & motion on visual comfort of stereoscopic images, *Electronic Imaging 2006* 2006, International Society for Optics & Photonics, pp. 60550B-60550B-10.
- SUTHERLAND, I.E., 1968. A head-mounted three dimensional display, *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I* 1968, ACM, pp. 757-764.
- SUTHERLAND, I.E., 1965. The ultimate display. *Multimedia: From Wagner to virtual reality*, .
- TAIBO, A., 1943. *Geometria Descriptiva y sus aplicaciones Tomo II Curvas y Superficies*. Madrid: Blass.
- TALBOT, W.H.F., 1844. *The pencil of nature*. Londres: Longman, Brown, Green & Longmans.
- TALLMADGE, M., 1968. Galen on the Usefulness of the Parts of the Body. De usu partium.
- TAM, W.J., SPERANZA, F., YANO, S., SHIMONO, K. & ONO, H., 2011. Stereoscopic 3D-TV: visual comfort. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, **57**(2), pp. 335-346.
- TAYLOR, J.E., 1976. The structure of singularities in soap-bubble-like & soap-film-like minimal surfaces. *Annals of Mathematics*, **103**, pp. 489–539.
- TEIXIDOR CADENAS, C., 2003. Los fotógrafos de la casa Laurent en tierras valencianas (1858-1870). *Las fotografías Valencianas de J. Laurent*. Ayuntamiento de Valencia, pp. 29.
- Teixidor Cadenas C. La Fotografía en Canarias y Madeira: la época del daguerrotipo, el colodión y la albúmina, 1839-1900. Tenerife: Centro de la Cultura Popular Canaria; 1999.
- TEIXIDOR CADENAS, C., 1999. *La tarjeta postal en España: 1892-1915*. Madrid: Espasa Calpe.
- TEN, A.E., CASTRO SOLER, J. & LOPEZ PIÑERO, J.M., 1997. José Monserrat y Riutort y el primer descubrimiento de la fotografía astronómica: las fotografías del eclipse de sol de 1860. *Archives internationales d'histoire des sciences*, **47**(138), pp. 3-26.
- TÓTH, L.F., 1965. *Reguläre Figuren*. Akadémiai Kiadó.
- VAN BENEDEN, É., 1887. *Nouvelles recherches sur la fécondation et la division mitotique chez l'Ascaride mégalocéphale*. W. Engelmann.
- VASARI, G., 1550. *Le vite de'piu eccellenti architetti, pittori, et scultori italiani, da Cimabue, insino a'tempi nostri, nell'edizione per i tipi di Lorenzo Torrentino*.
- VIGNOLA, G.B.D., 1562. *Le due regole della prospettiva pratica*. Roma.
- VILLANUEVA BARTRINA, L., 1996. *Perspectiva lineal. Su relación con la fotografía*. UPC.
- VILLANUEVA BARTRINA, L., 1994. Arquitectura escenográfica i geometria. *D'art*, (20).
- VILLANUEVA BARTRINA, L., 1990. Los falsos balcones de la Capilla del Pilar en la Catedral de Calahorra. *D'art*, (16).
- VOIGNIER, J.M., 1992. *Les Vues stereoscopiques de Ferrier et Soulier: Catalogue 1851-1870*. Paris: Éditions du Palmier en Zinc.
- VON HELMHOLTZ, H., 1866. *Handbuch der physiologischen Optik: mit 213 in den Text eingedruckten Holzschnitten und 11 Tafeln*. Voss.
- VUIBERT, H., 1912. *Les Anaglyphes Geometriques*, Paris: Librairie Vuibert.

- WADE, N.J., 2012. The ghost of Helioth & his stereoscope: the return of a phantom. *Perception*, **41**(8), pp. 1001.
- WADE, N.J., 2003. The Chimenti controversy. *Perception*, **32**(2), pp. 185-200.
- WADE, N.J., BREWSTER, D. & WHEATSTONE, C., 1983. *Brewster & Wheatstone on vision*. Academic Press.
- WADE, N.J. & ONO, H., 1985. The stereoscopic views of Wheatstone & Brewster. *Psychological research*, **47**(3), pp. 125-133.
- WALLS, G.L., 1953. *The lateral geniculate nucleus & visual histophysiology*. University of California Press.
- WATTS, E.F. & RULE, J.T., 1946. *Descriptive geometry*. New York: Prentice-Hall.
- WHEATSTONE, C., 1852. Contributions to the Physiology of Vision. Part the Second. On Some Remarkable, & Hitherto Unobserved, Phenomena of Binocular Vision (Continued). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **142**, pp. 1-17.
- WHEATSTONE, C., 1838. Contributions to the physiology of vision. Part the first. On some remarkable, & hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **128**, pp. 371-394.
- WILDER, K., 2013. Neyt, Adolphe L. (1830-1892). In: J. HANNAVY, ed, *Encyclopedia of Nineteenth-Century Photography*. Nueva York: Routledge, pp. 1000.
- WING, P., 1996. *Stereoscopes: The First One Hundred Years*. Transition Pub.
- YANO, S., IDE, S., MITSUHASHI, T. & THWAITES, H., 2002. A study of visual fatigue & visual comfort for 3D HDTV/HDTV images. *Displays*, **23**(4), pp. 191-201.
- YEH, Y.Y. & SILVERSTEIN, L.D., 1990. Limits of fusion & depth judgment in stereoscopic color displays. *Human factors*, **32**(1), pp. 45-60.
- ZHANG, L., REN, J., XU, L., QIU, X.J. & JONAS, J.B., 2013. Visual comfort & fatigue when watching three-dimensional displays as measured by eye movement analysis. *The British journal of ophthalmology*, **97**(7), pp. 941-942.
- ZHU, C., ZHAO, Y., YU, L. & TANIMOTO, M., 2012. *3D-TV System with Depth-Image-Based Rendering*. Springer.