

GESTIÓN Y MEDICIÓN DE LA REPRODUCIBILIDAD DEL COLOR EN HOLOGRAMAS DE REFLEXIÓN



NATALITH ANDREA PALACIOS ORTEGA

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Física Aplicada

Asesor:
M.Sc. Daniel Velásquez Prieto

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
MEDELLÍN, COLOMBIA
2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen. A mi madre y hermanas por sus oraciones, enseñanzas de fortaleza y arduo trabajo, a mi padre por su compañía espiritual.

A Daniel Gómez, por su amor, compañía y apoyo incondicional, a toda mi familia Palacios Ortega y Gómez Tejada por la confianza depositada

A mi asesor Daniel Velásquez, por su paciencia, entrega y compartir su conocimiento, a todas las personas que hicieron parte de mi formación como magíster, profesor Luciano Ángel, y todo su grupo de Óptica Aplicada, amigos y compañeros.

ÍNDICE GENERAL

1.	HOLOGRAFÍA	19
1.1.	Holografía a color	19
1.2.	Hologramas de rayo simple.....	21
1.3.	Estereoscopia Holográfica	23
2.	MEDICIÓN DEL COLOR	25
2.1.	Colorimetría	26
2.1.1.	Modelo de color CIE-XYZ.....	26
2.1.2.	Modelo de color CIE-L*a*b*	28
2.1.3.	Diferencia de color.	29
2.2.	Espectrómetros.....	29
2.3.	Cámaras.....	30
2.3.1.	Cámaras para medición de color.	31
2.3.2.	Linealización de cámaras.....	32
2.3.3.	Transformaciones RGB-XYZ.....	33
2.4.	Caracterización de LCDs	34
2.4.1.	Monitores tipo CRT.....	35
2.4.2.	Función Gamma.	36
2.4.3.	Monitores tipo LCD.....	37
2.4.4.	Consideraciones en la caracterización de dispositivos LCD.	39
2.4.5.	Procedimiento de caracterización de un LCD y un CRT.	40
3.	MEDICIÓN DE COLOR EN HOLOGRAMAS	42
3.1.	Estado del arte.....	46
3.2.	Arreglos Experimentales para el registro de hologramas	48

3.2.1.	Registro de hologramas de reflexión a color por medio del método de rayo simple a partir de objetos reales.	48
3.2.2.	Registro de hologramas de reflexión a partir de imagen presentada en LCD.	50
3.3.	Métodos implementados para la medición de color.....	53
3.3.1.	Medición de color con espectrómetro.	54
3.3.2.	Medición de color con cámara.....	57
3.3.3.	Caracterización del LCD con espectrómetro.....	59
3.3.4.	Medición de color en hologramas generados a partir de la presentación de un objeto digitalizado sobre LCD.....	62
4.	RESULTADOS	64
4.1.	Medición de color con espectrómetro sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos físicos.....	67
4.1.1.	Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón	68
4.1.2.	Hologramas reconstruidos con láseres RGB	71
4.2.	Medición de color con espectrómetro sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos presentados en pantalla LCD.....	77
4.2.1.	Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón	78
4.2.2.	Hologramas reconstruidos con láseres RGB	81
4.2.3.	Hologramas reconstruidos con láseres RGB (Pseudocolor).....	84
4.3.	Caracterización del LCD a color con espectrómetro.	87
4.4.	Diversas comparaciones de color con espectrómetro.	93
4.4.1.	Comparación entre coordenadas CIE-L*a*b* de un holograma registrado a partir de un objeto físico Vs. coordenadas del Holograma registrado a partir de un objeto presentado en LCD.	93
4.4.2.	Diferencias de color entre el objeto presentado digitalmente sobre el LCD e iluminado con láseres RGB Vs. las coordenadas CIE-L*a*b* para sus respectivos hologramas reconstruidos con láseres RGB.	95
4.5.	Medición de color con cámara sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos físicos.....	97
4.5.1.	Resultados para Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón.....	98

4.5.2.	Resultados para Hologramas reconstruidos con láseres RGB.....	99
4.5.3.	Resultados para Hologramas reconstruidos con láseres RGB (formato pequeño).....	101
4.6.	Medición de color con cámara sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos digitalizados y presentados en monitor LCD.....	103
4.6.1.	Resultados para Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón.....	103
4.6.2.	Resultados para Hologramas reconstruidos con láseres RGB.....	105
4.6.3.	Hologramas reconstruidos con láseres RGB-Pseudocolor.....	108
4.7.	Caracterización de LCD con cámara.....	110
5.	CONCLUSIONES.....	112
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	116
7.	ANEXOS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del registro multiplexado con tres longitudes de onda en el holograma de reflexión.....	22
Figura 2. Esquema de la reconstrucción de cada una de las longitudes de onda R, G y B en redes de Bragg.	23
Figura 3. Sistema para proyección de imágenes en un difusor utilizando un LCD, para registro sobre película holográfica.....	24
Figura 4. Experimento de Igualación del color.	27
Figura 5. Funciones de igualación del color, CIE 1931, observador a 2°.	27
Figura 6. Diagrama para modelo de color CIE-xy 1932, observador a 2°.	28
Figura 7. Representación de las coordenadas CIE-a*b* bajo una misma coordenada L*	29
Figura 8. Esquema de un espectrómetro.....	30
Figura 9. Arreglos de sensores de color para cámaras digitales: Arreglo de Bayer y prisma.	31
Figura 10. Carta de color MACBETH COLORCHECKER®.	31
Figura 11. Respuesta de los tres canales RGB vs. Reflectancia para las muestras grises con su ajuste de linealización.....	33
Figura 12. Esquema general de funcionamiento de un monitor LCD.....	37
Figura 13. Modelo de filtros para un LCD a color.....	38
Figura 14. Sección transversal de un monitor LCD convencional.....	38
Figura 15. Ejemplo de falta de constancia de canales en un LCD.	39
Figura 16. Curvas características para LCD y CRT.....	41
Figura 17. Esquema de la digitalización del objeto a registrar, presentación en LCD, proceso de registro y reconstrucción de su correspondiente holograma.	45
Figura 18. Esquema experimental para el registro de hologramas de reflexión de rayo simple a partir de objetos reales.....	49
Figura 19. Montaje Experimental para el registro de hologramas a partir de objetos digitalizados presentados en LCD	51
Figura 20. Detalle del LCD usado en el montaje de registro	52
Figura 21. Proyección de imágenes como haz objeto para registro de hologramas.....	52

Figura 22. Montaje para medición en imágenes holográficas o carta física iluminados con lámpara de Xenón, equipo: cámara o espectrómetro.....	56
Figura 23. Montaje para medición en imágenes holográficas o carta física iluminados con láseres RGB, equipo: cámara o espectrómetro.....	57
Figura 24. Esquema para la medición de color en LCD con espectrómetro o cámara.....	62
Figura 25. Esquema para la medición de color en imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos digitales presentados en LCD con espectrómetro o cámara.	63
Figura 26. Carta de color MACBETH COLORCHECKER®, iluminada con lámpara de Xenón, con láseres RGB y construida digitalmente.....	65
Figura 27. Distribución espectral de la lámpara de Xenón empleada en la reconstrucción de los hologramas.	68
Figura 28. Imágenes de hologramas de la carta de color a partir del registro de objetos físicos. Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón.	68
Figura 29. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física,, reconstrucción con lámpara de Xenón.....	69
Figura 30. Diferencias CIE-a*b* entre valores experimentales de hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón, comparado con CIE-a*b* de la carta de color física, y comparado con CIE-a*b* carta de color física iluminada con láseres RGB.	70
Figura 31. Láseres empleados en la reconstrucción de los hologramas.....	72
Figura 32. Imágenes adquiridas para hologramas reconstruidos con láseres, registrados a partir de carta de color física.....	72
Figura 33. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, reconstrucción con láseres RGB.....	73
Figura 34. Valores a*b* para los hologramas reconstruidos con láseres RGB Vs. Valores a*b* para la carta de color física de acuerdo al fabricante, y Vs. Valores a*b* para la carta de color física iluminada con láseres RGB.	73
Figura 35. Intensidades espectrales de los láseres de reconstrucción para los hologramas registrados a partir de carta de color en formato pequeño.	75
Figura 36. Imágenes adquiridas con cámara para las muestras de la carta de color pequeña (Objetos iluminados bajo láseres RGB). Imágenes adquiridas con cámara para los hologramas de la carta de color pequeña (iluminados bajo láseres RGB)	75
Figura 37. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, en formato pequeño, reconstrucción con láseres RGB.....	76

Figura 38. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con láseres RGB (valores experimentales), Vs. Valores a^*b^* teóricos dados por el fabricante), y Vs. Valores a^*b^* para la carta de color física iluminada con láseres RGB. Carta de color en formato pequeño.	76
Figura 39. Imágenes adquiridas para hologramas a partir de objetos digitalizados. Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón.	78
Figura 40. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos presentados en pantalla LCD (carta de color) reconstruidos con lámpara de Xenón.....	79
Figura 41. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón (valores experimentales), Vs. Valores a^*b^* de acuerdo al fabricante de la carta de color, y Vs. Valores a^*b^* para la carta iluminada con láseres.	79
Figura 42. Imágenes adquiridas para hologramas a partir de objetos digitalizados. Hologramas reconstruidos con láseres RGB.....	81
Figura 43. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color presentada en pantalla LCD, reconstrucción con láseres RGB.	82
Figura 44. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con láseres (valores experimentales), Vs. Valores a^*b^* de acuerdo al fabricante de la carta de color (valores teóricos), y Vs. Valores a^*b^* para la carta iluminada con láseres (valores teóricos).	82
Figura 45. Imágenes adquiridas para hologramas a partir de objetos digitalizados Pseudocolor. Hologramas reconstruidos con láseres RGB.	84
Figura 46. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color presentada en pantalla LCD, reconstrucción con láseres RGB por pseudocolor.	85
Figura 47. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con láseres obtenidos por Pseudocolor (valores experimentales), Vs. Valores a^*b^* teóricos de acuerdo al fabricante y Vs. Valores a^*b^* de la carta iluminada con láseres.	85
Figura 48. Detalle de las intensidades de entrada y salida al LCD de los láseres RGB.....	88
Figura 49. Presentación de imágenes sobre LCD construidas digitalmente.....	88
Figura 50. Valores CIE-xy para las imágenes de la Figura 49 y presentadas sobre LCD iluminado con láseres RGB, Valores CIE- $L^*a^*b^*$	89
Figura 51. Valores CIE-xy para la carta de color construida digitalmente y presentada sobre LCD iluminado con láseres RGB.	90
Figura 52. Diferencias CIE- a^*b^* para la carta de color construida digitalmente y presentada sobre LCD iluminado con láseres RGB, Vs. Valores CIE- a^*b^* de acuerdo al fabricante de la carta, y Vs. Valores CIE- a^*b^* de acuerdo a la carta iluminada con láseres RGB.	90

Figura 53. Diferencias CIE-a*b* entre coordenadas de imágenes holográficas registradas a partir de objetos físicos (Valores Experimentales) Vs. CIE-a*b* para hologramas a partir de carta de color presentada sobre LCD (Valores teóricos), reconstrucción con Lámpara de Xenón.	94
Figura 54. Diferencias CIE-a*b* entre coordenadas de imágenes holográficas registradas a partir de carta de color física (Valores Experimentales) Vs. CIE-a*b* para hologramas a partir de carta de color presentada sobre LCD (Valores teóricos), reconstrucción con Láseres RGB.	94
Figura 55. Valores CIE-a*b* para las imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la presentación sobre LCD Vs. Valores CIE-a*b* para LCD (iluminación láser RGB).	96
Figura 56. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas registrados a partir de carta de color física, reconstrucción con lámpara de Xenón.	98
Figura 57. Diferencias CIE-a*b* para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Valores CIE-a*b* para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, reconstrucción con lámpara de Xenón, Vs. Valores teóricos: CIE-a*b* entregados por el fabricante, y Vs. Valores teóricos: CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB.	99
Figura 58. CIE-xy con cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB y registrados a partir de carta de color física.	100
Figura 59. Diferencias CIE-a*b* entre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, reconstrucción con láseres RGB, Vs. CIE-a*b* del fabricante de la carta, y Vs. CIE-a*b* de carta física bajo láseres RGB. Medición con cámara linealizada y caracterizada.	100
Figura 60. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB registrados a partir de carta física en formato pequeño.	102
Figura 61. Diferencias CIE-a*b* entre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física formato pequeño. Reconstrucción con láseres RGB, Vs. CIE-a*b* entregados por el fabricante, y Vs. CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB. Medición con cámara linealizada y caracterizada.	102
Figura 62. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta digitalizada y presentada sobre LCD. Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón. Medición con cámara linealizada y caracterizada.	104
Figura 63. Diferencias CIE-a*b* entre Hologramas obtenidos a partir de la carta de color digitalizada y presentada sobre la pantalla LCD, reconstruidos con lámpara de Xenón, Vs. CIE-	

a*b* entregados por el fabricante, y Vs. CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB. Medición con cámara linealizada y caracterizada.	104
Figura 64. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB registrados a partir de carta digitalizada y presentada sobre LCD.	105
Figura 65. Diferencias CIE-a*b* para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color digitalizada y presentada sobre la pantalla LCD. Reconstrucción con láseres RGB, Vs CIE-a*b* entregados por el fabricante, y Vs. CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB.	106
Figura 66. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB por Pseudocolor registrados a partir de carta digitalizada y presentada sobre LCD.	108
Figura 67. Diferencias CIE-a*b* para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color digitalizada y presentada sobre la pantalla LCD. Reconstrucción con láseres por Pseudocolor. Vs. CIE-a*b* entregados por el fabricante, y Vs. CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB.....	109
Figura 68. Caracterización de LCD con cámara.....	110

FIGURAS DE ANEXOS

Figura A. 1. Montaje experimental empleado para el registro de holograma de reflexión por rayo simple a partir de objetos reales.	119
Figura A. 2. Montaje experimental para el registro de holograma de reflexión a partir de objetos presentados en pantalla LCD.	120
Figura A. 3. Montaje Experimental para medición de color sobre carta de color u holograma con cámara o espectrómetro y Lámpara de Xenón.	120
Figura B. 1. Escritura de los valores teóricos CIE-L*a*b* de la muestra a analizar.	121
Figura B. 2. Selección de la curva de difracción del holograma a analizar.	122
Figura B. 3. Selección de la fuente de luz empleada como referencia.	122
Figura B. 4. Selección de la imagen del holograma analizado.	123
Figura B. 5. Visualización de resultados con espectrómetro como método de medición.	123
Figura B. 6. Detalle de resultados obtenidos con cámara como método de medición del color y área de interés sobre la imagen.	124
Figura C. 1 Detalle de los valores ingresados por usuario para presentar imagen construida digitalmente sobre LCD. Presentación de muestra azul (0, 0, 255) sobre LCD de acuerdo a los parámetros	125
Figura D. 1 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con lámpara de Xenón y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma lámpara.	126
Figura D. 2 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente.	126

Figura D. 3 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente. Carta de color en formato pequeño.....	126
Figura D. 4 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con lámpara de Xenón y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente, registradas a partir de la presentación en LCD.....	127
Figura D. 5 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente, registradas a partir de la presentación en LCD.	127
Figura D. 6 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente, registradas a partir de la presentación en LCD. Pseudocolor.	127

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Modelos varios de transformaciones polinomiales según Cheung y Westland.	34
Tabla 2. Coordenadas de la carta de color Macbeth ColorChecker, de acuerdo al fabricante (CIE-L*a*b* bajo D50, RGB bajo D65; y de acuerdo a mediciones hechas en laboratorio, iluminando con láseres RGB).	65
Tabla 3. ΔE entre hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón Vs. Valores CIE-L*a*b* carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.	69
Tabla 4. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB Vs. Valores teóricos de la carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.	72
Tabla 5. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB Vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.	75
Tabla 6. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón Vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a carta iluminada con láser RGB. Mediciones con espectrómetro.	78
Tabla 7. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.	81
Tabla 8. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB por pseudocolor Vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.	84
Tabla 9. Diferencias de color ΔE entre la carta e color construida digitalmente y presentada en pantalla LCD Vs. Valores teóricos de acuerdo al fabricante de la carta y a la carta iluminada con láseres.	89
Tabla 10. ΔE entre hologramas a partir de carta de color física Vs. hologramas a partir de presentación sobre LCD.	94

Tabla 11. Diferencias ΔE para los hologramas registrados a partir de la presentación sobre LCD Vs. Valores CIE-L*a*b* para LCD (iluminados con láseres RGB).	96
Tabla 12. Diferencias de color para coordenadas CIE-L*a*b* de imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos físicos Vs. Coordenadas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres RGB. Reconstrucción con lámpara de Xenón, medición con cámara.	98
Tabla 13. ΔE entre CIE-L*a*b* de hologramas a partir de objetos físicos Vs. CIE-L*a*b* de carta de color física de acuerdo a fabricante y a la carta iluminada bajo láseres RGB. Reconstrucción con láseres RGB, medición con cámara.	100
Tabla 14. Diferencias de color para coordenadas CIE-L*a*b* de imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física Vs. coordenadas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Hologramas reconstruidos con láseres RGB. Carta física en formato pequeño, medición con cámara.	101
Tabla 15. ΔE entre CIE-L*a*b* de hologramas a partir de objetos digitalizados presentados sobre LCD Vs. CIE-L*a*b* de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Reconstrucción con lámpara de Xenón, medición con cámara.	103
Tabla 16. Diferencias de color para coordenadas CIE-L*a*b* de hologramas registrados a partir de objetos digitalizados presentados sobre LCD Vs. Coordenadas teóricas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Hologramas reconstruidos con láseres RGB, medición con cámara.	105
Tabla 17. Diferencias de color entre CIE-L*a*b* de hologramas registrados a partir de objetos digitalizados presentados sobre LCD Vs. Coordenadas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Hologramas reconstruidos con láseres RGB por Pseudocolor, medición con cámara.	108

INTRODUCCIÓN

Es sabido que la importancia de la holografía radica en su capacidad de registrar la información óptica de amplitud y fase de la luz proveniente del objeto. Tener registrada la información completa, de amplitud y fase del campo óptico proveniente, facilita la posibilidad de reconstruir la posición espacial de cada uno de los puntos que conforman las fuentes de luz que corresponden al frente de onda de dicho objeto, esto se traduce en la posibilidad de reproducir la tridimensionalidad del mismo.

Es por esto que las imágenes holográficas se diferencian completamente de los demás sistemas que buscan generar el efecto de la tridimensionalidad basados principalmente en la estereoscopía, y generalmente emplean sistemas de visión adicionales. En principio la holografía puede reproducir las imágenes con características tales que desde el punto de vista óptico son indistinguibles del objeto real.

Aunque la holografía se ha venido desarrollando intensamente desde la invención del láser, y se han logrado grandes avances en las técnicas de registro, que posibilita la obtención de hologramas con diferentes formatos y con un mayor impacto en las imágenes tridimensionales, usualmente nos encontramos con hologramas monocolor o pseudocolor, sin información sobre el color real de los objetos. Indudablemente, las imágenes que se reconstruyen a partir de hologramas a color son las que mejor reproducen las características de los objetos registrados, y naturalmente se acercan mucho más al ideal de no poder distinguir ópticamente entre los objetos registrados y sus correspondientes imágenes reconstruidas.

Convencionalmente la colorimetría se ha ocupado de la medición del color en todos los procesos donde se hace necesario caracterizarlo o garantizar su reproducción. La holografía a color es un método con técnicas de generación y evaluación de la reproducibilidad del color que se encuentran aún en desarrollo.

Diversos autores proponen el uso en la holografía a color de métodos basados en espectrómetro, debido a que es una técnica muy empleada en colorimetría, y se ha mostrado que su utilización permite obtener resultados satisfactorios, bien sea para la determinación de longitudes de onda adecuadas de los láseres para el registro de hologramas de reflexión a color [1] como para la medición de color o reproducibilidad de hologramas de transmisión a color [2]. Actualmente se emplea en la gestión de color y verificación de reproducibilidad del color en hologramas ultra-realistas [3][4], así como en estereogramas a color [5]. Por otro lado, las cámaras CCD-RGB han sido empleadas para la medición de color [6]; ya que presentan mayor portabilidad y menor costo, sin embargo, su uso en holografía es menos frecuente.

Recientemente la línea de trabajo en Procesamiento Óptico, del grupo de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT, viene trabajando con el objetivo de generar hologramas a color, obteniéndose resultados satisfactorios [7]; sin embargo, la etapa de verificación del color aún es subjetiva y cualitativa; es decir, el color es evaluado de acuerdo a lo que vea el observador en el holograma; si este es similar visualmente al objeto original, su color es adecuado; este método tiene la desventaja de que depende del observador entre verificación y verificación.

Dentro del proceso de registro realizado existen diversas variables que deben ser caracterizadas y en algunos casos controladas; como por ejemplo, se deben conocer las intensidades de los tres láseres a emplear, caracterizar el LCD para presentación de las imágenes a registrar: estos elementos presentan una alta absorbancia por lo que es necesario conocerla, y la eficiencia de difracción de la película holográfica ya que es distinta para las diferentes longitudes de onda; debido a esto, usualmente se implementa un proceso de balance de color de las intensidades de los láseres.

Implementar un método más objetivo, que permita medir cuantitativamente las coordenadas de color y la diferencia de color ΔE , entre el objeto original y el holograma reconstruido, sería un resultado de mucha importancia que generaría un gran impacto en la investigación que se realiza sobre holografía a color en el grupo, ya que así, se dispondría de un procedimiento experimental y un método basado en estándares de colorimetría y gestión del color que hace uso de sensores tales como, un espectrómetro y una cámara CMOS-RGB. En el caso del espectrómetro, se tendrían mediciones de diferencias de color a partir de curvas espectrales de la eficiencia de difracción de

los hologramas, mientras que la cámara permitiría conocer el estado del color o de las intensidades de los láseres necesarias en las etapas intermedias del proceso.

En este trabajo se propone desarrollar, implementar y evaluar un método que basado en un espectrómetro y una cámara CMOS-RGB, integre la gestión del color en el proceso de captura de los objetos que son utilizados para holografiarse (reales o digitales), y en la etapa de su presentación en el LCD, con un procedimiento que permita realizar la medición de la reproducibilidad del color de los hologramas. La implementación del método propuesto pasa por cinco aspectos:

- 1) Implementar los algoritmos para la linealización de la cámara y el cálculo de coordenadas XYZ de color.
- 2) Obtener las imágenes con control del color, que puede ser: a) Partiendo de un objeto real, que se ilumina con diferentes fuentes de luz (halógena, láseres RGB o xenón) y se captura con una cámara CMOS-RGB, y b) Construyendo digitalmente el objeto con sus correspondientes valores RGB. De esta forma, el color registrado depende de las características del iluminante, y la configuración de la cámara
- 3) Presentar las imágenes en el LCD. Las imágenes digitalizadas son iluminadas con luz coherente de tres láseres RGB, ya que son parte del arreglo experimental necesario para el registro de hologramas de reflexión. En este caso se requiere controlar las características de color de la imagen en el LCD, con los parámetros propios del dispositivo y el ajuste de intensidades de los láseres.
- 4) Registrar el holograma. En el proceso de registro, el ajuste final de la composición de intensidades depende principalmente del rango espectral, sensibilidad y la respuesta espectral del medio de registro.
- 5) Reconstruir el holograma. La reproducibilidad del color debe medirse en relación al color del objeto inicial, bajo diferentes iluminantes, con respecto a la imagen holográfica obtenida por difracción, a partir de diferentes fuentes de luz.

Bajo este contexto cabe aclarar el término gestión del color; la gestión del color busca que el color se vea igual en una muestra sin importar bajo qué plataforma está siendo procesada, el método de captura o visualización usado: cámara, scanner, impresora, pantalla LCD, etc. Por lo tanto, la gestión del color, establece las bases para conseguir una uniformidad de parámetros de reproducibilidad para una muestra sin importar el método de reproducción empleado [8].

El presente trabajo consta de 4 capítulos. El primero, de forma general, habla acerca del proceso de registro de hologramas, más específicamente, de los hologramas a color y estereoscopia holográfica.

El segundo capítulo: Colorimetría, describe los modelos para medición del color establecidos por la Comisión internacional de iluminación (CIE - Commission internationale de l'éclairage): XYZ, $L^*a^*b^*$ y diferencia de color para medir la reproducibilidad del mismo. Igualmente, se detallan los espectrómetros, usados para realizar mediciones de reflectancia en búsqueda de obtener coordenadas CIE-XYZ y las cámaras a color para la medición de valores RGB; con sus correspondientes métodos de linealización y caracterización. Al final de esta sección, se describe el funcionamiento y los métodos de caracterización de dispositivos de visualización tales como LCDs y CRTs.

En el tercer capítulo se detallan los métodos empleados por diversos autores en la medición de color en hologramas; se describen los arreglos experimentales para el registro de hologramas a partir de objeto físico y presentado sobre monitor LCD. De la misma forma, se detalla la configuración para la medición y control de reproducibilidad del color con cámara RGB y espectrómetro y como se usó en las distintas etapas de registro de los hologramas.

Un último capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de los arreglos experimentales del Capítulo 3, los cuales son mostrados en diagramas CIE-xy, y CIE- a^*b^* , este último, buscando comparar las coordenadas de color del holograma con las del objeto, bien sea real o digital presentado en la pantalla LCD. Así mismo, se detallan los resultados de caracterización del monitor LCD utilizado en el proceso de registro. Las imágenes adquiridas con cámara de los hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón o láseres RGB se muestran para apreciar sus características visualmente, y se comparan con las coordenadas CIE-xy, CIE- $L^*a^*b^*$ obtenidas.

Los anexos de este trabajo incluyen una descripción breve de la interfaz programada en Matlab®, para visualizar los resultados de medición de la reproducibilidad del color, y unas imágenes que muestran los montajes realizados en el laboratorio de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT para el desarrollo de la presente tesis.

1. HOLOGRAFÍA

La holografía es un proceso óptico de registro y reconstrucción de la amplitud y la fase de un frente de onda, el cual se soporta en los fenómenos de interferencia y difracción. A diferencia de los métodos convencionales de registro, en los cuales sólo se puede registrar y preservar la distribución espacial de la intensidad de la luz registrada, con pérdida de la información de la fase, en la holografía es posible codificar la información de la fase de un campo óptico proveniente de un objeto como variaciones de intensidad, valiéndose de la interferencia de luz coherente de una onda de referencia y una objeto.

La reconstrucción es un segundo paso, en el cual a partir de un campo óptico difractado por el holograma, se reconstruye el frente de onda con toda la información de amplitud y fase de la onda registrada; exactamente con las mismas características ópticas como si el campo que se difracta en el holograma fuera similar al haz objeto del registro.

El aporte fundamental de la holografía radica en registrar, además de la amplitud, la fase de una onda, de modo que en el proceso de reconstrucción no haya pérdida de la información contenida en el campo óptico registrado.

Una forma posible de convertir la información de fase en variaciones de intensidad, es usando los resultados bien conocidos de la interferencia óptica [9]. Es decir, si se utiliza un segundo frente de onda, mutuamente coherente, de modo que interfiera con el frente de onda del objeto, la distribución de intensidad resultante es temporalmente estable y depende sólo de la diferencia de fase, lo cual permite que esta sea registrada [10].

1.1. Holografía a color

La holografía a color es una técnica relativamente nueva de visualización de imágenes a color, que comparada con otras, tiene grandes diferencias, en este caso se habla de imágenes 3D registradas a partir de tres láseres con distintas longitudes de onda a través de un proceso de interferencia en

el cual el color es obtenido a partir de difracción ya sea de fuentes de luz discretizadas, tales como láseres, LED's RGB, o fuentes de luz blanca; de esta manera el color depende, no solo de la composición espectral de la luz, sino también de las características de las redes de difracción que constituyen el holograma, mientras que en la visualización y captura de imágenes 2D el color es obtenido a partir de fenómenos de absorción y reflexión.

Es por esto que el registro del color en un holograma no es un procedimiento directo, en cuanto que la información registrada no corresponde a la información del color, sino a una estructura de patrones de interferencia que está determinada por las longitudes de onda involucradas en el registro, pero que dependerá de las características del medio fotosensible, sus condiciones de procesamiento y de la fuente de luz que finalmente se utilice para reconstruir la información del color involucrada en el registro. Así entonces, la reproducción del color a partir de hologramas registrados en emulsiones de haluros de plata es un proceso indirecto, que depende tanto de los principios físicos de la interferencia y difracción involucrados en el registro y la reconstrucción, así como de procesos físico-químicos dados en el registro y procesamiento de la película. Además, también se ve afectado por la composición espectral de las fuentes de luz presentes en el registro y la reconstrucción. El color final que se pueda reconstruir dependerá del control fino de los diferentes parámetros que afectan las variables mencionadas.

Más recientemente se ha facilitado el desarrollo de la holografía a color por el avance tecnológico en dos temas importantes. De un lado el desarrollo de los láseres DPSS (Diode Pumped Solid-State) que permiten disponer de las tres longitudes de onda primarias necesarias para la obtención del color (rojo, verde y azul), con muy buena longitud de coherencia, a mucho menor costo comparado con los anteriores láseres de Argón, Helio-Cadmio y Krypton. Por otro lado, con la ampliación de la oferta de nuevos materiales de registro pancromáticos debido a la aparición en el mercado de nuevos fabricantes, actualmente se cuenta con diferentes referencias de películas de haluros de plata pancromáticas, con diversas características en cuanto al tamaño del grano de la película, sensibilidad y rango espectral. En principio, todos ellos posibilitan la obtención de imágenes holográficas con una excelente capacidad de reconstrucción del color real de los objetos registrados.

A pesar de estos avances presentados en la holografía a color las técnicas para su generación y evaluación del color aún son diversas e incipientes, inclusive, en algunos casos, suelen ser

subjetivas, es decir, el color es evaluado por observación y comparación de la imagen reconstruida del holograma con el objeto original registrado; los métodos que requieren mediciones cuantitativas son poco usados. La colorimetría ofrece herramientas de este tipo, permitiendo así la estandarización, a la vez que garantiza la fidelidad con respecto al objeto inicial del cual se generó el registro, sin depender de evaluaciones cualitativas del observador.

Actualmente, existen procedimientos y estándares que ofrece la colorimetría y permiten determinar la calidad de las imágenes que son capturadas o presentadas por diversos dispositivos, tales como las cámaras digitales (CCD, CMOS, etc.) pantallas de video, de diversos tipos (LCD, UOLED, CRT), impresoras, entre otros. Estos procedimientos permiten medir y controlar la correspondencia del color existente entre la imagen final y el objeto inicial. Para esto existen diversos equipos: colorímetros, espectrofotómetros, cámaras CCD-RGB, entre otros, esto con el fin de que el color se muestre de la forma más fiel posible, es decir, con unos estándares bajo los cuales se conoce, que el ojo humano percibe el color.

1.2. Hologramas de rayo simple

La holografía a color en hologramas de reflexión presenta ventajas sobre los hologramas de transmisión. Para muchos propósitos de exhibición los hologramas de Denisyuk, o de rayo simple son útiles y resultan muy atractivos. Son fáciles de registrar y presentan un campo de visión muy amplio, y aunque no posibilitan el control de la relación referencia/objeto, permiten obtener hologramas con muy buenas eficiencias de difracción.

En el registro de hologramas de reflexión a color, los láseres necesarios para la exposición de la placa holográfica pasan primero a través de un obturador que permite controlar el tiempo de exposición y luego a través de un único filtro espacial, con un agujero de salida (pinhole) que no es óptimo para las tres longitudes de onda pero permite una buena iluminación. Así, el haz de referencia está formado por los tres haces expandidos que inciden directamente sobre la placa. El haz objeto lo conforma la luz reflejada en el objeto, que tiene una composición espectral determinada por su composición del color. De esta manera el haz de “luz blanca” coherente que ilumina la placa interfiere con el haz que proviene de la reflexión en el objeto. Cada una de las tres (o más) longitudes de onda primaria, R, G y B utilizadas generan su propio patrón de interferencia en la emulsión por lo cual pueden ser registrados simultáneamente y de forma individual. De este

modo se genera un multiplexado de tres sistemas de franjas interferométricas correspondientes a planos de Bragg espaciados una distancia d_λ , dada por la ecuación (1):

$$d_\lambda = \frac{\lambda}{2n \operatorname{sen} \frac{\delta}{2}},$$

(1)

donde δ es el ángulo entre la dirección de propagación del haz objeto y la del haz de referencia, n es el índice de refracción de la emulsión y λ la longitud de onda de la luz incidente, fuera de la emulsión. La Figura 1 esquematiza los tres sistemas de planos de Bragg superpuestos dentro de la emulsión.

En la reconstrucción, (ver Figura 2), bajo condiciones ideales del procesado, cuando el holograma es iluminado por una fuente de luz blanca, cada una de las componentes R, G y B de la fuente son reflejadas en el sistema de franjas que satisface la condición de Bragg.

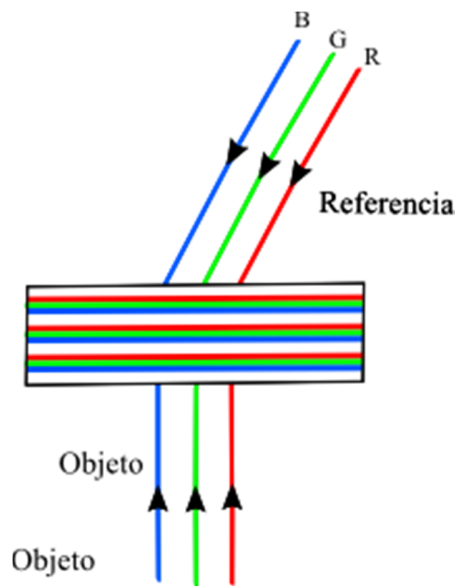


Figura 1. Esquema del registro multiplexado con tres longitudes de onda en el holograma de reflexión.[7]

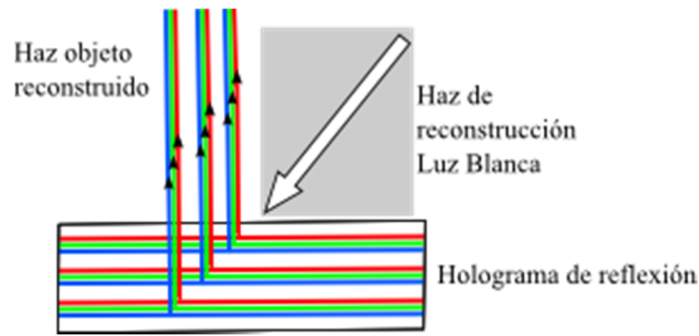


Figura 2. Esquema de la reconstrucción de cada una de las longitudes de onda R, G y B en redes de Bragg.[7]

1.3. Estereoscopia Holográfica¹

Aunque las imágenes holográficas han sido reconocidas como las imágenes tridimensionales más realistas [11], los requerimientos de estabilidad y la infraestructura requerida para obtener hologramas de grandes formatos han impedido que sea más popular y que avance más rápidamente [12].

Los hologramas tradicionales son por lo general estáticos y de objetos reales e inanimados, requieren de montajes ópticos y el proceso de interferencia ocurre de manera real. Aunque la utilización de láseres pulsados posibilita los registros holográficos de objetos vivos o en movimiento, los altos costos que implica la hacen poco accesible [13]. Por otro lado, el significativo aumento en la capacidad de cómputo y velocidad de procesamiento de los últimos años, ha posibilitado la generación de hologramas por computador, sin embargo, la cantidad de información almacenada en un holograma hace que la computación de patrones holográficos sea muy complicada.

Otra forma de desarrollar las técnicas tradicionales de holografía con láseres de He-Ne de bajo costo, es el multiplexado angular o espacial sobre una misma película [14]. Sin embargo, en el caso del multiplexado angular hay una notable pérdida de eficiencia de difracción debida al rango dinámico del material, motivo por el cual es más común utilizar técnicas de multiplexado espacial, aprovechando la propiedad de los registros holográficos, que en todos los puntos de la placa holográfica se posee información de todos los puntos del objeto visto desde esa perspectiva; de este

¹ Tomado de [29]

modo se registran un conjunto de hologramas de diferentes perspectivas o estados en el tiempo de un objeto.

Nace entonces una propuesta híbrida conocida como estereoscopía holográfica [15][16], que a partir del multiplexado espacial permite registrar distintas perspectivas de un objeto, de manera tal que al ser reconstruidas formen pares estereoscópicos holográficos, que reconstruyan de manera continua y dinámica el objeto mirando a través de la ventana con paralaje horizontal y/o vertical [17].

Para el registro del holograma, las imágenes adquiridas del objeto pasan a una etapa de digitalización, y mediante la utilización de un dispositivo (display) digital que opera como un modulador espacial de luz SLM (Spatial Light Modulator) son presentadas secuencialmente, y proyectadas en una pantalla difusora [15][17] como se observa en la Figura 3. Posteriormente estas perspectivas son registradas de manera selectiva sobre la película, utilizando una rendija con desplazamiento mecánico, que permite proyectar cada vez una vista distinta del objeto a la placa, con las consideraciones necesarias para que coexistan los pares estereoscópicos y poder hacer la reconstrucción del estereograma holográfico mirando a través de las ventanas que reconstruyen las perspectivas individuales y que dan la sensación de paralaje con el desplazamiento longitudinal del observador [17].

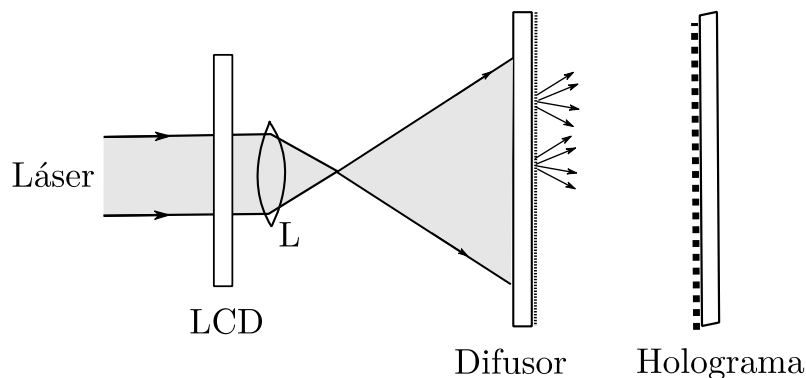


Figura 3. Sistema para proyección de imágenes en un difusor utilizando un LCD, para registro sobre película holográfica.

2. MEDICIÓN DEL COLOR

Como se mencionó anteriormente, los métodos de verificación del color en hologramas a color generalmente, se basan sólo en la comparación visual del objeto con su imagen reconstruida. Estos métodos, si bien como primera revisión son adecuados, para una evaluación cuantitativa se quedan cortos, ya que debido a que son evaluados por el ojo del observador, son subjetivos y no brindan una medición bajo algún estándar de colorimetría. Diversos autores [1]-[5], se han ocupado de esta verificación cuantitativa del color en hologramas, haciéndolo por medio de métodos de colorimetría; convirtiéndose así en referencias necesarias del presente trabajo. Dichos autores en sus trabajos citan el uso de modelos estándar para la medición de reproducibilidad de color tales como CIE-L*a*b* y CIE-XYZ, los cuales son descritos en el presente capítulo además del modelo de color para caracterización digital: RGB, y más adelante, serán empleados en las mediciones de color en hologramas.

En este capítulo se incluye además una breve descripción de los métodos de gestión y medición de la reproducibilidad del color, tanto por medio del uso de equipos que obtienen la distribución espectral de la muestra (espectrómetros) así como con cámaras digitales RGB. Más adelante se citarán los autores que han aplicado algunos de éstos métodos y modelos de la colorimetría en la holografía.

Al finalizar este capítulo se entrará en detalle sobre la medición y caracterización del color en los dispositivos tipo LCD, ya que hacen parte de una de las etapas de registro de hologramas a partir de la presentación de imágenes digitales. Su análisis se presenta de acuerdo a los estándares de la colorimetría, ya que al ser elementos visualizadores de imagen son también objeto de estudio de la gestión del color.

2.1. Colorimetría

2.1.1. Modelo de color CIE-XYZ

La CIE o Comisión Internacional de Iluminación es la organización que está encargada de todo lo concerniente a luz, iluminación y espacios de color. La CIE definió el modelo de color XYZ como estándar para los colores que percibe el ojo humano; los XYZ son tres primarios imaginarios que representan el color. El experimento de *igualación del color* explica este modelo:

En la Figura 4, se explica el experimento de igualación del color, en el cual, un campo bipartito es analizado por un observador, en este campo, cada lado es espacialmente uniforme pero sus distribuciones espectrales de potencia son distintas, siendo b_t una fuente de luz conocida como *Test Light* que se encuentra bajo control experimental, mientras que b_m está bajo control del observador y recibe el nombre de *Matching Light*. El objetivo del experimento es que el observador ajuste b_m lo más cercana posible a b_t . El campo bipartito se encuentra rodeado por una fuente de luz b_a que permanece fija durante el proceso de igualación. El dispositivo viene equipado de forma tal que el observador pueda ajustar b_m controlando la intensidad de un número de luces primarias superpuestas. Experimentos muestran que los observadores se encuentran en capacidad de reproducir cualquier *Test Light* ajustando la intensidad de solo tres primarios. A partir de este experimento, el observador genera unos pesos o intensidades de los primarios al igualar b_t con b_m , dichas intensidades son conocidas como coordenadas triestímulo [18]:

$$b_t \approx Pt , \tag{2}$$

P representa la matriz conformada por las distribuciones espectrales de potencia de los primarios (p_1, p_2, p_3), siendo t un vector tridimensional que representa las coordenadas triestímulo.

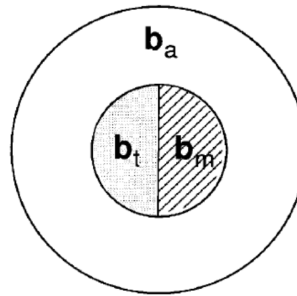


Figura 4. Experimento de Igualación del color [18].

Para el modelo identidad, las representaciones de una fuente b , es simplemente b misma. Los valores triestímulo para este modelo identidad, representados en la Figura 5 se llaman funciones de igualación del color.

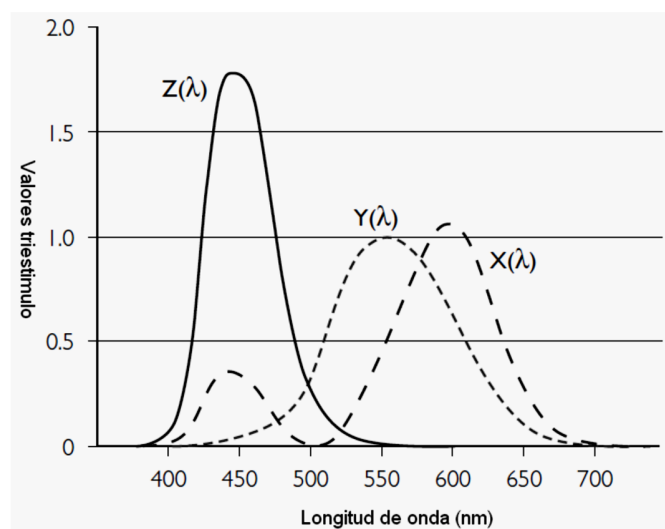


Figura 5. Funciones de igualación del color, CIE 1931, observador a 2° [19].

Una fórmula práctica para calcular los valores triestímulo CIE (1931) de una superficie con reflectancia $P(\lambda)$, bajo el efecto de un iluminante con distribución espectral de potencia relativa $E(\lambda)$ y constante de normalización “k” es:

$$X = k \int_{\lambda=400\text{ nm}}^{700\text{ nm}} E(\lambda)P(\lambda)x(\lambda) \quad Y = k \int_{\lambda=400\text{ nm}}^{700\text{ nm}} E(\lambda)P(\lambda)y(\lambda) \quad Z = k \int_{\lambda=400\text{ nm}}^{700\text{ nm}} E(\lambda)P(\lambda)z(\lambda) . \quad (3)$$

Otro modelo de color generado bajo las coordenadas triestímulo XYZ es el CIE-xy, la ecuación (4) representa la transformación de CIE-XYZ a CIE-xy. El diagrama CIE-xy se describe en la Figura 6, cualquier muestra con coordenadas de cromaticidad xy, se ubicará en la misma región de este mapa que otra muestra con iguales coordenadas pero distinta intensidad; es decir sin importar la luminosidad.

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

(4)

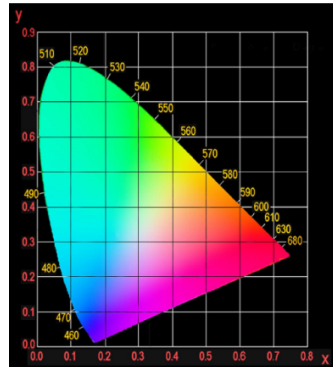


Figura 6. Diagrama para modelo de color CIE-xy 1932, observador a 2 grados [20].

2.1.2. Modelo de color CIE-L*a*b*

Un mayor avance fue hecho por la CIE en 1976 con la introducción del sistema de color CIE-L*a*b*. Esta transformación no lineal de los valores XYZ proveyó soluciones parciales a problemas que se estaban presentando con el modelo XYZ relacionados con apariencia y diferencia del color. La transformación de los valores XYZ a L*a*b* está dada por:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad a^* = 500\left[\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \quad b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right]$$

Donde:

$$f(I) = I^{1/3} \text{ si } I > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \quad \text{y} \quad f(I) = \left(\frac{841}{108}\right)I + \frac{4}{29} \text{ si } I \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3$$

(5)

donde I corresponde a la relación X/X_n , Y/Y_n o Z/Z_n ; los valores triestímulo para la referencia son X_n , Y_n y Z_n ; usualmente la referencia corresponde a una muestra que sea de una reflectancia alta y uniforme; es decir, son las coordenadas XYZ de la fuente de luz empleada. Respecto al modelo CIE-L*a*b*, la coordenada L^* representa la luminosidad, y las coordenadas a^* y b^* la cromaticidad (rojo-verde) y (amarillo-azul), respectivamente. Este sistema coordenado se representa en una esfera, donde el eje z está dado por L^* , a^* por el eje "x", y b^* por el eje "y" [21]. En la Figura 6 se muestra una vista 2D de este modelo.

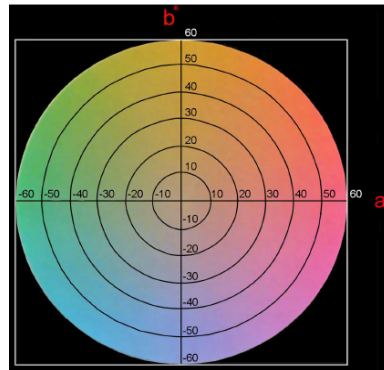


Figura 7. Representación de las coordenadas CIE-a*b* bajo una misma coordenada de luminosidad (L*) [20]

2.1.3. Diferencia de color.

Generalmente, bajo el sistema CIE-L*a*b* se calcula la diferencia de color para conocer qué tan cercanas son las coordenadas de color teóricas de la muestra con las coordenadas de color generadas bajo cualquier método de adquisición, visualización de imagen, o en el caso del presente trabajo, coordenadas de los hologramas reconstruidos. Esta diferencia de color está dada por:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} .$$

(6)

Entre más pequeña esta diferencia, más cercanas las coordenadas de color del holograma o imagen adquirida a las coordenadas originales del objeto registrado. Es decir, mejor es la reproducibilidad del color.

2.2. Espectrómetros.

Los espectrómetros son usualmente empleados para medir la razón entre la luz reflejada de cierta superficie a lo largo del espectro visible y la luz incidente, es decir, para encontrar $P(\lambda)$. Los resultados se expresan como la reflectancia de una superficie de color. Sus elementos son: fuente de luz, esfera integradora, monocromador y un detector [19]. Para el presente trabajo, de acuerdo a la Figura 8, sólo se hace necesario tener un elemento sensor y uno que permita la visualización del espectro de la muestra, es decir, un prisma o rejilla de difracción. Experimentalmente, se hizo uso de un miniespectrómetro ORIEL, que hace un sensado en el espectro visible hasta los 800nm aproximadamente con resolución de 0,07nm.

Una vez medidos los datos de reflectancia $P(\lambda)$ de la muestra, y la distribución espectral de la fuente $E(\lambda)$, los valores XYZ de color son calculados mediante la Ecuación (3).

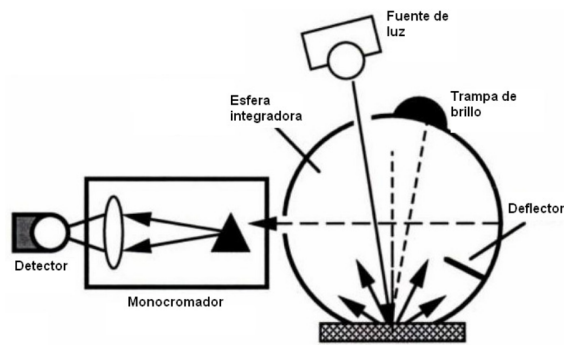


Figura 8. Esquema de un espectrómetro[22]

2.3. Cámaras

En digitalización de las imágenes llama espacio de color RGB a aquella escala dada en tres valores distintos primarios: Rojo, Verde y Azul; a partir de los cuales, y combinados apropiadamente se obtiene determinado color. Este espacio es uno de los más usados en procesamiento de imágenes, cada primario se representa por medio de una escala de valores de 0 a 255 o de 0 a 1. Existen distintas formas de producir una imagen RGB a partir de una cámara CCD, entre ellas se pueden destacar dos: uno de los diseños más comunes es el filtro de Bayer, el cual consiste de tres sensores: R, G, B, en este arreglo, el espacio ocupado por los sensores G es el doble en comparación a los sensores R y B; así, se permite que una vez digitalizada la imagen, la componente correspondiente a la luminancia tenga mayor representación que las componentes cromáticas, tal y como sucede en el ojo humano, ver Figura 9 (a). El diseño basado en el filtro de Bayer, consta de un sensor CCD con un arreglo de filtros de color, que es superpuesto sobre él; para reproducir digitalmente las imágenes capturadas, los valores provenientes de cada sensor son interpolados para formar una imagen R,G,B en todos los puntos del arreglo; este proceso es llamado: *demosaicing*. [19]. El segundo diseño consiste en un prisma que permite separar en tres bandas de distinta longitud de onda la luz, dichas bandas son detectadas por tres arreglos distintos de sensores ver Figura 9 (b).

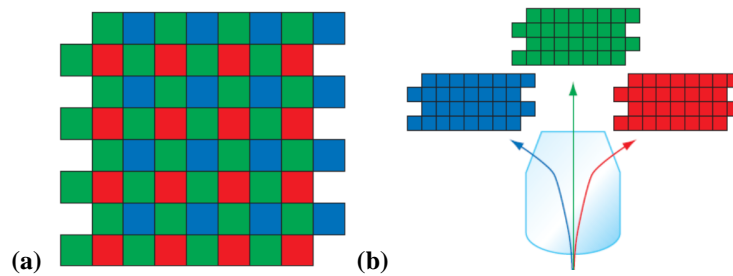


Figura 9. Arreglos de sensores de color para cámaras digitales: (a) Arreglo de Bayer. (b) Prisma. [19]

2.3.1. Cámaras para medición de color.

Debido a que una cámara CCD-RGB no entrega valores XYZ directamente, para poder obtener este tipo de datos a partir de imágenes capturadas con este dispositivo, se hace necesario pasar por un proceso de caracterización, es decir, realizar la conversión o *transformación* de los valores RGB de la cámara, hacia los valores XYZ, manejados en colorimetría. Una caracterización es efectiva si el dispositivo no hace balance automático de blancos. El balance automático de blancos es donde los valores RGB de cada pixel en la imagen capturada son transformados de forma tal que el pixel para la muestra más intensa en la imagen sea denotado como blanco con valores $R=G=B=255$ o 1. El método más eficiente para la caracterización de una cámara digital es por medio de una carta con un grupo de colores de valores triestímulo conocidos; estas cartas por lo general incluyen muestras de colores neutras (grises) que pueden ser usadas para linealizar las salidas RGB de la cámara y muestras de color para generar una transformación de los valores RGB linealizados a valores CIE-XYZ. Las tarjetas más empleadas son la carta Macbeth ColorChecker® de 24 muestras (Ver Figura 10) y la carta Macbeth DC ColorChecker® (la cual contiene 200 muestras), estas vienen con sus valores CIE- $L^*a^*b^*$ y RGB dados por el fabricante bajo iluminantes tipo luz día, D50 y D65 que corresponden a luz continua y uniforme en el espectro visible.

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24

Figura 10. Carta de color MACBETH COLORCHECKER®. [23]

2.3.2. Linealización de cámaras.

A pesar de que la respuesta de un sensor CCD es aproximadamente lineal a la intensidad que llega sobre éste, es poco probable que las salidas RGB de una cámara sean lineales a sus correspondientes valores triestímulo XYZ [21]. Los valores en bruto de cada canal son procesados de forma tal que se generen respuestas RGB que se acerquen más a las funciones de igualación del color. Debido a esto, es común considerar una corrección de la no linealidad, como primera etapa del proceso de caracterización de una cámara o scanner [21]. Consideremos una superficie espacialmente uniforme de reflectancia conocida $P(\lambda)$, la cual es capturada bajo un iluminante de distribución espectral de potencia $E(\lambda)$, por medio de una cámara con sensibilidades: $S_R(\lambda)$, $S_G(\lambda)$ y $S_B(\lambda)$, si se representan las respuestas de los canales de dicha cámara a través de las variables mencionadas, se tendría [24]:

$$\begin{aligned} R &= \sum E(\lambda)S_R(\lambda)P(\lambda) \\ G &= \sum E(\lambda)S_G(\lambda)P(\lambda) \\ B &= \sum E(\lambda)S_B(\lambda)P(\lambda) \end{aligned} \quad . \quad (7)$$

El fabricante por lo general introduce no linealidades en este tipo de dispositivos, para generar una mejor relación de señal-ruido, o para compensar las no linealidades que se encuentran en los dispositivos de visualización. Por tanto, como respuesta de los canales RGB, se tendrá la relación:

$$R' = R^\gamma \quad G' = G^\gamma \quad B' = B^\gamma . \quad (8)$$

Es decir, para conocer los valores *reales* arrojados por la cámara se hace necesario calcular el exponente γ característico de la no-linealidad, para lo cual se requieren las sensibilidades espectrales de los canales de la misma, así como la distribución espectral de la fuente de iluminación y la reflectancia de la muestra. Para aquellos casos en los cuales la sensibilidad espectral no es conocida, se puede hacer uso de unas muestras con reflectancia neutra (escala de grises), ya que para estas muestras su reflectancia no cambia a lo largo del espectro visible, y si se tiene en cuenta que los valores RGB *reales o en bruto* de la cámara corresponden solamente a la intensidad de luz que llega al sensor, se podría considerar que:

$$R' = P^\gamma \quad G' = P^\gamma \quad B' = P^\gamma \quad (9)$$

Donde P es la reflectancia promedio de la muestra (ya que al no cambiar a lo largo de todo el espectro visible, es correcto calcular su promedio), lo cual se corresponde con la luminancia de la muestra, es decir su intensidad. En la Figura 11 se describe un comportamiento no lineal de una cámara CCD con su ajuste de linealización, igualmente, se muestra un modelo ideal para un dispositivo de este tipo.

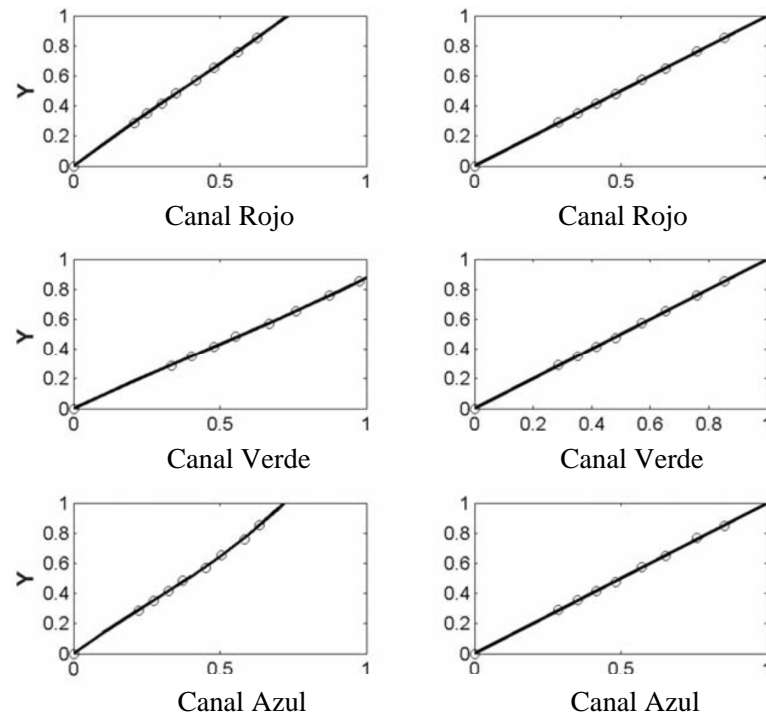


Figura 11. Respuesta de los tres canales (Izquierda) RGB vs. Reflectancia (Y) para las muestras grises (o) con su ajuste de linealización (-). En la derecha se muestran unos resultados similares de comportamiento ideal [21]

2.3.3. Transformaciones RGB-XYZ.

Una vez linealizada la cámara se puede proceder con la caracterización, es decir con la transformación de los valores RGB entregados por la cámara a coordenadas de color XYZ.

Si existe una relación lineal entre los canales de salida del dispositivo y los valores triestímulo, entonces, es posible determinar una transformación al espacio XYZ con al menos 3 muestras conocidas. Si se representan los n valores XYZ conocidos por una matriz T de $3 \times n$ y los n valores RGB con una matriz C de $3 \times n$, se tiene entonces:

$$T = AC ,$$

(10)

donde A es una matriz de 3×3 componentes. Si se tienen 3 muestras adecuadas, entonces el sistema lineal se determina. Igualmente, más muestras pueden ser usadas para sobre-determinar el sistema, pero son estrictamente necesarias sólo si la transformación lineal no existe entre los dos espacios de color. En esta situación es preferible usar una transformación no lineal, sin embargo, sigue siendo necesario realizar el proceso de linealización. En el caso de que la matriz C no sea cuadrada, se tendrá que la matriz de transformación A es:

$$A = D^+T, \quad (11)$$

siendo D^+ la pseudoinversa de la matriz no cuadrada, conformada por un polinomio para los valores R, G, B , el cual puede adoptar distintas formas, algunos de los polinomios se muestran en la Tabla 1 [25]:

mx3	Matriz RGB (Matriz D)
3x3	$[R \ G \ B]$
5x3	$[R \ G \ B \ RG \ RB \ GB \ 1]$
10x3	$[R \ G \ B \ RG \ RB \ GB \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ 1]$
19x3	$[R \ G \ B \ RG \ RB \ GB \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ RGB \ R^2G \ G^2B \ B^2R \ R^2B \ G^2R \ B^2G \ R^3 \ G^3 \ B^3]$

Tabla 1. Modelos varios de transformaciones polinomiales según Cheung y Westland (2004). [25]

2.4. Caracterización de LCDs

La tecnología LCD y sus características varían dependiendo del fabricante. Aun no existen métodos estándar para la caracterización del color de este tipo de dispositivos, para las pantallas tipo CRT sí los hay, por lo tanto, los LCD son analizados bajo algunos de estos métodos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que existen diferencias fundamentales en cuanto al principio de funcionamiento entre los LCD y los CRT [26].

2.4.1. Monitores tipo CRT.

En este dispositivo visualizador, la luz emitida es producida cuando un haz de electrones excita un recubrimiento de fósforo, que se encuentra en la parte frontal del monitor. El haz de electrones escanea la placa frontal de la pantalla en forma de patrón, izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, la intensidad del haz es modulada durante dicho escaneo de forma tal que la luz varía con la posición espacial de la placa frontal, es útil pensar en dicha placa como un continuo de píxeles. Los monitores a color contienen tres tipos de fósforos: rojo, verde y azul, los cuales están dispuestos de forma periódica como puntos a lo largo del monitor. Hay tres haces de electrones y una máscara, de forma tal que cada haz ilumine sólo un tipo de los tres fósforos [27].

La disposición de los fósforos es más pequeña que un píxel, de forma tal que los tres puntos: rojo, verde y azul no son resueltos por el observador a distancias de visión típicas. La luz para un píxel puede modelarse como la luz emitida por los tres fósforos, la distribución espectral de la luz emitida por un solo píxel en el monitor está dada por:

$$C(\lambda) = rR(\lambda) + gG(\lambda) + bB(\lambda) + A(\lambda), \quad (12)$$

donde $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ y $B(\lambda)$ son el espectro de la luz emitida por cada uno de los fósforos cuando son excitados al máximo por el haz de electrones; r , g y b son números reales en el rango de 0 a 1 y $A(\lambda)$ es la luz ambiente, emitida o reflejada por el monitor cuando el voltaje de entrada del video al monitor es cero para cada fósforo; r , g y b también son conocidas como intensidades de luz de los fósforos o *curvas de respuesta de tono* [28].

La ecuación (12) también se puede escribir a partir de valores triestímulo, de la forma:

$$t(R, G, B) = t_r(R) + t_g(G) + t_b(B) + t_0 \quad (13)$$

Asumiendo la independencia de canales, es decir la caracterización individual de los canales R, G, B, se puede escribir:

$$\begin{aligned}
 t_r(R) &= v_r(R)t_{mr} \\
 t_g(G) &= v_g(G)t_{mg} \\
 t_b(B) &= v_b(B)t_{mb}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

donde t_{mr} , t_{mg} y t_{mb} representan los valores máximo triestímulo y v_r , v_g y v_b son las curvas respuesta de tono. Entonces:

$$t(R, G, B) = \left[t_{mr}, t_{mg}, t_{mb} \right] \begin{bmatrix} v_r(R) \\ v_g(G) \\ v_b(B) \end{bmatrix} + t_0
 \tag{15}$$

Para un valor triestímulo deseado, corresponden los valores R, G, B:

$$\begin{aligned}
 [R, G, B] &= [v_r^{-1}(R'), v_g^{-1}(G'), v_b^{-1}(B')] \\
 [R', G', B'] &= T_m^{-1}(t - t_0)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

2.4.2. Función Gamma.

La función gamma aplica solamente para displays tipo CRT; cada curva de respuesta de tono puede ser modelada a partir de una función de potencia:

$$v_r(R) = \left((1 - \beta_r) \frac{R}{R_{max}} + \beta_r \right)^{\gamma_r},
 \tag{17}$$

donde R_{max} es el valor máximo para la señal del canal rojo, β_r y γ_r representan el offset y el exponente del modelo respectivamente. Debido a este comportamiento tipo exponencial, los monitores tipo CRT deben pasar por una etapa de *corrección gamma* [28].

2.4.3. Monitores tipo LCD.

Los componentes principales de un monitor LCD se muestran en la Figura 12, su fuente de iluminación es una luz de fondo (*backlight*). Su flujo luminoso pasa a través de un difusor y luego de un elemento modulador de luz, que consiste en dos polarizadores cruzados en medio de los cuales se encuentra el cristal líquido con unas pocas micras de espesor. El cristal líquido rota el plano de polarización de la luz, dicha rotación depende del campo eléctrico en este elemento. El campo eléctrico puede cambiar para variar la cantidad de luz que pasa a través del elemento modulador; este campo eléctrico es producido por un capacitor que cubre el área del pixel, las distintas clases de LCD difieren principalmente en la electrónica empleada para controlar el capacitor [18].

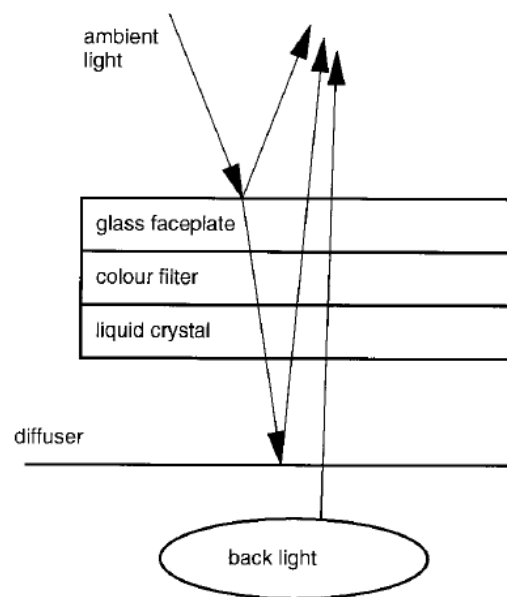


Figura 12. Esquema general de funcionamiento de un monitor LCD tomado de: [18].

Un monitor LCD de dos niveles consiste en un capacitor controlado por un transistor que puede estar encendido o apagado, lo cual define dos niveles: uno blanco y otro negro. Una característica particular de los monitores LCD es la habilidad de que la luz del entorno puede pasar a través del display, por lo tanto pasa a través del modulador y es esparcida con fase aleatoria por el difusor, devolviéndose hacia el observador, pasando otra vez por el modulador. Existe una dependencia temporal de la luz de salida del LCD, la cual consiste en que cada vez que el pixel se refresca produce un brillo seguido por una caída lenta, la cual es producida por pérdida de carga en el capacitor. Los LCD a color consisten en filtros de color ubicados para cada pixel, tres y a veces

cuatro filtros se emplean para crear la imagen a color. El arreglo de un monitor LCD a color se muestra en la Figura 13:

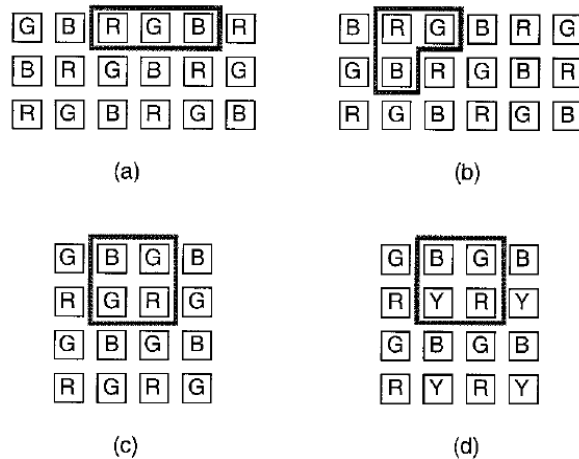


Figura 13. Modelo de filtros para un LCD a color: (a) y (b) Modelo para tres filtros, (c) y (d) Modelo de cuatro filtros [18]

Los modelos actuales de los monitores LCD son más sofisticados y con componentes adicionales, especialmente, en búsqueda de una mejor calidad de imagen. En la Figura 14, a la derecha, se detalla un conjunto de películas que evitan reflexiones y mejoran las características de contraste y brillo; y a la izquierda, el sistema de iluminación que incluye un polarizador de entrada reflectivo [29], [30]. El funcionamiento general del dispositivo sigue siendo tal y como se describió al inicio de esta sección.

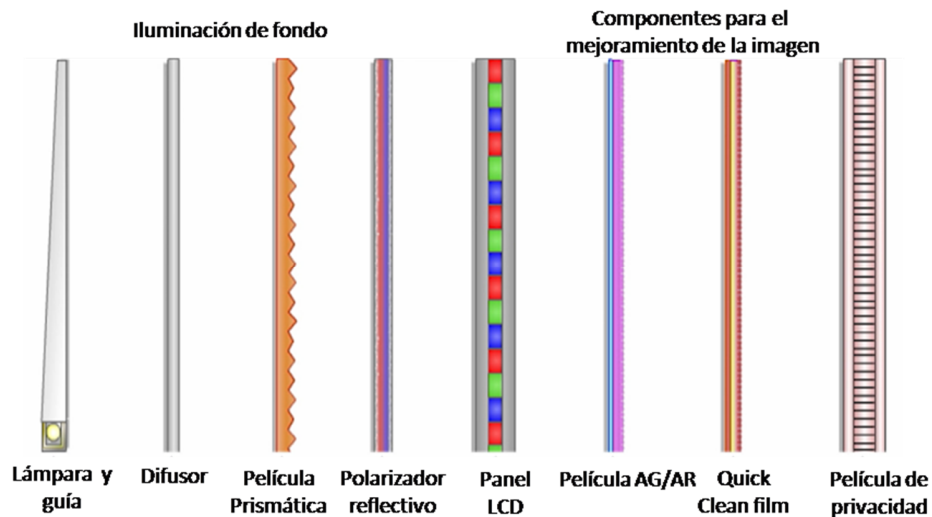


Figura 14. Sección transversal de un monitor LCD convencional [29][30].

2.4.4. Consideraciones en la caracterización de dispositivos LCD.

Un LCD se puede caracterizar de la misma forma que un CRT, sin embargo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones [27]:

- Dependencia Angular: los LCD tienen una dependencia angular muy fuerte; por lo tanto es importante tener en cuenta el ángulo al cual el observador se ubicará.
- Calentamiento: los LCD constan de un backlight generado a partir de una lámpara de cátodo frío tipo fluorescente. Este comportamiento es similar a los CRT, por tanto antes de ejecutar la caracterización se debe esperar un tiempo para tener datos consistentes.
- Constancia de canales: algunos LCD presentan una variación del espectro de emisión dependiente del nivel de excitación. En la Figura 15 se muestra el espectro relativo para el canal verde de un monitor LCD, a dos niveles distintos, mostrando un cambio en el espectro del mismo. Esto ocurre cuando el voltaje que controla la lámpara varía. Es posible corregir este comportamiento usando modelos lineales para caracterizar los cambios espectrales.

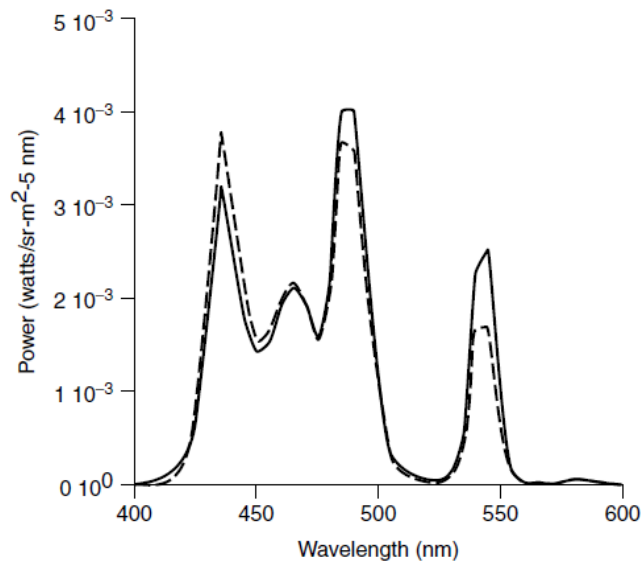


Figura 15. Ejemplo de falta de constancia de canales en un LCD. [27]

2.4.5. Procedimiento de caracterización de un LCD y un CRT.

Para la caracterización del LCD se tomó como referencia un trabajo reportado por Sharma, [28] en el cual se muestran resultados a partir de la caracterización de un LCD y de un CRT. Para esto, el autor contó con varias muestras de color con distribuciones espaciales uniformes (escalas de grises), las medidas las realizó con un espectrorradiómetro, que provee la radiancia espectral. Todas las medidas fueron hechas a un ángulo de 0 grados con respecto a la normal de la pantalla y en un cuarto oscuro para minimizar el parámetro $A(\lambda)$ de la ecuación (12).

La caracterización la llevaron a cabo con distintas muestras de valores de 33 niveles de grises, aumentando en forma de rampa; ya que se asumió la independencia de canales, para cada muestra se varió el nivel teniendo los otros dos canales igual a cero, por ejemplo $R=0:33:255$, $G=0$, $B=0$.

Los valores r , g , b de la ecuación (12) fueron determinados a partir de medidas espectrales, por medio del método de mínimos cuadrados para los canales rojo, verde y azul respectivamente. Los resultados de los autores se muestran en la Figura 16 donde se nota el comportamiento de una curva tipo S para el LCD y para el CRT una relación exponencial del tipo gamma, tal y como se esperaba.

El autor [28] hizo las caracterizaciones espectrales por canal usando el modelo de las ecuaciones (12) a la (16) para predecir la radiancia espectral del display, correspondiente a cualquier valor RGB. Tanto para el LCD así como para el CRT, calculó las predicciones para unas muestras independientes, por medio de las curvas encontradas para los valores r , g y b . Dichas muestras fueron aquellas con las cuales no se había generado cálculo alguno.

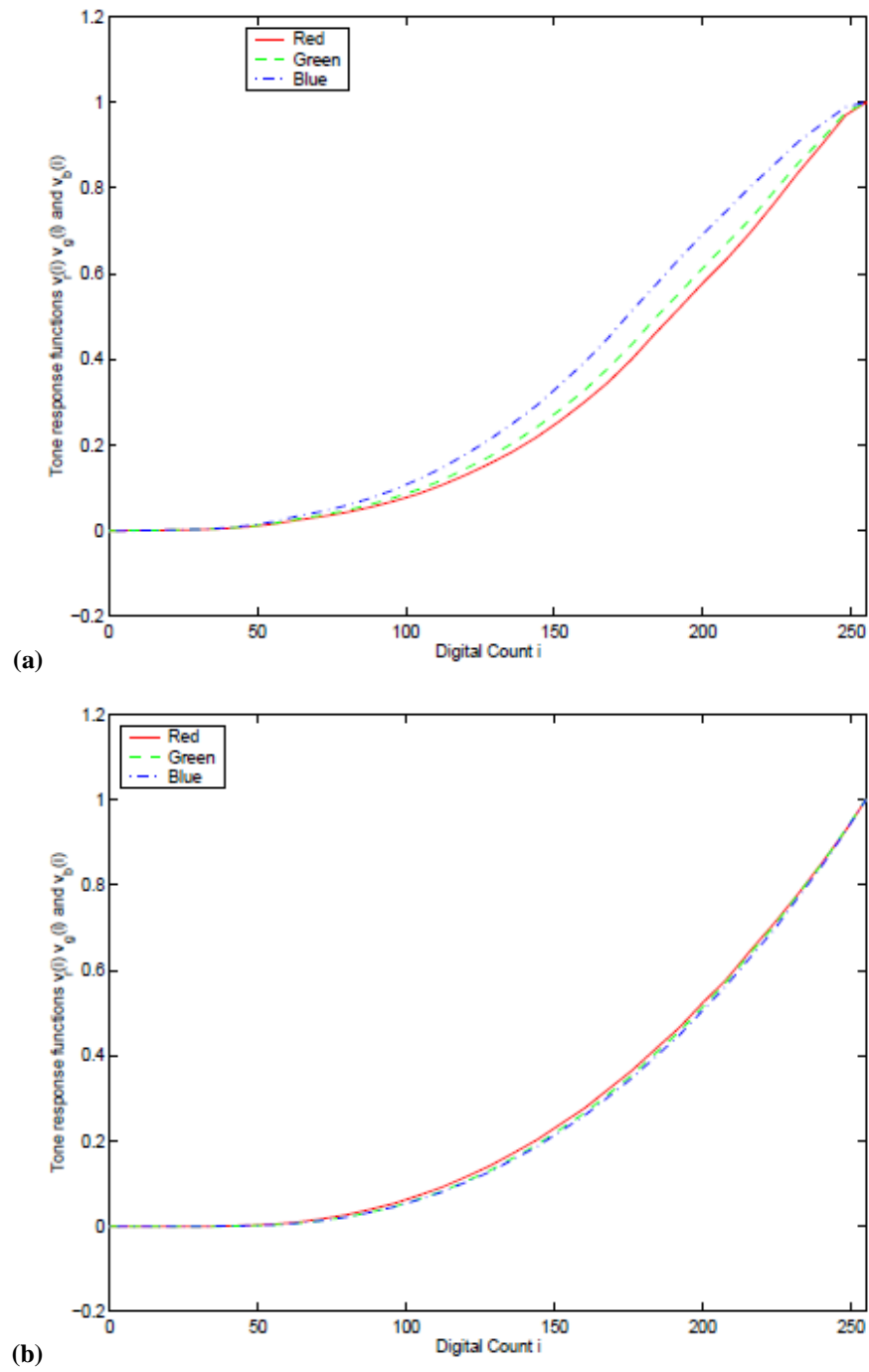


Figura 16. Curvas características para (a) LCD, (b) CRT. Tomado de: [28]

3. MEDICIÓN DE COLOR EN HOLOGRAMAS

En el proceso de registro de un estereograma holográfico a color, se parte de una imagen bidimensional que se quiere registrar, la cual es capturada mediante cámara o construida digitalmente, y es proyectada en una pantalla o presentada directamente en un LCD RGB. Luego de registrado, el holograma debe ser reconstruido con una fuente de luz blanca que posibilite la obtención del color en la imagen reconstruida. Este proceso se divide en cuatro etapas que se esquematizan en el montaje óptico de la Figura 17 y se describen a continuación:

Digitalización del objeto a registrar: Esto se puede realizar de dos formas: La primera, partiendo de un objeto real, que se ilumina con diferentes fuentes de luz (halógena, láseres RGB o xenón) y se captura con una cámara CCD o CMOS-RGB. En este caso, el color registrado dependerá de las características del iluminante, y la configuración de la cámara. El segundo método consiste en construir digitalmente el objeto con sus correspondientes valores RGB, a partir de programas de CAD (Diseño asistido por computadora) o computación gráfica. En el caso de la carta de color Macbeth ColorChecker®, los valores RGB del objeto son conocidos previamente debido a que son entregados por el fabricante bajo un iluminante tipo D65, que representa una fuente tipo luz día, de iluminación uniforme y continua a lo largo del espectro con temperatura del color de 6500°K.

Presentación de imágenes en el LCD: Las imágenes digitalizadas son almacenadas en un PC. Para registrar el holograma a partir de estas imágenes bidimensionales, primero se presentan en el LCD y luego se tienen que iluminar con luz coherente de tres láseres diferentes con longitudes de onda en el rojo (R), verde (G) y azul (B). En este caso se requiere controlar las características de color de la imagen en el LCD, con los parámetros propios del dispositivo y el ajuste de intensidades de los láseres.

Registro del holograma: En el proceso de registro, el ajuste final de la composición de intensidades depende principalmente de parámetros del montaje, tales como relación referencia/objeto y de las características del medio de registro que se vaya a utilizar, tales como la sensibilidad, el rango y respuesta espectral. Como parte del registro debe considerarse el proceso

fotoquímico de la película, pues este puede afectar la composición espectral de la imagen reconstruida.

Reconstrucción del holograma: Finalmente, la reproducibilidad del color debe medirse en relación al color del objeto inicial, bajo diferentes iluminantes, con respecto a la imagen holográfica obtenida, por difracción, a partir de diferentes fuentes de luz.

La reproducibilidad del holograma normalmente se realiza a través de métodos cualitativos, es decir, el observador verifica que el objeto y la imagen reconstruida del holograma bajo determinado iluminante sean similares por observación. Además de presentarse en éste capítulo los métodos experimentales bajo los cuales se registraron los hologramas estudiados, también se describen los métodos usados para realizar una medición cuantitativa de la reproducibilidad de estos hologramas, y del control de color en cada una de las etapas del registro a través de espectrómetro y cámara CMOS-RGB.

Bajo este esquema, la gestión y medición de la reproducibilidad del color en estereogramas holográficos de reflexión busca medir las diferencias de color que se van generando en las diferentes etapas del registro. Esto es:

- Inicialmente, en el proceso de digitalización del objeto se deben establecer las características del color bajo el iluminante que se va a utilizar. Estos iluminantes pueden ser: una fuente convencional tipo D65 de espectro continuo, o una iluminación conformada por tres componentes espectrales determinadas por las longitudes de onda de los láseres utilizados, ésta última se usa partiendo del hecho que si el objeto se va a registrar holográficamente, necesariamente será con este tipo de iluminación. Por tanto, el color del objeto será diferente cuando se ilumina con un sistema de láseres RGB, a cuando lo es con una fuente tipo D65. Inclusive cuando se construye digitalmente por valores RGB dados por el fabricante, ya que se asume que, las condiciones experimentales bajo las cuales se tendrá el objeto en el laboratorio serán las mismas que el fabricante al entregar dichos valores.
- Cuando el objeto es presentado en el LCD, para su registro, su composición de color está determinada por las características de la imagen digital, las características del dispositivo y la distribución espectral de intensidades proporcionada por los tres láseres. En este punto debe buscarse una correspondencia de color entre el objeto y su imagen en el LCD.

- En el proceso de registro y revelado, debe garantizarse que el holograma esté en condiciones de reconstruir el color que fue registrado. Debido a que una modificación en el espesor de la película se traduce en una modificación en la longitud de onda que se puede reconstruir, el proceso fotoquímico debe garantizar que se puedan reconstruir en las mismas longitudes de onda involucradas en el registro.
- En su reconstrucción el holograma puede ser iluminado con diferentes fuentes de luz: de espectro continuo pero diferente composición espectral como lámparas de Xenón o halógenas. Se encuentran también las fuentes de iluminación discreta RGB pero con un ancho de banda espectral amplio, en comparación con los láseres RGB, como es el caso de los LED RGB. La reproducción con los mismos láseres utilizados en el registro permite tener condiciones que se asemejan más a las iniciales. La correspondencia de color ideal se debe dar entre la etapa de la digitalización y esta etapa de reconstrucción.

En este trabajo la gestión y medición de la reproducibilidad del color en hologramas de reflexión busca que el color se vea igual en una muestra sin importar bajo qué plataforma está siendo procesada, el método de captura o visualización usado: cámara o generando digitalmente la imagen. Por lo tanto, la gestión del color, establece las bases para conseguir una uniformidad de parámetros de reproducibilidad para un objeto registrado sin importar el método de reproducción empleado [8].

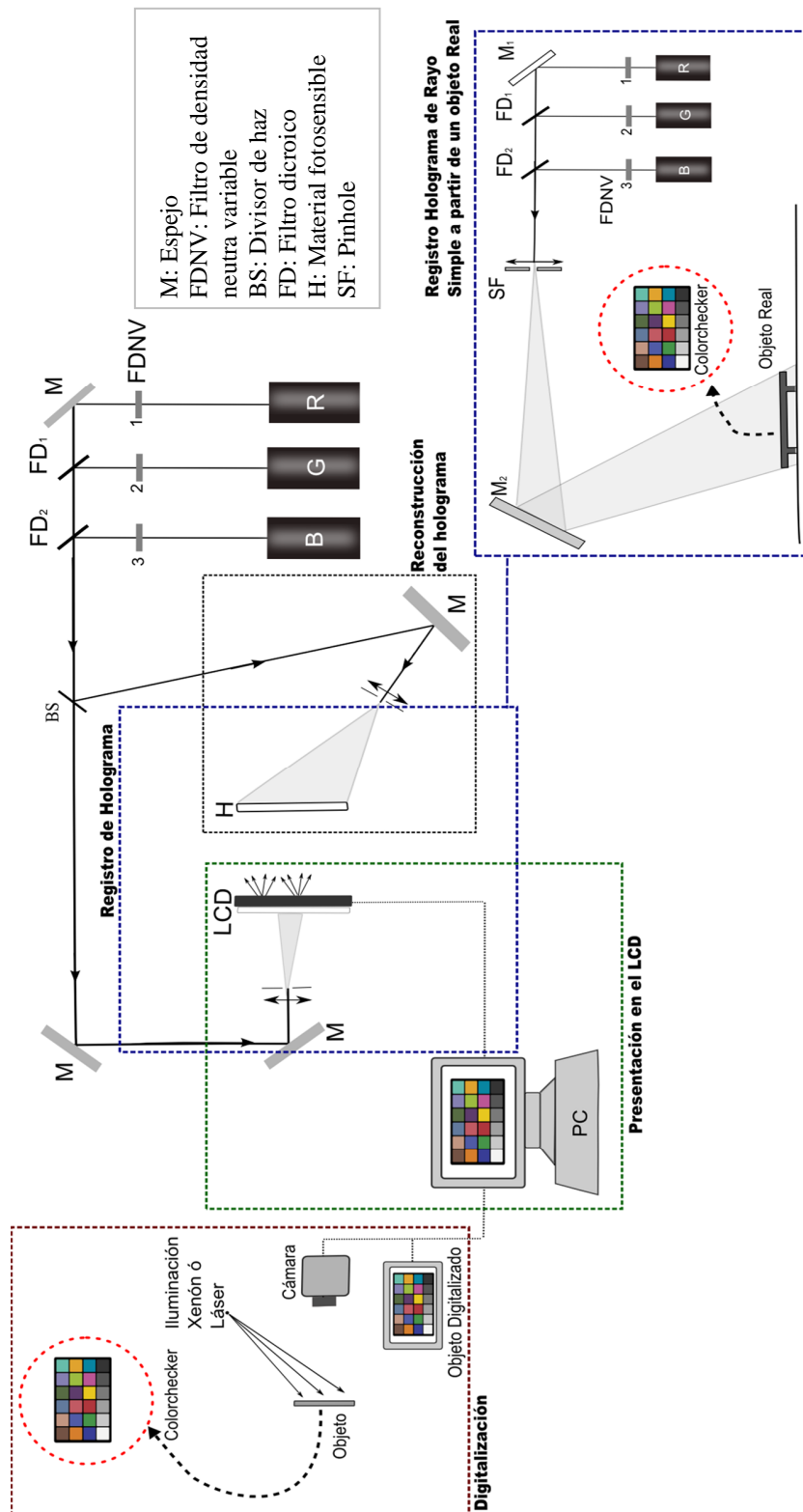


Figura 17. Esquema de la digitalización del objeto a registrar, presentación en LCD, proceso de registro y reconstrucción de su correspondiente holograma.

3.1. Estado del arte.

El uso de técnicas y modelos de la colorimetría en hologramas a color es algo que se ha hecho desde varios años atrás. Con la generación de los hologramas a color, muchos holografistas tuvieron la necesidad de explorar este campo como herramienta para la medición de reproducibilidad de color en sus hologramas.

Estos estudios se conocen desde el año 1973, con M. Noguchi [2] donde el autor muestra el registro de 12 hologramas de transmisión a color, a los cuales se les realiza medición de color a partir de la obtención de curvas de reflectancia para los hologramas reconstruidos a partir de un fotomultiplicador. Los cálculos hechos para cada holograma consistieron en hallar sus coordenadas CIE-xy y representarlas en un diagrama de este tipo.

Hacia 1991, Hubel y Solymar [1] por medio de su trabajo buscaron una forma de modelar las longitudes de onda óptimas para el registro de hologramas a color por reflexión. Por óptimas, se entiende que serán hologramas con un buen gamut y CRI; el gamut hace referencia al área cubierta por determinadas muestras en un mapa de color CIE-xy, y el CRI o IRC es el índice de reproducción cromática, es decir, una medida de qué tan fiel se ve el color bajo determinada fuente de luz, que trata de emular una fuente de luz ideal [20]. Para las mediciones de color, un proyector de tungsteno fue empleado como fuente de luz. Las mediciones se hicieron con un telespectrorradiómetro. La luz difractada por el holograma fue colectada por un telescopio y llevada por un manojo de fibras ópticas, al final, una lente enfocaba la luz a la entrada del sensor. Las distribuciones espectrales de potencia de distintas áreas sobre las imágenes reconstruidas del holograma fueron empleadas para calcular los valores CIE-Lu'v' 1976 de los objetos registrados iluminados bajo luz blanca y láser, al final, compararon estos valores con los de sus hologramas reconstruidos bajo luz blanca.

Más recientemente en 2008 y 2013 se conoce el trabajo realizado por Bjelkhagen et al [3], quienes por medio de sus diversos trabajos han logrado técnicas de registro de imágenes ultra realistas, es decir, de hologramas a color idénticos a su objeto original [4]. En su trabajo [3], realizaron análisis de diversos factores que pueden afectar el color en un holograma a color, tales como los láseres de registro, materiales de registro y fuentes de reconstrucción; específicamente, realizaron simulaciones para conocer cómo se mejoraba la reproducibilidad de un holograma a color entre

mayor fuese el número de longitud de ondas (láseres) de registro, y al final, presentan una medición hecha sobre uno de sus hologramas a color registrados mediante 3 láseres: R, G y B. Esta medición la realizaron con un espectrofotómetro, los resultados se muestran mediante curvas de respuesta espectral del holograma en un área blanca del mismo, en la cual se observa satisfactoriamente, una reconstrucción de las tres longitudes de onda del registro a intensidades casi iguales.

En el 2012, Yang et al [5] realizaron registros de estereogramas holográficos a color por medio de un LCD monocromático, en su trabajo, reportan también mediciones de la reproducibilidad de color por medio de coordenadas CIE-L*a*b* y un modelamiento del color en el LCD empleado. Para el registro emplearon muestras de la carta de color Macbeth ColorChecker®, y para la reconstrucción una fuente de luz de Xenón; toda la luz difractada por el holograma es enfocada en una pantalla, la cual puede ser un estándar blanco de alta reflectancia, la radiancia espectral de la imagen reconstruida en la pantalla es medida con un espectrorradiómetro. Como muestra de referencia usaron un espejo de aluminio para medir la radiancia del espectro de la fuente. La radiancia espectral de la imagen reconstruida en la pantalla es medida, y la eficiencia de difracción es evaluada por su valor pico en el espectro de difracción del holograma dividido entre la radiancia del espectro del iluminante a la misma longitud de onda. Por medio de estas medidas, de acuerdo a la ecuación (3) obtuvieron los valores XYZ. Los autores asumen que para este tipo de montaje de registro de estereogramas se da la continuidad de los canales de un display LCD, lo cual implica que el espectro relativo emitido por un holograma de tres colores (RGB) es independiente del nivel de gris que haya a la entrada del canal de color correspondiente.

Para la toma de los datos y registro de los hologramas, los autores [5] realizan determinadas pruebas para definir la mejor relación señal-ruido y la exposición más adecuada. Así mismo, para definir la función de reproducción del tono, correspondiente al LCD; realizan unas pruebas que consisten en registrar hologramas de muestras de color, a medida que van variando las intensidades de los canales RGB del LCD en valores iguales, es decir desde el negro, pasando por los grises hasta el blanco, todo esto en valores de 0 a 255 en pasos de 32 niveles. Para encontrar la función de reproducción del tono a cada uno de estos hologramas, se les midió la eficiencia de difracción; una interpolación de la gráfica de los valores RGB para el LCD Vs. la eficiencia de difracción permite entonces hallar esta función de reproducción del tono.

Los valores XYZ de la luz de fondo (background noise) fueron encontrados midiendo el holograma registrado a un nivel de gris en el LCD=0 en los tres canales. Estos valores son restados a los valores XYZ del holograma para niveles de grises también de 0 a 255 en los canales del LCD y se encontró que las coordenadas xyz en el diagrama no cambiaban, por lo cual se comprobó *la independencia de los valores de color del holograma con los valores de los canales RGB del LCD*.

Nuevamente, empleando herramientas de la colorimetría, en este trabajo [5] se calculan diferencias de color, comparando los CIE-L*a*b* del estereograma reconstruido con respecto a los CIE-L*a*b* originales de las muestras de la carta (objeto registrado). Los resultados los representaron como vectores diferencia en un diagrama CIE-a*b* donde el punto de inicio del vector eran los valores teóricos (objeto registrado), y los experimentales el punto de llegada del mismo (estereograma reconstruido). Este es uno de los trabajos más actuales, donde los autores hicieron uso de la colorimetría para el cálculo de coordenadas de color, y caracterización del LCD monocromático.

3.2. Arreglos Experimentales para el registro de hologramas

Los esquemas que se muestran a continuación consisten en los montajes empleados para el registro de hologramas por medio del método de rayo simple. Inicialmente, se presenta el montaje para el registro a partir de un objeto físico, es decir un conjunto de muestras seleccionado de la carta de color Macbeth ColorChecker; un segundo arreglo experimental emplea un objeto digitalizado para este registro, es decir, utiliza la carta de color construida digitalmente y presentada en un LCD, el cual es iluminado con los láseres RGB; podría entonces decirse que la imagen digital sobre el LCD, es, en este caso el objeto a registrar.

3.2.1. Registro de hologramas de reflexión a color por medio del método de rayo simple a partir de objetos reales.

Se implementó un arreglo experimental para el registro de hologramas de reflexión de rayo simple, una vista superior de la configuración del montaje se observa en la Figura 18. Éste utiliza un sistema de iluminación coherente RGB compuesto por tres láseres R (He-Ne), G (DPSS) y B (DPSS), de longitudes de onda de 632,8nm, 532nm y 473nm, respectivamente. El control de la intensidad

transmitida se realiza de manera individual para cada longitud de onda, con filtros de densidad neutra variable (NDF) a la salida de cada uno de los láseres. La mezcla de las 3 longitudes de onda se realiza utilizando el espejo M1 y dos filtros dicroicos (DF1 y DF2); esto proporciona un haz de luz coherente “blanca” a la salida, de componentes R, G y B. Con el espejo M2 el haz es direccionado para obtener una iluminación de la placa y el objeto desde arriba, formando un ángulo θ . El registro se realizó en emulsiones de grano ultrafino PFG-03C de Slavich y fueron reveladas con el proceso CW-C2. En la sección de anexos en la Figura A. 1 se muestra una fotografía de este arreglo experimental implementado en laboratorio.

Las intensidades de los láseres RGB fueron definidas de acuerdo a estudios previos referentes a la sensibilidad de la película PFG-03 de Slavich [7] y conocimiento de la película de acuerdo al fabricante (sensibilidad de la película), esto determinó que los porcentajes de exposición para cada longitud de onda debían ser: R=10%, G=57% y B=33%.

El objeto a registrar consistió en 7 muestras representativas de la carta Macbeth ColorChecker®, 6 colores primarios y secundarios: Azul, Verde, Rojo, Amarillo, Magenta y Cian, y una séptima muestra neutra: Blanco; estos colores corresponden a las muestras 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 de la Figura 10, respectivamente.

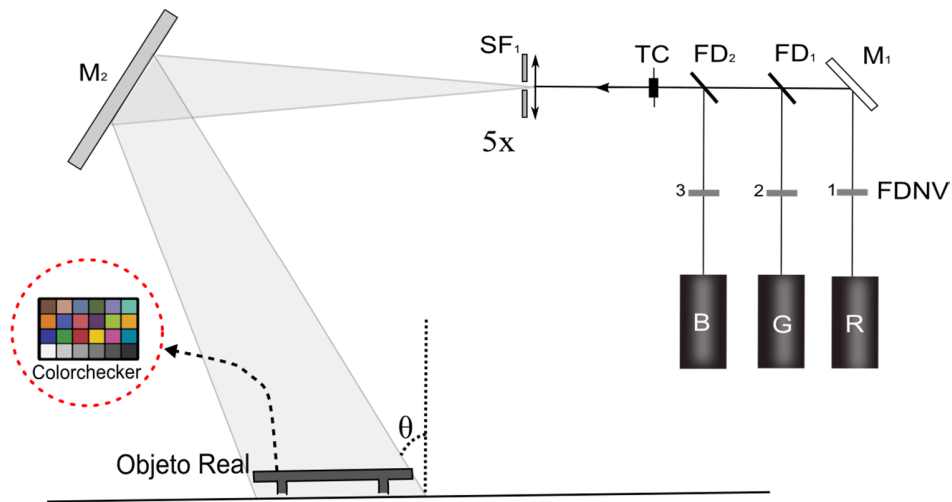


Figura 18. Esquema experimental para el registro de hologramas de reflexión de rayo simple a partir de objetos reales.

3.2.2. Registro de hologramas de reflexión a partir de imagen presentada en LCD.

A diferencia del montaje anterior, para el registro de hologramas a partir de la presentación de imágenes sobre una pantalla LCD, las muestras o el objeto a registrar, en este caso, consistieron en la construcción digital de los colores de la carta Macbeth ColorChecker (muestras 13 a la 19), a partir de los valores RGB conocidos para cada uno de ellos a través del fabricante de la carta. Debido a que en este caso el objeto sería presentado sobre la pantalla LCD, el arreglo experimental resulta un poco distinto al de registro a partir de objetos físicos (Ver Figura 19).

La iluminación fue la misma que se empleó para el registro de hologramas a partir de objetos físicos R (632,8nm), G (532nm) y B (473nm). La intensidad también se controla por medio de los filtros de densidad Neutra (NDF), la mezcla y generación de luz blanca se obtiene mediante los filtros dicróicos (DF1 y DF2) y espejo M1. Por medio del divisor de haz (BS) se obtienen los haces objeto y referencia y se controla su relación de intensidades por medio del filtro de densidad neutra NDF₄. El haz objeto es llevado hacia los espejos M2, M3 y M4 para finalmente iluminar el LCD por transmisión, el haz referencia es llevado por medio de los espejos M5, M6 y M7 hacia el portaplacas. Nuevamente, el registro se realizó en emulsiones de grano ultrafino PFG-03C de Slavich y fueron reveladas con CW-C2. Los porcentajes de exposición para cada longitud de onda también fueron R=10%, G=57% y B=33% [7]. En la sección de anexos también se puede detallar en la Figura A. 2 la fotografía de este montaje en el laboratorio de óptica Aplicada de la Universidad EAFIT.

De acuerdo al arreglo, la relación referencia/objeto se ajustó mediante el filtro de densidad neutra (FDNV₄) a valores: R=1,3; G= 2,2; B=1,7; para el color blanco R=G=B=255 presentado sobre el LCD. De esta forma se lograba también un porcentaje de exposición de 10%, 57% y 33% para R, G, B respectivamente. Inicialmente, no se tuvo en cuenta que al cambiar la muestra (color) dependiendo de cuál fuera cada una, las relaciones iban a cambiar junto con las potencias medidas sobre el objeto, por lo cual después de los primeros registros se tuvo mayor cuidado en la potencia medida sobre el objeto, dando como resultado tiempos de exposición mayores con relaciones referencia/objeto un poco distintas.

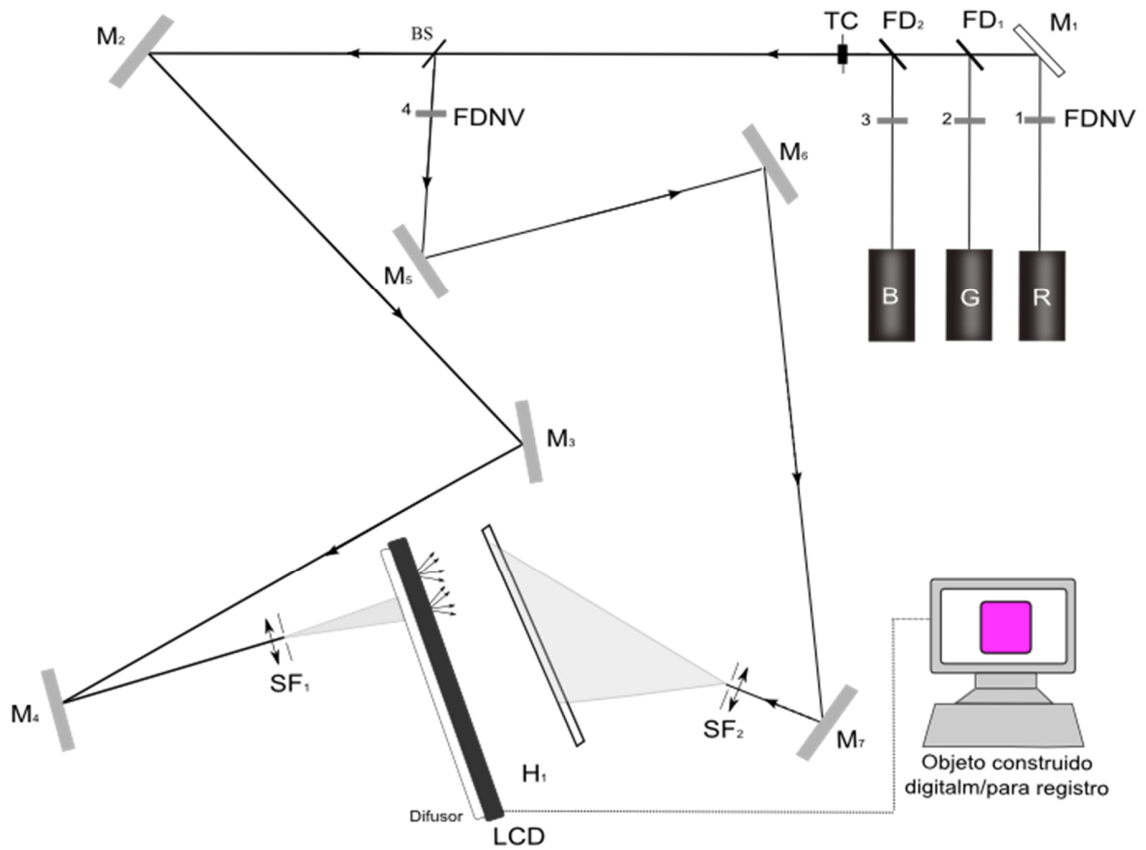


Figura 19. Montaje Experimental para el registro de hologramas a partir de objetos digitalizados presentados en LCD

Uno de los elementos nuevos en este montaje, comparado con el de registro de hologramas a partir de objetos físicos, es el monitor LCD, el cual requirió una caracterización para conocer cuál es su funcionamiento para la adecuada gestión del color en esta etapa del proceso de registro. El dispositivo utilizado es un monitor a color HPL1706 de 17'', tamaño de píxel de $264\mu\text{m}$. Retomando la Figura 14, donde se detallaron los elementos de un monitor LCD empleado en la actualidad, específicamente, para este montaje, se retiraron los elementos de iluminación, dejando sólo el polarizador que está adherido al panel (Ver Figura 20). Las componentes de mejoramiento de la imagen vienen adheridas como una sola película, por lo cual también se dejaron [29].

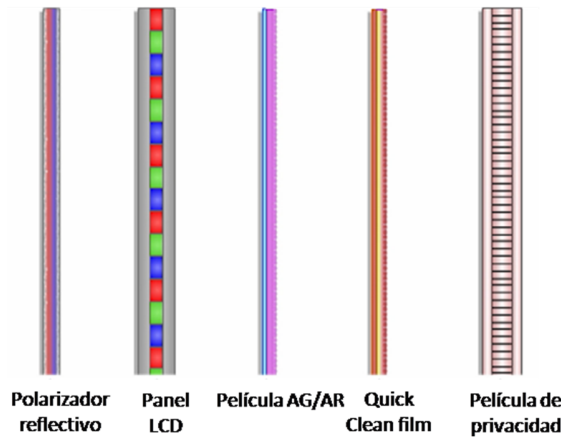


Figura 20. Detalle del LCD usado en el montaje de registro, con los elementos que no fueron retirados. [29]

En el laboratorio se ha implementado un sistema diferente con respecto a la forma como usualmente, de acuerdo a los sistemas reportados en la literatura, se utilizan los LCD para el registro de estereogramas holográficos. Usualmente, como se ve en la Figura 21.a, la vista presentada en el LCD es proyectada en la pantalla difusora, utilizando un sistema óptico, siendo esta imagen la que servirá de objeto para el registro del holograma. El tamaño de la imagen o equivalentemente, del objeto, estará determinado por el sistema óptico y por la distancia entre el LCD y el difusor. En la Figura 21.b, se detalla el arreglo implementado con el LCD, en el cual, la luz proveniente del láser ilumina directamente el difusor, en un área correspondiente al tamaño de la vista que se va a holografar. En este elemento, la luz se esparce llegando así, al panel LCD y permitiendo que se obtenga directamente la imagen presentada. La idea es que en el panel se vea la imagen, tal como se vería en un monitor, con la ventaja que se pueden proyectar imágenes a color para ser registradas holográficamente mediante la utilización de tres láseres con diferentes longitudes de onda en el rojo (R), en el verde (G) y el azul (B). Este tipo de montaje respecto al de la Figura 21 (a) se presenta como una solución simplificada. [29]

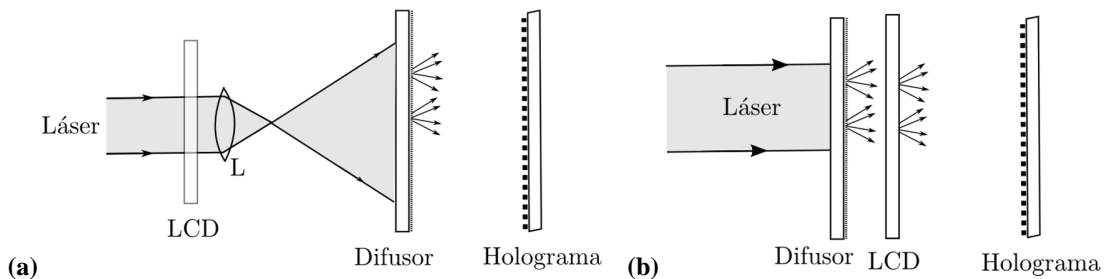


Figura 21. Proyección de imágenes como haz objeto para registro de hologramas (a) Utilizando sistema formador de imagen para la proyección sobre un difusor (b) Proyección directa sobre el LCD sin usar sistema formador de imagen.[29]

3.3. Métodos implementados para la medición de color.

La medición de color se implementó mediante dos montajes diferentes, uno con espectrómetro y otro con cámara CMOS RGB:

El espectrómetro es uno de los equipos seleccionados ya que este es muy usado en colorimetría en general, y ha sido una herramienta común para los holografistas en la medición de la reproducibilidad de sus hologramas a color, mencionados previamente en el estado del arte. Igualmente, todos los trabajos precedentes además de emplear el espectrómetro o un equipo similar a este, realizan a partir de sus mediciones cálculos de coordenadas XYZ, para finalmente, mostrar la comparación entre las coordenadas de color del objeto original Vs. las del holograma reconstruido, bien sea por valores de gamut, CIE-Lu'v' o CIE-La*b*.

Las cámaras RGB son usadas en colorimetría pero no con mucha frecuencia, debido a su falta de linealidad, y a que no son dispositivos diseñados para medición de reproducibilidad de color; para lograrlo, requieren procedimientos adicionales tales como linealización y caracterización. Debido a que su precio es menor al del espectrómetro y facilidad de manejo, se considera su estudio en el presente trabajo.

Para la reconstrucción de los hologramas y mediciones se usaron dos tipos de fuentes: una lámpara de Xenón y los mismos láseres RGB de registro. Ya que este trabajo busca realizar una gestión del color en todas las etapas del registro del holograma, se hace necesario tener una comparación de las coordenadas del holograma reconstruido con las del objeto iluminado con láseres, donde se estaría evaluando la etapa del registro como tal, ya que este tipo de fuente es empleada en este paso, también se busca conocer cómo cambia el color hasta obtener el holograma final. Igualmente, se hace una reconstrucción y medición en los hologramas con lámpara de Xenón, ya que esta es una fuente con una distribución espectral similar a un iluminante tipo luz día, el cual es empleado por el fabricante de la carta para mostrar sus valores teóricos CIE-L*a*b*, es decir, se pueden interpretar como las coordenadas de color del objeto real visto bajo una fuente de iluminación típica por el observador.

Ya que se registraron dos tipos de hologramas: uno a partir de objetos físicos y otro a partir de imágenes presentadas sobre una pantalla LCD, las comparaciones de valores CIE-L*a*b*

realizadas fueron de diversos tipos, en el caso de registro de objetos físicos, se calcularon diferencias de color ΔE entre los valores CIE-L*a*b* de la carta de color de acuerdo al fabricante (valores teóricos), y su correspondiente holograma reconstruido con lámpara de Xenón así como láseres RGB (valores experimentales); igualmente, entre los valores CIE-L*a*b* de la carta de color física iluminada con láseres (valores teóricos), y su correspondiente holograma reconstruido con lámpara de Xenón y láseres RGB (valores experimentales). En el caso de los hologramas generados a partir del registro por medio de la presentación de imágenes sobre la pantalla LCD, a parte de las mediciones mencionadas anteriormente, también se realizaron comparaciones (cálculo de diferencia de color ΔE) entre la imagen presentada sobre la pantalla LCD iluminada con láseres RGB y su correspondiente holograma, esta medida se hace necesaria para conocer la gestión del color en esta etapa del proceso, por lo cual también se realiza, previamente una caracterización del LCD con espectrómetro y cámara. Este tipo de mediciones se explican más detalladamente en las secciones 3.3.3 para caracterización del LCD y 3.3.4 para las medidas de color en hologramas a partir de la presentación de imágenes en este dispositivo.

En esta sección se realiza una descripción detallada de los métodos de gestión de color seleccionados: por medio de cámara y espectrómetro; los arreglos experimentales en las mediciones en hologramas, carta de color física y caracterización de LCD, los algoritmos implementados para cálculo de coordenadas CIE-XYZ, CIE-L*a*b*, diferencia de color ΔE , así como la caracterización y linealización de la cámara CMOS-RGB empleada en las medidas. En todos los casos se muestra el detalle de reconstrucción y medición en hologramas con iluminación tipo láser RGB y lámpara de Xenón. El procesamiento y cálculo de datos fue realizado por medio de un algoritmo programado en Matlab®, este busca calcular las coordenadas CIE-L*a*b* de los hologramas registrados. Para el espectrómetro este cálculo es de forma directa, a partir de las coordenadas CIE-XYZ de acuerdo a la Ecuación (3); para la cámara es necesario un proceso de linealización y caracterización que se describe con detalle más adelante.

3.3.1. Medición de color con espectrómetro.

Se implementó un montaje que permite iluminar con los tres láseres RGB o una lámpara de Xenón, la carta Macbeth ColorChecker® o el holograma registrado. Para la medición del color en el holograma, se iluminó con un ángulo θ ; igual al utilizado en el registro, (ver Figura 18).

El sensor empleado en esta etapa fue un miniespectrómetro Newport IS Series, acoplado a un arreglo de fibra óptica que posibilita capturar la luz difractada del holograma, como se muestra en la Figura 22 para iluminación con lámpara de Xenón, y en la Figura 23 para iluminación con láseres RGB. Una imagen real del montaje experimental en laboratorio con lámpara de Xenón se muestra en la Figura A. 3 del anexo.

Como se mencionó anteriormente, es necesario obtener una muestra de reflectancia, o en este caso de eficiencia de difracción (η) del holograma, esta se obtiene por medio de la relación entre la luz capturada por la reconstrucción del holograma (I_D) y la referencia de la fuente de iluminación (I_i) es decir:

$$\eta = \frac{I_D}{I_i}, \quad (18)$$

por lo cual fue necesario capturar el espectro de la fuente de iluminación a partir de un espejo con el mismo montaje mencionado para hologramas y un blanco de referencia de alta reflectancia para la carta física. Con los valores medidos de reflectancia $P(\lambda)$ se calcularon los valores de coordenadas CIE-XYZ y CIE-L*a*b* de los hologramas por medio de las ecuaciones (3) y (5).

Para la medición de color en la carta, cuando se ilumina con los tres láseres RGB se conserva la misma configuración, la medición y el cálculo se hacen de la misma forma que en el holograma, sin embargo, la referencia pasa a ser una muestra blanca de alta reflectancia (LABSPHERE SRS-99).

La diferencia de color fue hallada a partir de la ecuación (8), se calcularon varias diferencias de color, variando los valores teóricos o los experimentales así:

- Valores Teóricos reportados por el fabricante de la carta Macbeth ColorChecker®, que consisten en CIE-L*a*b* bajo un iluminante D50 y valores experimentales para el holograma iluminado con láseres RGB.
- Valores Teóricos reportados por el fabricante de la carta Macbeth ColorChecker®, que consisten en CIE-L*a*b* bajo un iluminante D50 y valores experimentales para el holograma iluminado con lámpara de Xenón.

- Valores Teóricos CIE-L*a*b* medidos en laboratorio para la carta Macbeth ColorChecker® bajo iluminación conformada por láseres RGB, y valores experimentales para el holograma iluminado con láseres RGB. Ya que en este caso, los valores teóricos no son brindados por el fabricante de la carta, fueron medidos en el laboratorio por medio del mismo montaje de la Figura 23, con la diferencia que en vez del holograma, se ubicaba la carta de color física.

Una interfaz que ya viene incluida con el miniespectrómetro ORIEL permite obtener las distribuciones espectrales para las muestras, estos datos son llevados a Matlab® y procesados para trabajar sólo con el espectro visible (400-700nm), con resolución de 1nm.

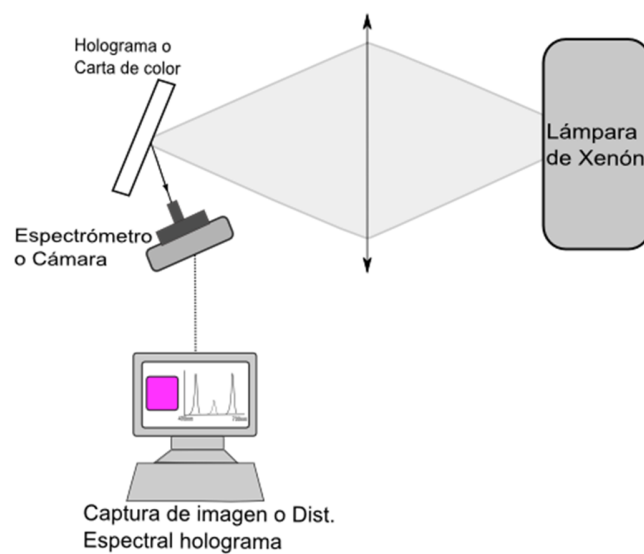


Figura 22. Montaje para medición en imágenes holográficas o carta física iluminados con lámpara de Xenón, equipo: cámara o espectrómetro.

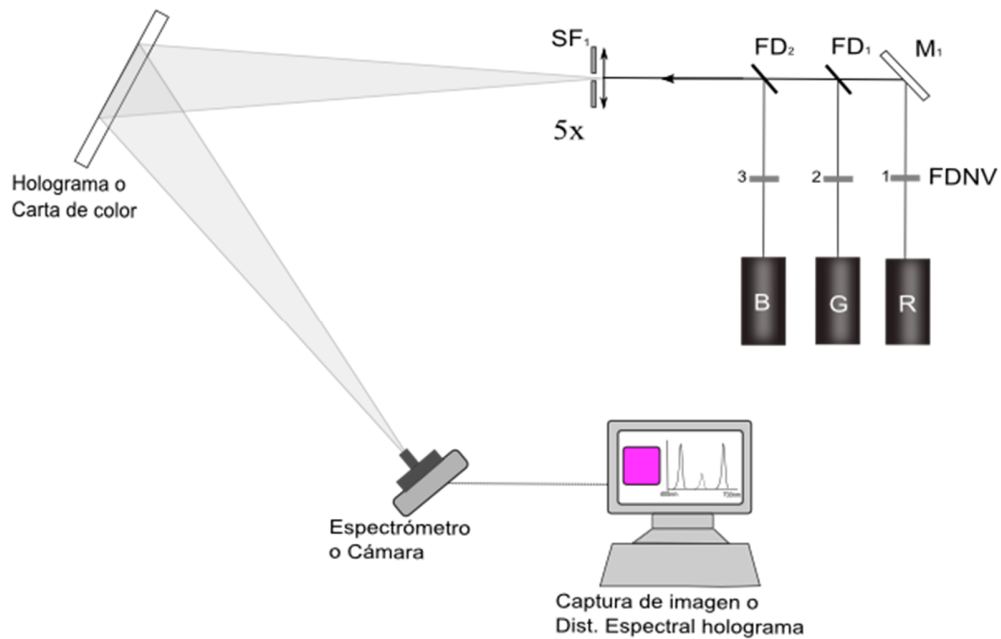


Figura 23. Montaje para medición en imágenes holográficas o carta física iluminados con láseres RGB, equipo: cámara o espectrómetro.

3.3.2. Medición de color con cámara.

Se utilizan los mismos arreglos de la Figura 22 y Figura 23 pero utilizando como sensor una cámara CMOS RGB Thorlabs DCC1645C. Como muestras se tomaron igualmente tanto el holograma de la carta de color, como la carta de color bajo iluminación de tres láseres RGB o bajo lámpara de Xenón. La diferencia de color ΔE fue calculada de la misma forma que con los valores CIE-L*a*b* del espectrómetro. Previo al cálculo de las coordenadas CIE-L*a*b* las imágenes capturadas por la cámara pasan por un proceso de ajuste de blanco, linealización y caracterización:

3.3.2.1. Ajuste de blanco en la cámara.

Este procedimiento consiste, bien sea con lámpara de Xenón o láseres RGB, en adecuar los parámetros de la cámara de forma tal que, las coordenadas RGB entregadas sean independientes de estos. Para ello, se usa la carta Macbeth ColorChecker, específicamente el color blanco-19 de la misma, del cual se conocen sus coordenadas RGB, al ajustar los parámetros de la cámara para esta muestra de color las coordenadas RGB deberán ser: R=243, G=243, B=242. Dichos parámetros son:

- a. **Ganancias Canales RGB:** Cada canal, bien sea R, G o B pueden ser amplificados en una ganancia de 0 a 100. Como se explicó anteriormente, las cámaras CMOS o CCD tienen

cierto arreglo de filtros basado en un arreglo Bayer donde se da cierta predilección por el color verde, esto debido a la sensibilidad muy alta del ojo humano hacia esta región del espectro. Debido a esto, las ganancias de cada canal deben ser tal que la muestra blanca de la carta Macbeth ColorChecker debe ser lo más uniforme posible, o incluso, cualquier muestra de la escala de grises de la misma.

- b. Factor Gamma:** Este parámetro debe mantenerse deshabilitado. Pues consiste en un proceso de linealización automático que realiza el sensor para la imagen.
- c. Tiempo de Exposición, Ganancia General de la Cámara:** Estos parámetros deben ajustarse a un valor que permitan llegar a las coordenadas RGB esperadas para la muestra blanca. Se recomienda, preferiblemente mantenerlos lo más bajos posibles y compensarlo con la apertura del diafragma de la cámara.

Una vez ajustados los parámetros de la cámara, de acuerdo a los RGB esperados para la muestra blanca de la carta, se recomienda mantenerlos iguales durante todas las medidas, sin embargo, para hologramas de bajas eficiencias de difracción en ocasiones será necesario aumentar el tiempo de exposición o la ganancia general de la cámara pero nunca variar las ganancias individuales de los canales RGB ya que esto puede afectar la medición del color.

3.3.2.2. Linealización de Cámara.

La linealización se llevó a cabo por medio del método de reflectancias de muestras neutras que se explicó previamente en el Capítulo 2. Para esto fue necesario medir con espectrómetro las reflectancias de las muestras neutras de la carta Macbeth ColorChecker® y adquirir sus respectivas imágenes, a continuación, estas reflectancias e imágenes fueron ingresadas a un algoritmo programado en Matlab® que ejecutaba la linealización por medio de mínimos cuadrados; corrigiendo, tanto los valores RGB de las muestras neutras así como los de las muestras de color a ser usadas en la caracterización. Este algoritmo halla el factor gamma (γ) de la ecuación (8).

3.3.2.3. Caracterización de Cámara.

En la caracterización es necesario adquirir con la cámara de 3 a 6 muestras de color de la carta Macbeth ColorChecker® con sus respectivas reflectancias medidas con espectrómetro. A continuación las imágenes pasan por el algoritmo de linealización, donde se les aplica el factor gamma (γ) hallado previamente.

Los valores RGB linealizados en conjunto con las reflectancias de las mismas muestras van a un algoritmo en Matlab® que se encarga de encontrar la matriz de transformación de RGB a XYZ también por mínimos cuadrados.

3.3.2.4. Medición de color en hologramas con cámara linealizada y caracterizada.

Las imágenes de los hologramas son adquiridas, para finalmente ser llevadas al proceso de linealización (aplicar exponente gamma) y caracterización, es decir, a los valores RGB linealizados de la imagen del holograma, se le aplica la matriz de transformación de RGB a XYZ hallada anteriormente. Una vez calculados los valores XYZ, los valores CIE-L*a*b* para el holograma son hallados por transformación directa, así como se procedió con las medidas del espectrómetro. Todas estas operaciones son realizadas en un algoritmo en Matlab® basado en [21].

3.3.3. Caracterización del LCD con espectrómetro.

Los procedimientos explicados en la secciones 3.3.1 y 3.3.2 para medición de color sobre imágenes holográficas con espectrómetro y cámara respectivamente, consisten en métodos generales que bien pueden ser aplicados tanto para los hologramas registrados a partir de objetos físicos como para hologramas a partir de imágenes presentadas en LCD; sin embargo, se presentan unas variantes, una de ellas con respecto al montaje de reconstrucción del holograma, esto debido a la misma configuración del arreglo de registro empleado a partir de una imagen presentada en LCD, además, las diferencias de color a calcular también varían; ya que en este caso el objeto a registrar no consiste en un objeto físico como comúnmente se realiza, sino que se está tratando con objetos “digitales”, más específicamente imágenes construidas digitalmente, presentadas sobre un LCD, por lo cual, además de las comparaciones de rigor entre objeto físico y holograma, es necesario calcular una diferencia de color adicional que busca encontrar los cambios que haya sufrido el color entre el paso de presentación sobre LCD en relación al holograma final reconstruido. Es por esto que a continuación se hace énfasis sobre la caracterización del dispositivo LCD.

Debido a que se desconocen las características de color con las cuales trabaja el monitor LCD RGB empleado, se hace necesaria una caracterización de este dispositivo para conocer su funcionamiento relacionado con la gestión del color. Como se mencionó en el capítulo 2, este tipo de dispositivos son de gran importancia para la colorimetría, pues son una herramienta común en

la visualización de imágenes para el usuario. Específicamente, en este trabajo, ya que es un elemento que se emplea en el registro de hologramas a color a partir de imágenes construidas digitalmente y presentadas sobre el mismo, es una de las etapas intermedias de registro; al ser un dispositivo que trabaja con imágenes del tipo R, G, B, es necesario controlar sus parámetros, a partir de un conocimiento de sus características de gestión del color.

3.3.3.1. Ajuste de Blanco en el LCD.

La caracterización del LCD se describe en la Figura 24, este montaje es muy similar al que se usó en la medición de color en la carta Macbeth ColorChecker® con láseres RGB, donde, nuevamente por medio de los tres filtros de densidad neutra la intensidad de cada láser es ajustada; y los filtros dicróicos DF1, DF2 en conjunto con el espejo M1 permiten la mezcla de las tres fuentes, generando una iluminación blanca; un espejo M2 se encarga de llevar la iluminación hacia el LCD.

Para asegurarse que la iluminación que llega al LCD es blanca o muy similar a este color, se situó el espectrómetro inmediatamente antes del LCD, es decir, se tomó una curva de análisis espectral a la entrada de este dispositivo; para esto, en el espectrómetro se capturaron las intensidades de los tres láseres a medida que se van variando los filtros de densidad neutra (NDF), hasta que todas fueran iguales, en este caso, este procedimiento corresponde a un *Ajuste de Blanco*, la intensidad entregada por el espectrómetro se almacenó ya que se requiere para cálculos posteriores de color, además de ser la curva espectral de entrada, también constituye la fuente de referencia. Para las medidas posteriores, las posiciones de los filtros de densidad Neutra no se modificaron.

3.3.3.2. Presentación de Escala de Grises en LCD.

Mediante un algoritmo en Matlab® basado en la referencia [26] se presentaron imágenes de muestras de color en la pantalla del computador, el cual se encontraba conectado de forma compartida al LCD del montaje, este permitía ajustar las coordenadas RGB de cada muestra. Para la escala de grises se construyeron imágenes con valores RGB iguales: desde 0 a 255, con pasos de 32, es decir, se presentaron 9 imágenes así: $R=G=B= 0, 32, 64, 92, 128, 160, 192, 224$ y 255.

3.3.3.3. Presentación de valores RGB en LCD por separado.

La presentación de estas imágenes fue muy similar a la anterior, donde, a diferencia de presentar los valores R, G, B iguales, se presentaron valores de $R= 0$ hasta 255 con pasos de 32 manteniendo los canales G y B en 0. Así mismo se hizo para el canal Verde (G) manteniendo los canales azul y

rojo en 0, como para el canal Azul (B) manteniendo los canales rojo y verde en 0. Tanto este procedimiento como el anterior también fueron aprovechados para capturar imágenes del LCD con la cámara CMOS RGB.

3.3.3.4. Presentación de Muestras de Carta Macbeth ColorChecker en LCD.

Se consideraron dos situaciones:

Con el ajuste de blanco a la entrada del LCD: Debido a que se conocían por medio del fabricante las coordenadas RGB de las muestras de la carta Macbeth ColorChecker®, estas fueron construidas digitalmente y presentadas en el LCD. Específicamente, las muestras presentadas fueron nuevamente, (de acuerdo a la Figura 10) los colores Azul-13, Verde-14, Rojo-15, Amarillo-16, Magenta-17, y Cyan-19. En esta prueba no se realizó ningún cambio en la posición de los filtros de densidad neutra (FNDV) que controlaban la intensidad de entrada al LCD, es decir, se mantenía una iluminación blanca de intensidades iguales para los láseres R, G y B a la entrada del LCD.

Con el ajuste de blanco a la salida del LCD: Como se mencionó en el paso anterior, para todas las medidas tomadas no se realizó ninguna modificación de la posición de los filtros de densidad neutra en el montaje, sin embargo, observando la salida del LCD con una muestra de blanco, $R=G=B=255$ en el espectrómetro se encontró que el canal verde se encontraba mucho más alto que los otros dos, debido a esto también se realizaron las medidas anteriores con la fuente de iluminación ajustada a la salida del LCD. Para esto, se observaron las intensidades RGB en el espectrómetro a la salida del LCD con una imagen construida $R=G=B=255$, la finalidad de este procedimiento fue muy similar a la del ajuste del blanco, con la diferencia que se hizo a la salida del LCD, no a la entrada; a medida que se iban observando las intensidades RGB sobre el LCD se ajustaron los filtros de densidad neutra (FNDV) de forma tal que las intensidades RGB de la imagen presentada y observada en el espectrómetro fueran iguales o similares; paso a seguir, de la misma forma que en la prueba anterior, se presentaron sobre el LCD las muestras 13 a la 19 de la carta de color construidas digitalmente y se tomaron sus respectivas curvas de distribución espectral (sin modificar los filtros de densidad neutra). El comportamiento del LCD para los canales R, G, B se presentan más adelante, en la sección 4.3.

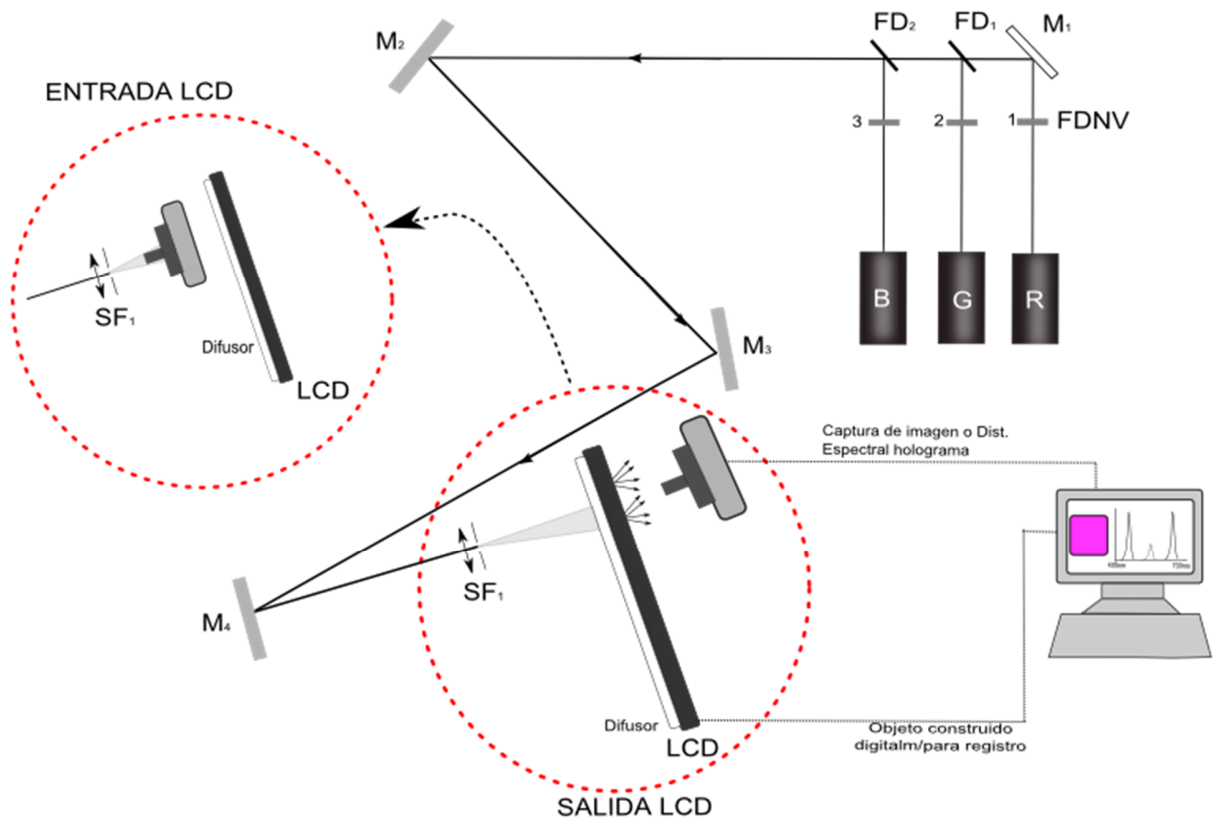


Figura 24. Esquema para la medición de color en LCD (caracterización) con espectrómetro o cámara.

3.3.4. Medición de color en hologramas generados a partir de la presentación de un objeto digitalizado sobre LCD.

Para la medición de color sobre estos hologramas con espectrómetro (ver detalle en la Figura 25) o cámara se utiliza el haz de referencia de la Figura 19 empleado para reconstruir los hologramas con iluminación láser RGB. Para la medición en hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón se empleó el mismo montaje que en la medición en hologramas a partir de objetos físicos (ver Figura 22). Básicamente, el procedimiento es igual que el descrito en la sección 1.4 para medición con espectrómetro y 3.3.2 para medición con cámara.

Como se describió al inicio de la sección 3.3, para este tipo de hologramas, las comparaciones no sólo se realizan entre el objeto físico y su respectivo holograma, debido a la etapa de presentación sobre la pantalla LCD, una vez realizada su caracterización, también se realiza la comparación entre las coordenadas de color vistas sobre este dispositivo iluminado con láseres RGB y el holograma reconstruido con este mismo tipo de fuente de iluminación.

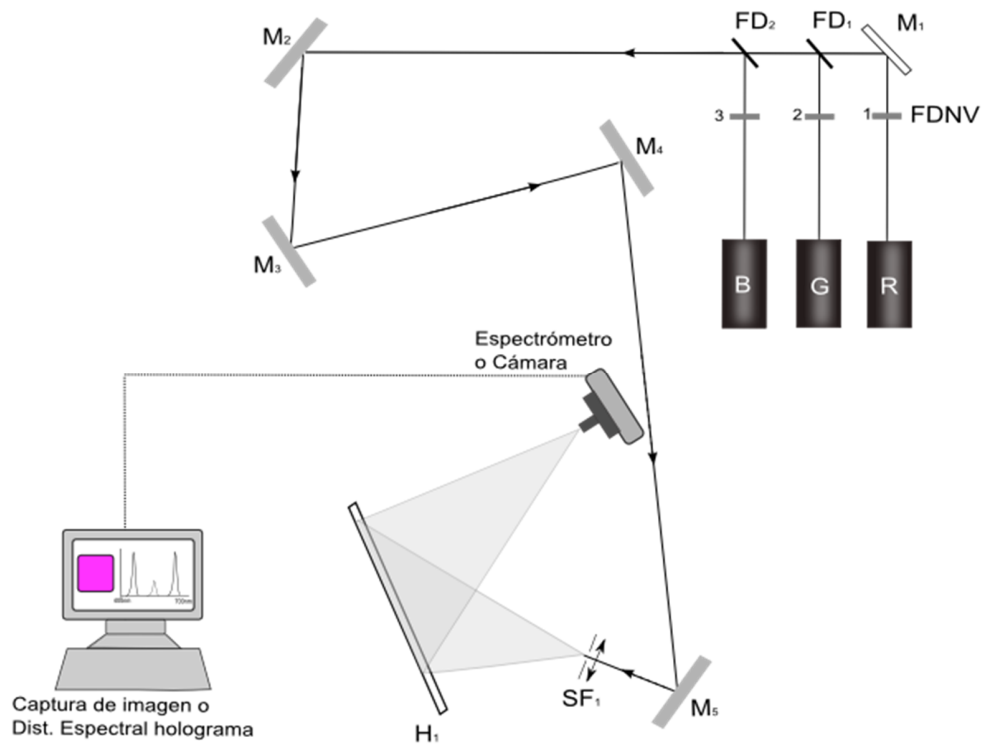


Figura 25. Esquema para la medición de color en imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos digitales presentados en LCD con espectrómetro o cámara.

4. RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación consisten en las medidas realizadas con los montajes descritos en el capítulo anterior; en su mayoría son resultados obtenidos bajo el mismo procedimiento, es decir, consisten en el registro de hologramas de rayo simple con láser RGB a partir de dos opciones de objeto:

1. Objeto físico o real, que en este caso, consiste en la carta de color Macbeth ColorChecker en formato grande: 21.59 x 27.94 cm o pequeño, la carta se detalla en la Figura 26 (a), iluminada con lámpara de Xenón y Figura 26 (b) con láseres RGB.
2. Objeto construido digitalmente y presentado en la pantalla LCD a color descrita anteriormente a partir de los valores RGB entregados por el fabricante de la carta (Ver Figura 26 (c)).

De acuerdo a la Figura 26 (c), las muestras registradas fueron siete: Azul-13, Verde-14, Rojo-15, Amarillo -16, Magenta-17, Cyan-18, y Blanco-19, los cuales consisten en colores primarios, secundarios y un color neutro. Una vez registrados sus correspondientes hologramas, cada uno de ellos son reconstruidos mediante dos tipos de fuentes: 1. Lámpara de Xenón, la cual tiene un espectro similar al de un iluminante tipo D65 o luz día, Figura 26 (a) y 2. Láseres RGB que son los mismos empleados en el registro, Figura 26 (b). El uso de la lámpara de Xenón se basa en el hecho de que se desea que el holograma al ser reconstruido sea lo más similar posible a su objeto original; de acuerdo al fabricante, las coordenadas de color de este objeto original (carta de color) son obtenidas bajo iluminantes tipo luz día, razón por la cual se realiza esta reconstrucción con una fuente de Xenón, que tiene un espectro muy similar a un iluminante tipo D65; por otro lado, la reconstrucción con láseres RGB se realiza debido a que el registro se hace con este tipo de fuente, nuevamente, se busca comparar el objeto original, iluminado con láseres, en la etapa de registro, con su respectivo holograma, razón por la cual también se reconstruye con láseres; es decir, se tendría además una comparación de las coordenadas del objeto con las fuentes de la etapa de registro (láseres) y con las fuentes que normalmente un usuario observa el objeto original (lámparas tipo luz día).

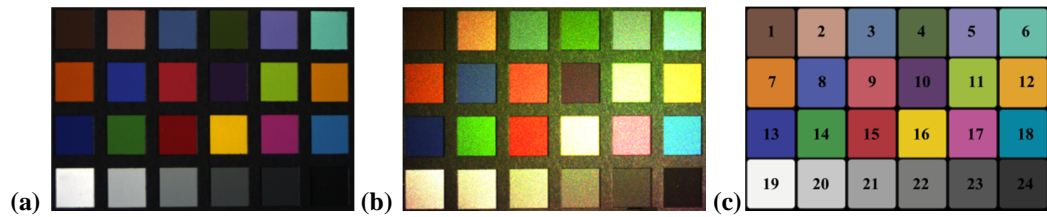


Figura 26. Carta de color MACBETH COLORCHECKER®, (a) Carta física iluminada con lámpara de Xenón, (b) Carta física iluminada con láseres RGB, (c) Construida digitalmente.

Muestra	Color	Coordenadas del fabricante						Medidas en laboratorio		
		L*	a*	b*	R	G	B	L*	a*	b*
13	Azul	28,778	14,179	-50,297	56	61	150	45,50	24,83	-18,14
14	Verde	55,261	-38,342	31,37	70	148	73	64,04	-3,68	34,17
15	Rojo	42,101	53,378	28,19	175	54	60	48,09	71,40	24,82
16	Amarillo	81,733	4,039	79,819	231	199	31	80,95	13,49	76,20
17	Magenta	51,935	49,986	-14,574	187	86	149	56,08	56,27	1,87
18	Cyan	51,038	-28,631	-28,638	8	133	161	66,68	-5,97	-11,37
19	Blanco	96,539	-0,425	1,186	243	243	242	101,68	-7,23	-0,8

Tabla 2. Coordenadas de la carta de color Mabeth ColorChecker, de acuerdo al fabricante (CIE-L*a*b* bajo D50, RGB bajo D65; y de acuerdo a mediciones hechas en laboratorio, iluminando con láseres RGB).

Una vez reconstruidos los hologramas con las fuentes mencionadas, se realizan las mediciones a partir de los métodos descritos anteriormente: uno basado en espectrómetro (miniespectrómetro marca ORIEL) y el otro con cámara a color (cámara THORLABS CMOS RGB). Como se explicó en el capítulo 3, las mediciones con espectrómetro buscan encontrar curvas de análisis espectral de los hologramas, lo cual se realiza tomando la fuente de referencia (lámpara de reconstrucción), y obteniendo curvas de eficiencia de difracción de los hologramas, en este caso ya no se habla de curvas de reflectancia u absorbancia, ya que el color en los hologramas no es generado por estos fenómenos, en este caso se trata de la luz de la fuente de reconstrucción difractada por el holograma. La relación entre la luz difractada por el holograma y la fuente de referencia o reconstrucción se emplea en un algoritmo programado en Matlab®, basado en algoritmos de diversos autores [21] el cual consiste en obtener los valores CIE-xy, y CIE-XYZ de los hologramas, para finalmente, calcular a partir de éstos sus coordenadas CIE-L*a*b*.

Calculadas las coordenadas CIE-L*a*b* de los hologramas, se comparan con las coordenadas CIE-L*a*b* entregadas por el fabricante de la carta física, (Ver Tabla 2), y también con las coordenadas de la carta física iluminada con láseres RGB; debido a que las medidas sobre el objeto físico iluminado con láser no se conocen, se realizaron en el laboratorio (Ver Figura 23), todos estos valores se tomaron como valores teóricos, mientras que los obtenidos con los hologramas

reconstruidos consisten en los valores experimentales. Estas comparaciones buscan encontrar las diferencias de color ΔE a partir de la ecuación (6). Diferencias de color pequeñas indican buena reproducibilidad del color, y de modo contrario, diferencias grandes indican baja reproducibilidad del color. El algoritmo programado basado en Westland et al, [21] también muestra los resultados de los hologramas en un mapa de coordenadas CIE-xy y CIE-a*b*; específicamente en el mapa CIE-a*b*, se comparan los resultados simultáneamente con sus valores teóricos de forma vectorial; en estos mapas, magnitudes grandes indican diferencias grandes de color y nuevamente, magnitudes pequeñas indican buena reproducibilidad. Cabe resaltar que estas diferencias de color grandes o pequeñas se refieren a comparaciones realizadas entre reproducibilidades de los hologramas; es decir, entre los valores arrojados por todos los hologramas reconstruidos, se evaluó cuál tenía la mayor y cuál la menor diferencia de color.

Las coordenadas CIE-L*a*b* con cámara a color también son obtenidas a través de un algoritmo programado en Matlab®, basado en las referencias [21], [24] y [25], el cual realiza la linealización de los valores RGB entregados por la cámara, su transformación a valores CIE-XYZ y posterior conversión a CIE-L*a*b*; las diferencias de color son calculadas de la misma forma que con los valores generados con el espectrómetro, y los resultados son presentados de la misma forma; los procedimientos de linealización y caracterización son descritos en los capítulos 2 y 3.

Posteriormente, se presenta la caracterización realizada a la pantalla LCD con espectrómetro y cámara; dicha caracterización consistió en obtener, nuevamente las coordenadas CIE-L*a*b* de la pantalla LCD con las muestras de la carta Mabeth ColorChecker construidas de forma digital a partir de los valores RGB reportados por el fabricante y presentadas sobre el dispositivo, para luego ser comparadas con las coordenadas de la Tabla 2, es decir, con las coordenadas del objeto físico. La caracterización con cámara no buscó obtener las coordenadas RGB del dispositivo para las muestras registradas, este paso buscó generar las curvas típicas “S” de una pantalla de este tipo de acuerdo a lo descrito en el capítulo 2. Con la caracterización de este dispositivo se busca, como previamente se ha dicho, controlar cada una de las etapas del proceso de registro de los hologramas, en este caso, más específicamente, será la de registro a partir de imagen presentada en un LCD, además, conocer las coordenadas CIE-L*a*b* de las muestras de la carta de color sobre el LCD permite analizar los cambios que ha sufrido la muestra entre la etapa de registro y la reconstrucción final del holograma.

Al final de este capítulo se muestran diversas diferencias de color, relacionadas en especial con los valores CIE-L*a*b* de los hologramas a partir de objeto físico, comparados con los de los valores del holograma generado a partir de objeto presentado en pantalla LCD, cubriendo así el proceso completo que busca la gestión del color del presente trabajo.

Los algoritmos programados en Matlab® fueron llevados a una interfaz gráfica en el mismo programa, de modo tal que fuese más sencillo realizar la medición de color mediante cámara o espectrómetro; el usuario selecciona un método de medición, la muestra a analizar, e introduce las coordenadas CIE-L*a*b* teóricas con las cuales se realizará la comparación. Esta interfaz gráfica es descrita más a fondo en la sección de Anexos. Además de realizarse medición, también se puede construir digitalmente una muestra de color para ser presentada en pantalla LCD, en este caso el usuario ingresa la resolución de la pantalla, coordenadas (x, y) donde desea ver la muestra y valores R, G, B, de la misma. Esta presentación de imágenes en LCD se encuentra basada en la referencia [26].

La comparación entre las imágenes holográficas reconstruidas con sus correspondientes objetos registrados se presentan también en la sección de anexos.

4.1. Medición de color con espectrómetro sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos físicos.

Los hologramas presentados a continuación consisten en los registros hechos a partir del montaje de la Figura 18, es decir, hologramas registrados a partir de objeto físico: carta Mabeth ColorChecker, muestras 13 a la 19, (Ver Figura 26 (c)). Estos hologramas fueron reconstruidos con lámpara de Xenón, y con los láseres de registro RGB. Sus curvas espectrales con espectrómetro se generaron mediante el arreglo de la Figura 22 para reconstrucción y medición con lámpara de Xenón y Figura 23 para la reconstrucción y medición con láseres RGB. La distribución espectral de la lámpara de Xenón se muestra en la Figura 27.

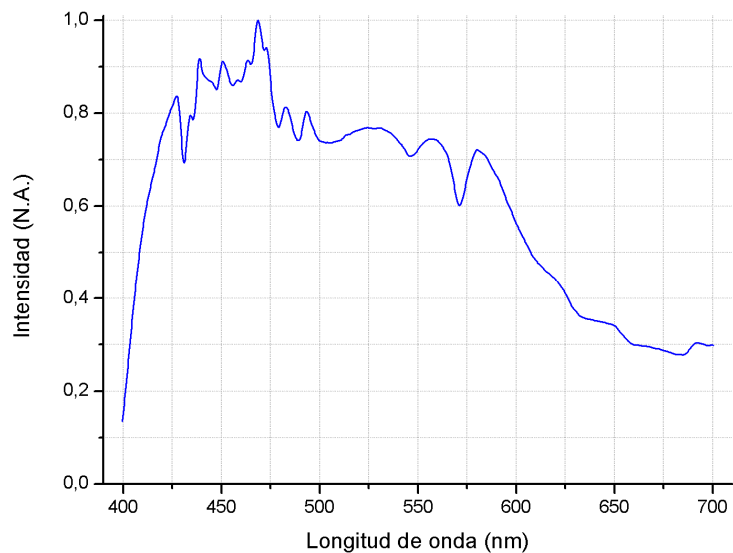


Figura 27. Distribución espectral de la lámpara de Xenón empleada en la reconstrucción de los hologramas.

4.1.1. Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón

A continuación se presentan, en la Tabla 3, los resultados obtenidos de las diferencias de color para los hologramas a partir de objetos físicos reconstruidos bajo lámpara de Xenón (Ver Figura 27). Las imágenes correspondientes a estos hologramas se muestran en la Figura 28. La Figura 29 representa las coordenadas CIE-xy para estos hologramas, en este diagrama se pueden apreciar las longitudes de onda de reconstrucción. En la Figura 30 (a) las coordenadas cromáticas a^*b^* de los hologramas reconstruidos son comparadas con las coordenadas teóricas dadas por el fabricante de la carta bajo iluminante D50, en la Figura 30.b, los valores experimentales son los mismos, mientras que los teóricos son los medidos para la carta de color bajo iluminación tipo láser RGB.

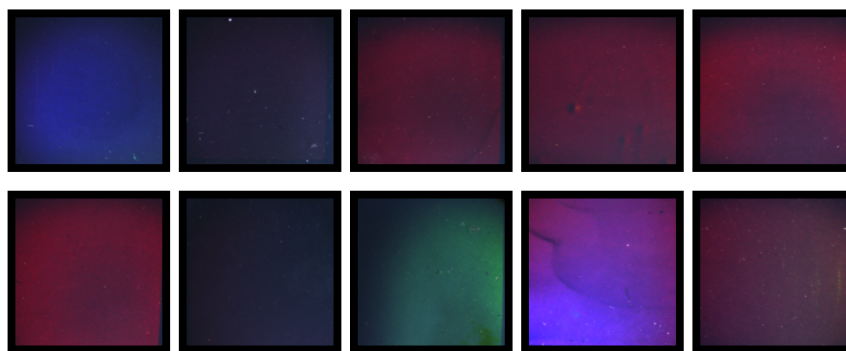


Figura 28. Imágenes de hologramas de la carta de color, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: h19 (Azul), h20 (Verde con láseres RGB), h21 (Rojo), h22 (Amarillo), h23 y h24 (Magenta), h25 (Cyan), h26 (Verde con láser G), h27 (Blanco), h28 (Amarillo). Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón.

Muestra	Holograma	Color Registrado	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)
13	h19	Azul	30,13	22,83
14	h20	Verde	66,41	46,43
	h26		20,79	41,31
15	h21	Rojo	36,22	47,94
16	h22	Amarillo	96,46	91,17
	h28		94,20	88,60
17	h23	Magenta	19,30	20,26
	h24		22,41	24,60
18	h25	Cyan	46,50	23,84
19	h27	Blanco	69,58	72,90

Tabla 3. ΔE entre hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón Vs. Valores CIE-L*a*b* carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.

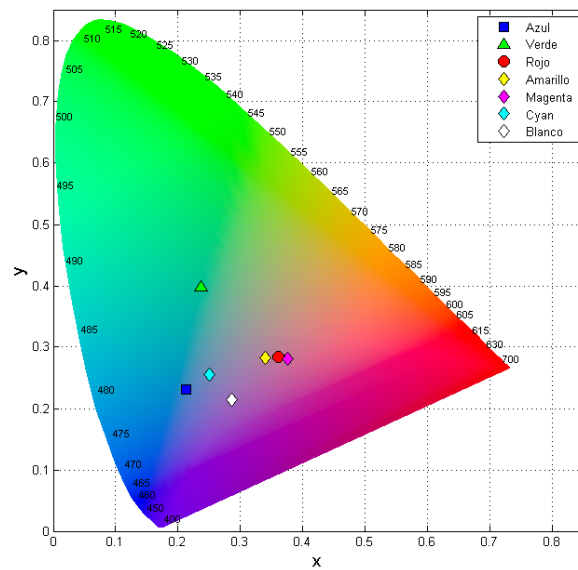


Figura 29. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, reconstrucción con lámpara de Xenón.

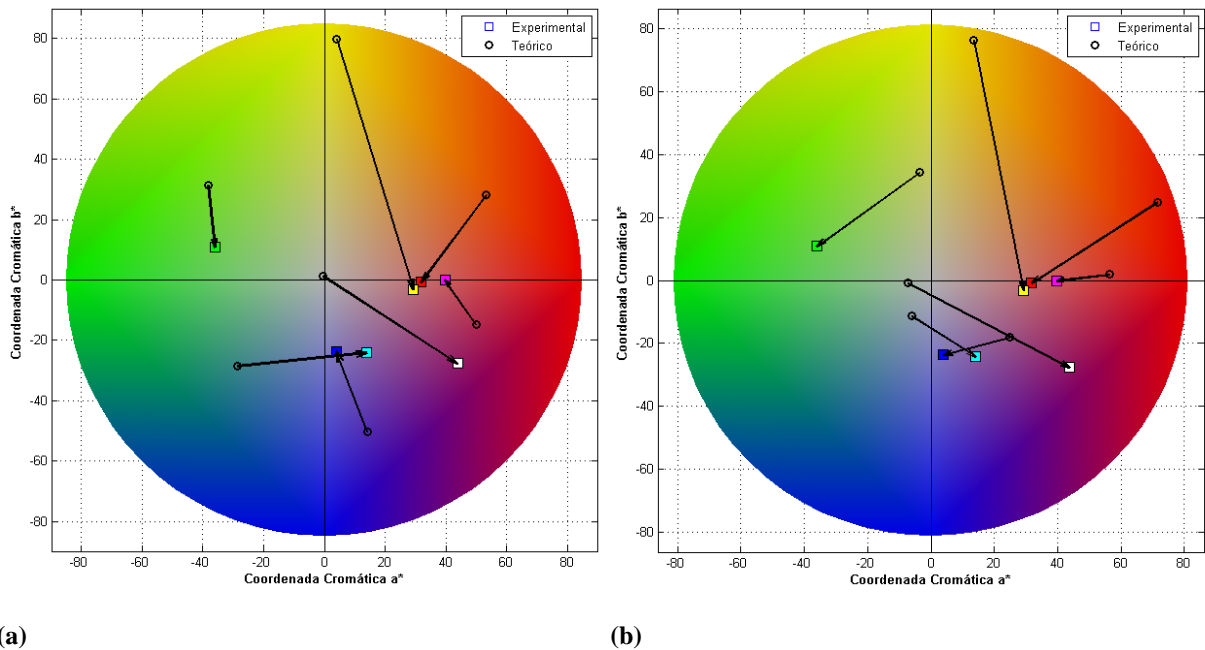


Figura 30. Diferencias CIE-a*b* entre valores experimentales de hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón (a) Comparado con CIE-a*b* de la carta de color física (valores teóricos dados por el fabricante). (b) Comparado con CIE- a*b* carta de color física iluminada con láseres RGB.

De acuerdo a la Tabla 3, se observa que la menor diferencia de color está para el holograma de la muestra del color 17-Magenta, tanto para la comparación con valores teóricos dados por el fabricante así como para los valores teóricos de la carta iluminada bajo láseres RGB. Este comportamiento está relacionado a la película empleada, ya que el material PFG-03C presenta una mejor eficiencia de difracción hacia longitudes de onda altas (rojo).

El comportamiento anterior también se verifica para los colores que presentaron altas diferencias de color como las muestras 16-Amarillo y 14-Verde; debido a que la película presenta una sensibilidad más baja hacia colores como el verde (razón por la cual el porcentaje de exposición para esta longitud de onda es alto en comparación con el azul y rojo), adicionalmente, el láser verde del montaje no permitió un adecuado registro de muestras con composición hacia estas longitudes de onda, esto se debe a que los láseres azul y especialmente el verde presentan saltos de modo (mode hopping), fenómeno relacionado con la aparición de varios modos de oscilación, producto de la falta de estabilidad en la cavidad resonante del láser; este fenómeno fue observado cualitativamente en un proyecto previo con la aparición de franjas de interferencia que siguen el contorno topográfico del objeto y que aparecen en el holograma debido a que en el momento de registro intervienen dos o más longitudes de onda [7]. En el presente trabajo, dicho fenómeno de

franjas de interferencia no es tan notorio en los hologramas a partir de objeto físico pero sí en aquellos registrados a partir de la presentación sobre LCD (que se muestra más adelante), lo que se manifestó cualitativamente fue una baja eficiencia de difracción para los registros de las muestras 14-Verde, 16-Amarillo y 18-Cyan; verificándose cuantitativamente en la medición de altas diferencias de color.

Contrario a este comportamiento, el holograma h26 correspondiente a la muestra 14-Verde, que sólo fue registrada con láser verde presentó menor diferencia de color al compararse con la diferencia de color del holograma h20, que es la misma muestra 14-Verde, registrada con los tres láseres, (ver Tabla 3). Estos resultados se explican bajo el hecho de que, el holograma h26 fue registrado con un solo láser, es decir, toda la potencia aplicada y los cálculos de tiempo de exposición se realizan para un solo láser, mientras que cuando se registra con los tres láseres todos estos valores son compartidos, siendo el color verde el más afectado (debido al comportamiento del láser y sensibilidad de la película ya mencionados). Si bien la alta eficiencia de la película y del montaje hacia longitudes de onda altas beneficia el registro de objetos de estos colores, también afecta el de otros como lo es el amarillo, esto se puede ver en la representación de muestras amarillas en la Figura 29 y Figura 30 donde los valores experimentales son muy cercanos hacia zonas rojizas, alejándose de las verdosas. De hecho, casi todas las muestras tratan de acercarse hacia la zona rojiza, lo cual es mucho más notorio en la Figura 30, donde todos los vectores apuntan hacia esta región. En la Figura 28, se nota una buena eficiencia de difracción para muestras como el Rojo-15 (holograma h21) y el Azul-13 (holograma h19), cabe añadir, que la lámpara de Xenón tiene altas componentes hacia longitudes de onda bajas lo cual favorece la reconstrucción de los hologramas con componentes de este color; además que la película presenta también buena eficiencia para el mismo.

4.1.2. Hologramas reconstruidos con láseres RGB

Los hologramas registrados a partir de la carta de color física también fueron reconstruidos con láseres RGB, las imágenes se muestran en la Figura 32, los valores obtenidos de las diferencias de color ΔE entre los valores CIE-L*a*b* de estos hologramas Vs. Los valores reportados por el fabricante y los de la carta física iluminada bajo láseres se muestran en la en la Tabla 4. La Figura 33 representa los valores CIE-xy de estos hologramas y la Figura 34 representa los vectores diferencia a*b*entre los hologramas reconstruidos Vs. los valores reportados por el fabricante de

la carta y Vs. los valores de la carta física iluminada bajo láseres RGB. El detalle de la distribución espectral de potencia de los láseres de reconstrucción se muestra en la Figura 31.

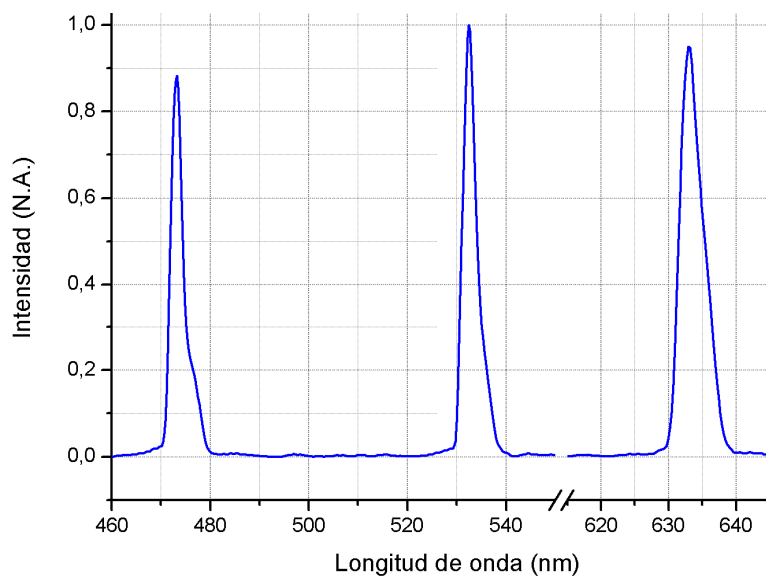


Figura 31. Distribución espectral de los láseres empleados en la reconstrucción de los hologramas.

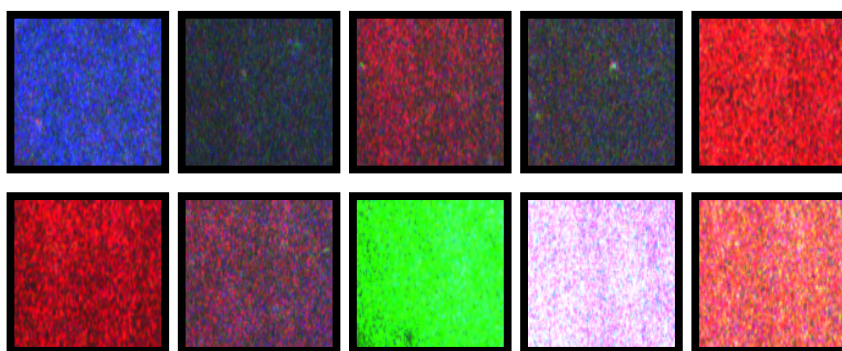


Figura 32. Imágenes adquiridas para hologramas reconstruidos con láseres, registrados a partir de carta de color física, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: h19 (Azul), h20 (Verde con RGB), h21 (Rojo), h22 (Amarillo), h23 y h24 (Magenta), h25 (Cyan), h26 (Verde con G), h27 (Blanco), h28 (Amarillo).

Muestra	Holograma	Color Registrado	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)
13	h19	Azul	37,35	49,94
14	h20	Verde	72,27	56,73
	h26		147,94	165,32
15	h21	Rojo	47,87	53,75
16	h22	Amarillo	110,37	104,54
	h28		108,45	99,20
17	h23	Magenta	44,15	35,22
	h24		107,10	97,34
18	h25	Cyan	69,10	48,22
19	h27	Blanco	54,96	60,67

Tabla 4. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB Vs. Valores teóricos de la carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.

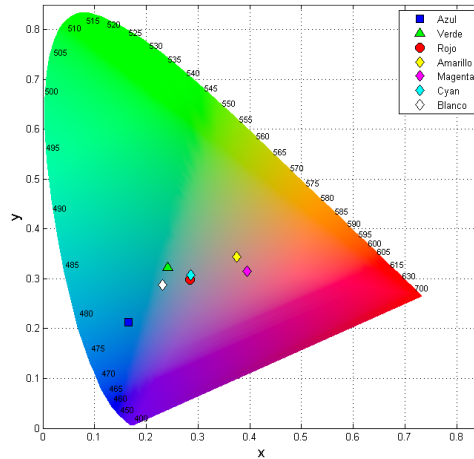


Figura 33. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, reconstrucción con láseres RGB.

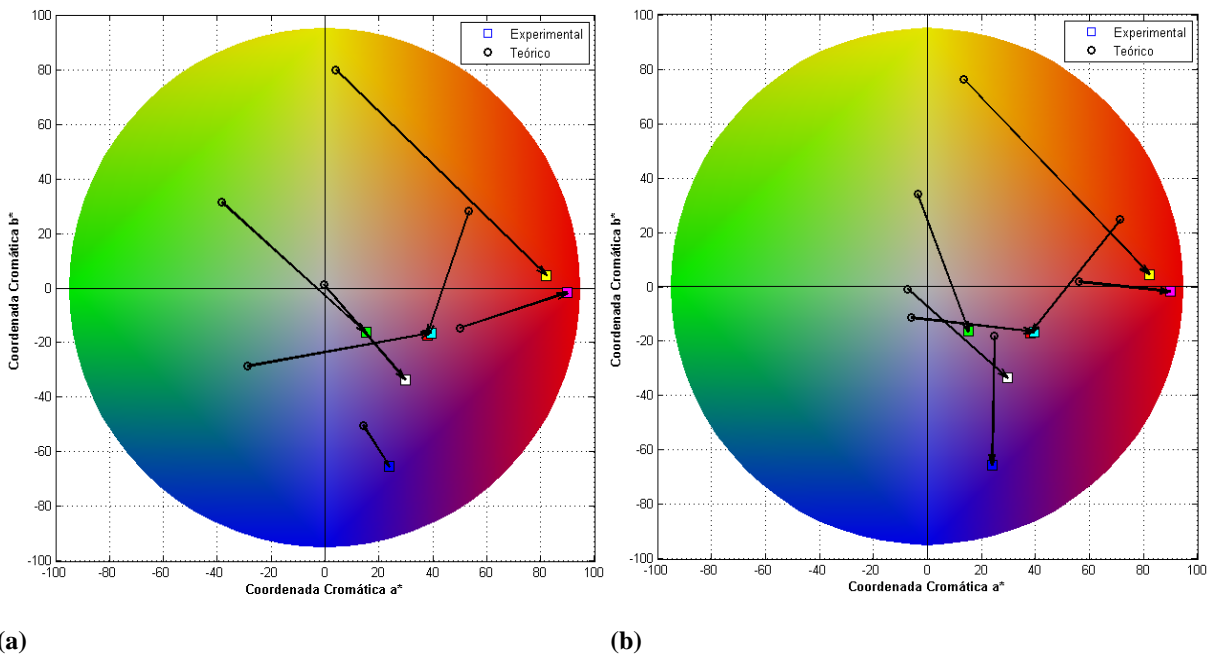


Figura 34. Valores a*b* para los hologramas reconstruidos con láseres RGB (valores experimentales) (a) Vs. Valores a*b* para la carta de color física de acuerdo al fabricante. (b) Vs. Valores a*b* para la carta de color física iluminada con láseres RGB.

En la Figura 34 nuevamente se puede observar el comportamiento explicado anteriormente, todas las coordenadas a*b* de los hologramas apuntan hacia la región del rojo en los diagramas. Los hologramas que presentaron mayor diferencia de color fueron h26 (Verde-14), registrado únicamente con el láser verde y h22 (Amarillo-16); mientras que los hologramas h23 correspondiente a la muestra Magenta-17 y h19 (Azul-13) arrojaron las menores diferencias de color.

En la Figura 33 y Figura 34 no se representa el holograma h26 (registro de muestra verde -14), sino el h20, esto se explica en el hecho de que el holograma h26 además de haber sido registrado con láser verde (únicamente) también se está reconstruyendo con láser razón por la cual sus coordenadas CIE-xy y CIE-a*b* son mucho mayores que las teóricas resultando entonces en diferencias de color muy grandes; si se observa la Figura 32 donde se detalla la imagen del holograma h26 se notará este efecto, ya que se observa con una coloración demasiado verdosa, casi del color mismo del láser. El efecto presentado para el holograma h26 no sucedió con el holograma h20 que es la misma muestra (Verde-14) registrada con láseres RGB reconstruida con los mismos láseres. Cabe resaltar que los hologramas h20 y h26 correspondientes ambos a la misma muestra: Verde 14 en general, presentan altas diferencias de color en comparación con el resto de hologramas.

Se realizaron medidas a hologramas que ya habían sido registrados en el laboratorio de Óptica Aplicada [7] correspondientes a las muestras: Azul-13, Verde-14, Rojo-15, Amarillo-16 y Magenta-17. Los objetos registrados si bien son las mismas muestras de la carta de color Macbeth ColorChecker, consisten en una carta mucho más pequeña, que fue registrada completamente en una placa PFG-03C de 5x5cm, mientras que los hologramas anteriores corresponden a la carta de color grande, donde por placa de registro se tenía una sola muestra de color. Estos hologramas no fueron reconstruidos con lámpara de xenón debido a que la intensidad obtenida era muy baja al iluminarlos con éste tipo de lámpara, por lo cual, sólo se reconstruyeron con láseres RGB. Los resultados se muestran a continuación, en la Figura 35, se detallan las intensidades de los láseres empleados para la reconstrucción, en la Figura 36 se observan las imágenes de los hologramas, finalmente en la Figura 37 se representan los valores CIE-xy y en la Figura 38 los vectores diferencia entre valores CIE-a*b* de los hologramas Vs. los de los objetos físicos de acuerdo al fabricante y de acuerdo a la carta física iluminada bajo láseres. En la Tabla 5 se encuentran los valores de diferencia ΔE entre los valores CIE-L*a*b* de los hologramas Vs. los valores de la carta física de acuerdo a fabricante y de acuerdo a iluminación tipo láser². [31]

² Los resultados correspondientes a esta sección fueron publicados en SPIE Proceedings: Evaluation between methods for the color measurement in holograms by using a CMOS-RGB camera and a spectrometer. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications, Vol. 8785, 2013.

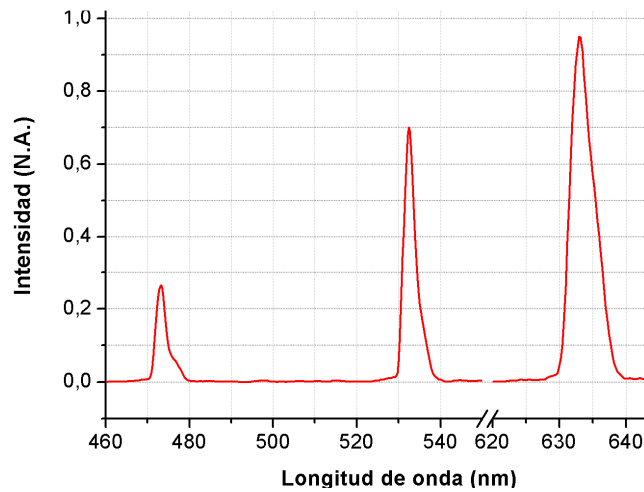


Figura 35. Intensidades espectrales de los láseres de reconstrucción para los hologramas registrados a partir de carta de color en formato pequeño.

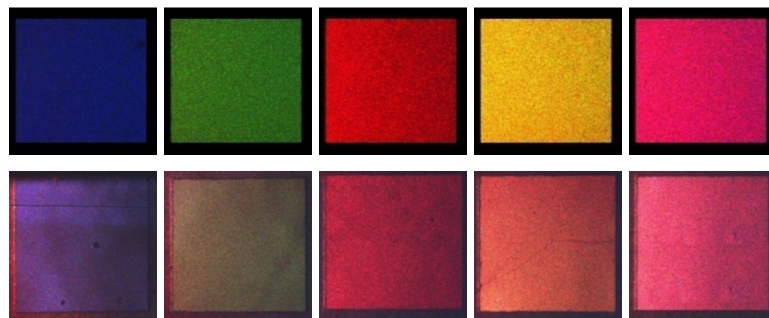


Figura 36. Arriba: Imágenes adquiridas con cámara para las muestras de la carta de color pequeña (Objetos iluminados bajo láseres RGB). Abajo: Imágenes adquiridas con cámara para los hologramas de la carta de color pequeña (iluminados bajo láseres RGB), de izquierda a derecha: Azul-13, Verde-14, Rojo-15, Amarillo-16 y Magenta-17.

Muestra	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)
13	106,71	78,81
14	48,39	24,20
15	45,69	57,81
16	20,32	13,73
17	74,52	59,71

Tabla 5. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB Vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.

[31]

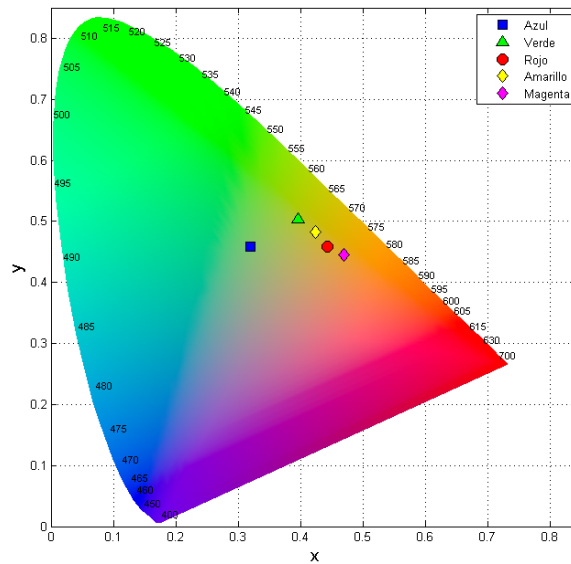


Figura 37. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, en formato pequeño, reconstrucción con láseres RGB.

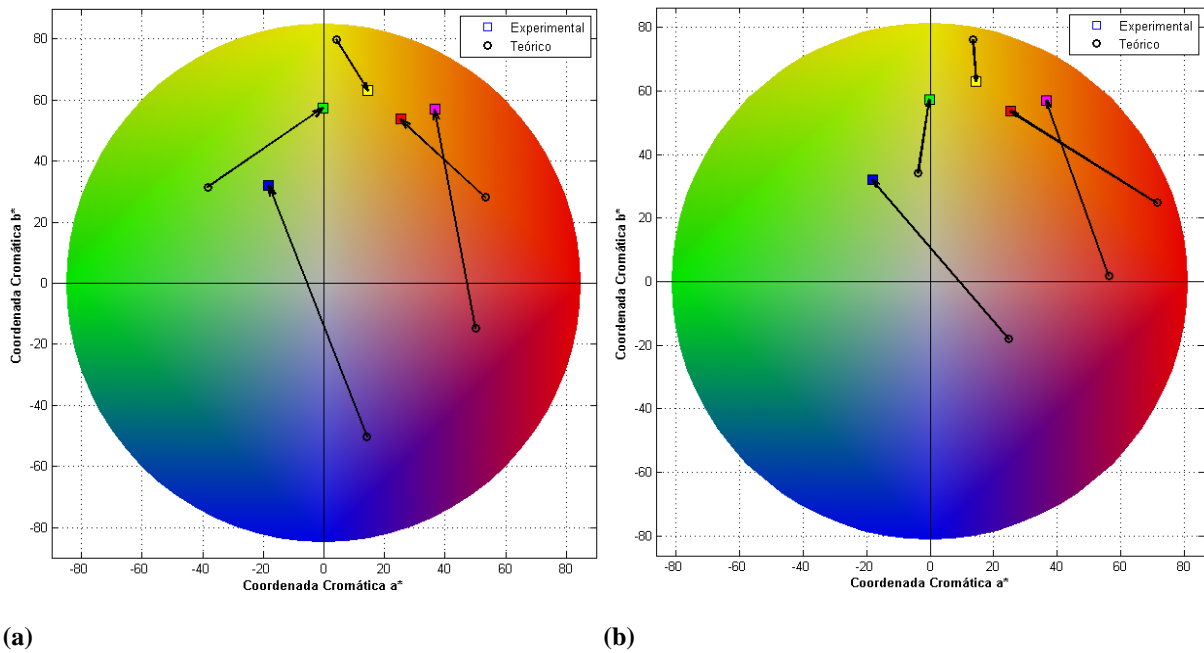


Figura 38. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con láseres RGB (valores experimentales) (a) Vs. Valores a^*b^* teóricos dados por el fabricante. (b) Vs. Valores a^*b^* para la carta de color física iluminada con láseres RGB. Carta de color en formato pequeño. [31]

De acuerdo a la Tabla 5, en las muestras que tenían alto contenido de verde, tales como Amarillo-16 y Verde-14, se observan diferencias de color pequeñas, lo cual es contrario a lo presentado para la carta de color de formato grande (como ya se mostró en la Figura 28 y Figura 32). Los hologramas de la carta en formato pequeño, fueron reconstruidos con las intensidades de los láseres de la Figura 35, donde se observa una intensidad muy alta para el láser rojo, una media para el láser

verde y una muy baja para el láser azul, lo cual explica la diferencia de color tan alta para hologramas de muestras como el Azul-13 y Magenta-17, las cuales tienen alto contenido hacia longitudes de onda del azul. Las diferencias de color para muestras con alto contenido de rojo, como el holograma de la muestra Rojo-15 y Amarillo-16, presentaron buena reproducción del color debido a diversas razones: la película presenta alta eficiencia hacia estas longitudes de onda (rojo), la intensidad de reconstrucción fue alta, y, adicionalmente, el registro fue hecho para muestras con áreas mucho más pequeñas cubriendo así una mayor cantidad de colores de la carta, por lo cual, se observa que el efecto del mode hopping para este registro fue menor.

En la Figura 36 se detallan las imágenes adquiridas para los hologramas reconstruidos con láseres RGB y comparados con sus correspondientes objetos reales iluminados también con láseres RGB; en estas imágenes se logra observar un color rojizo, incluso en las que tienen pocas componentes hacia estas longitudes de onda, lo cual confirma los resultados obtenidos de la Figura 37 y Figura 38, donde se observa una alta tendencia de los valores CIE-xy y CIE-a*b* hacia la región rojiza del espectro.

4.2. Medición de color con espectrómetro sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos presentados en pantalla LCD.

Los hologramas presentados a continuación fueron generados a partir del registro de las muestras de color de la carta Macbeth ColorChecker construidas digitalmente (Ver Figura 19, para detalles respecto al montaje de registro); el fabricante de esta carta además de suministrar los valores CIE-L*a*b* de las muestras, también entrega los valores RGB de las mismas (Ver Tabla 2), con los cuales se construyeron digitalmente los objetos, y se presentaron en la pantalla LCD a color que se empleó para su posterior registro.

Así como en los hologramas anteriores, estos fueron reconstruidos con lámpara de Xenón, láseres RGB y se realizaron las medidas con espectrómetro de acuerdo a la Figura 22 y Figura 25, respectivamente. Finalmente, se hizo un proceso de pseudocolor que consistió en ajustar las intensidades de los láseres de reconstrucción beneficiando el color de la muestra registrada, intentando así, que sus coordenadas de color se acercaran a las del objeto real registrado.

4.2.1. Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón

En la Figura 39 se muestran las imágenes de los hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón. En la Tabla 6 se presentan los valores correspondientes a las diferencias de color ΔE entre los hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón Vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo con la carta iluminada con láser RGB, las mediciones fueron realizadas con espectrómetro. Los correspondientes valores CIE-xy y vectores diferencia CIE-a*b* se presentan en la Figura 40 y Figura 41 respectivamente.

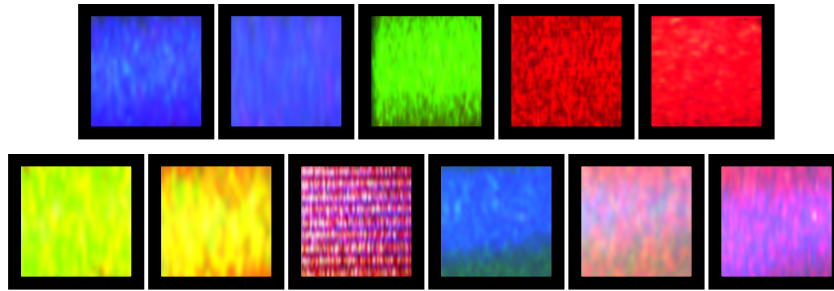


Figura 39. Imágenes adquiridas para hologramas a partir de objetos digitalizados, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: h43 y h32 (13-Azul), h48 (14-Verde), h35 y h41 (15-Rojo), h49 y h47 (16-Amarillo), h45 (17-Magenta), h44 (18-Cyan), h39 y h31 (19-Blanco). Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón.

Muestra	Holograma	Color	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)
13	h43	Azul	28,21	20,43
	h32		40,61	29,55
14	h48	Verde	43,29	16,17
15	h41	Rojo	15,77	29,33
	h35		63,39	52,16
16	h49	Amarillo	92,67	91,56
	h47		123,97	116,36
17	h45	Magenta	89,04	72,25
18	h44	Cyan	41,17	36,72
19	h39	Blanco	85,56	90,96
	h31		78,97	87,63

Tabla 6. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón Vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a carta iluminada con láser RGB. Mediciones con espectrómetro.

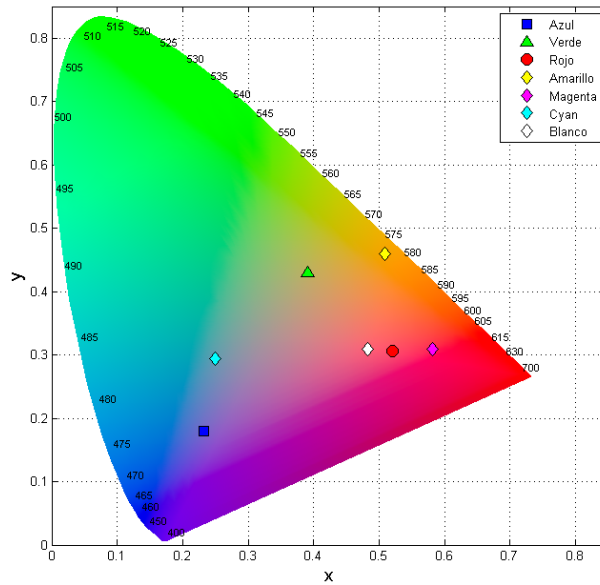


Figura 40. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos presentados en pantalla LCD (carta de color) reconstruidos con lámpara de Xenón.

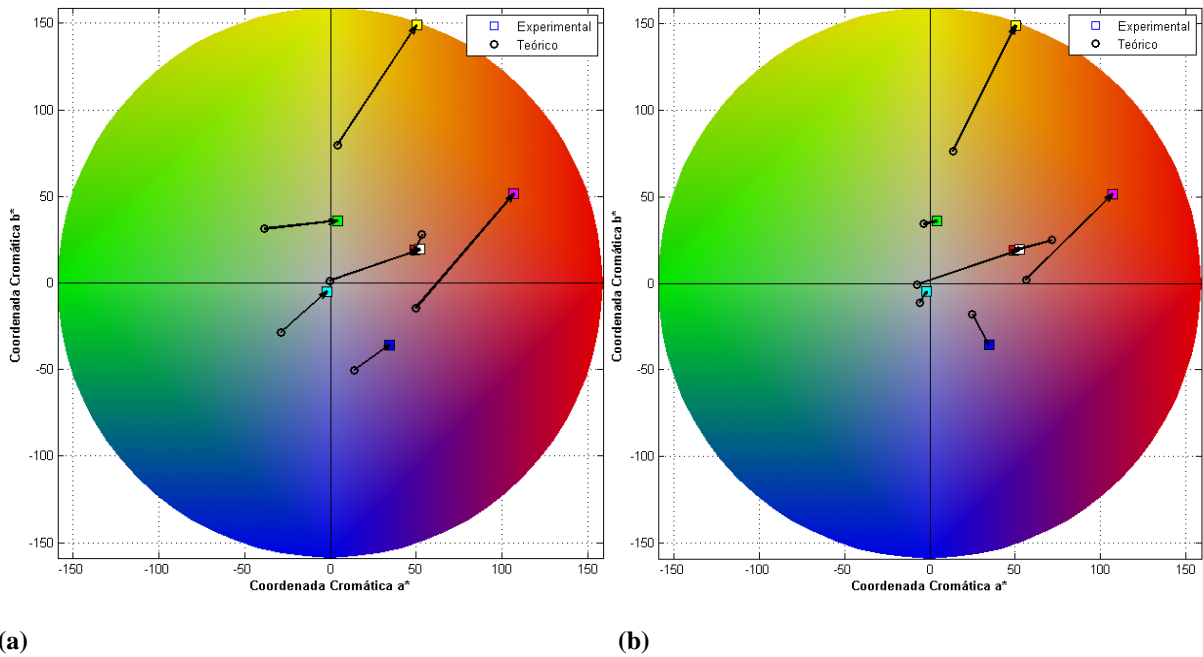


Figura 41. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón (valores experimentales) (a) Vs. Valores a^*b^* de acuerdo al fabricante de la carta de color. (b) Vs. Valores a^*b^* para la carta iluminada con láseres (valores teóricos).

En general, en la Tabla 6 se observa que, los hologramas presentan una diferencia de color más pequeña cuando son comparados con la carta de color iluminada con láseres, esto debido a que es la misma fuente bajo la cual se están comparando. Caso contrario ocurre cuando se realiza esta

comparación con los valores teóricos dados por el fabricante, ya que estos corresponden a una fuente de iluminación distinta (continua) a los láseres RGB de registro.

En la Figura 41 (a) y (b), se observa nuevamente (como en medidas anteriores) que la reconstrucción de los hologramas tiende hacia la región roja del espectro, lo que es similar a cuando la carta física se encuentra iluminada con láseres, ya que se observa que el valor teórico para la muestra Blanco-19 está ligeramente desplazado hacia la derecha. Este efecto también es notorio en la Figura 39, donde las imágenes de los hologramas se observan un poco rojas.

Analizando la Tabla 6, (así como se hizo para la Tabla 4), se nota que las diferencias de color para la muestra Amarilla son muy altas, además de las razones ya mencionadas, se añade una más, y consiste en el control individual por longitud de onda para la razón referencia/objeto de los láseres de registro, lo cual no fue posible en este tipo de montaje, por lo que la razón se ajustaba sólo para un láser, mientras que para los otros dos no era posible.

El efecto del mode hopping en estas imágenes holográficas es mucho más notorio que en las obtenidas a partir del registro de objeto físico, la falta de uniformidad en el color de hologramas correspondientes a muestras como el Amarillo-16, Cyan-18, Verde-14, Blanco-19, e incluso Magenta-17 obedecen a este efecto. Colores primarios tales como el Azul-13 y Rojo-15 muestran una uniformidad en el color satisfactoria sin franjas de interferencia debidas al mode hopping. Las franjas delgadas que se observan en algunos hologramas obedecen a que el registro se hizo de una imagen presentada sobre una pantalla LCD, por lo cual se está reconstruyendo el arreglo de píxeles de esta pantalla, lo que se hace evidente cuando se reconstruye con láseres RGB; esto debido al carácter de separación por canales R, G, B de la pantalla LCD; estos resultados se muestran a continuación.

4.2.2. Hologramas reconstruidos con láseres RGB

A continuación en la Figura 42 se muestran los hologramas reconstruidos bajo láseres RGB, las coordenadas CIE-xy y diferencias entre los valores CIE-a*b* de estos hologramas Vs. sus correspondientes valores teóricos de acuerdo a fabricante y a carta física iluminada bajo láseres se presentan en la Figura 43 y Figura 44 respectivamente. Los datos de diferencias de color ΔE entre los valores CIE-L*a*b* de los hologramas comparados con los mismos valores de acuerdo a fabricante y a carta física iluminada con láseres se muestran en la Tabla 7.

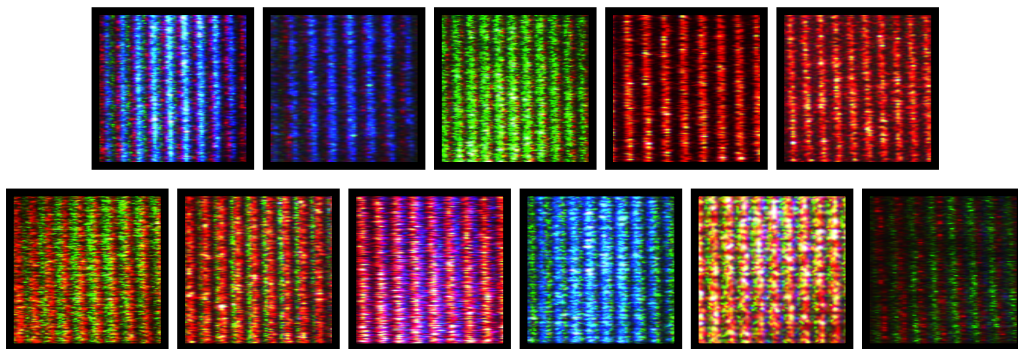


Figura 42. Imágenes adquiridas para hologramas a partir de objetos digitalizados, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: h43 y h32 (Azul), h48 (Verde), h35 y h41 (Rojo), h49 y h47 (Amarillo), h45 (Magenta), h44 (Cyan), h39 y h31 (Blanco) Hologramas reconstruidos con láseres RGB.

Muestra	Holograma	Color	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)
13	h43	Azul	24,86	58,81
	h32		31,97	45,06
14	h48	Verde	36,12	43,53
15	h41	Rojo	52,45	63,69
	h35		26,47	34,83
16	h49	Amarillo	25,35	31,04
	h47		98,44	92,47
17	h45	Magenta	36,41	33,28
18	h44	Cyan	42,52	55,53
19	h39	Blanco	63,95	70,02
	h31		86,96	93,33

Tabla 7. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.

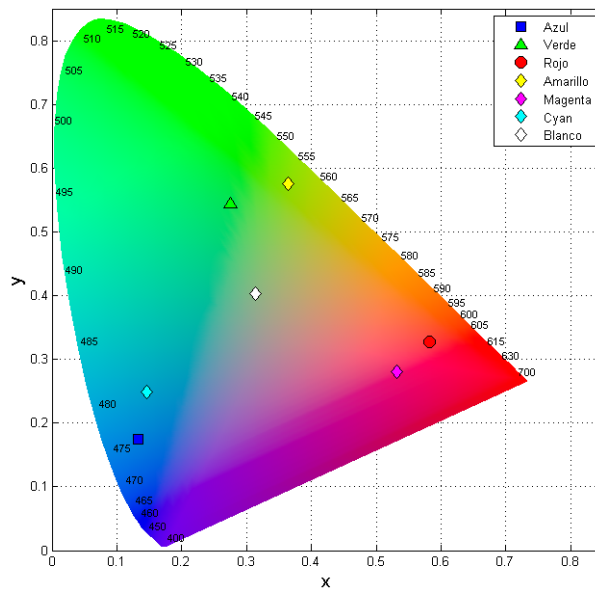


Figura 43. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color presentada en pantalla LCD, reconstrucción con láseres RGB (detalle de los hologramas h43, h48, h35, h49, h45, h44 y h39).

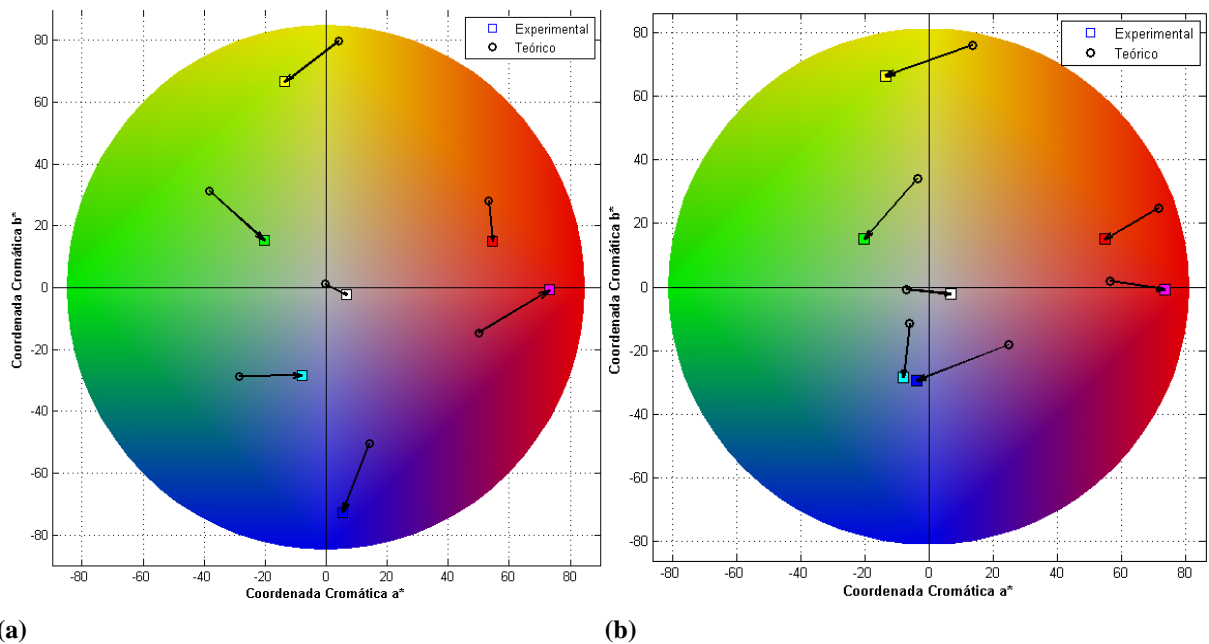


Figura 44. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con láseres (valores experimentales) (a) Vs. Valores a^*b^* de acuerdo al fabricante de la carta de color (valores teóricos). (b) Vs. Valores a^*b^* para la carta iluminada con láseres (valores teóricos).

Al reconstruir los hologramas registrados a partir de LCD con láseres RGB, se nota una mejoría para muestras registradas como el color amarillo-16, y la tendencia de todas las muestras hacia el rojo se ve disminuida, esto se puede explicar en que la fuente de reconstrucción esta vez es distinta,

son los láseres de registro con los cuales se está reconstruyendo, por lo cual, se tiene un mayor acercamiento hacia las condiciones del registro; mientras que en los datos de la Figura 40 y Figura 41 corresponden a los hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón, que, de acuerdo a la Figura 27 tiene una distribución espectral muy distinta a la de los láseres de la Figura 31. Ya que los hologramas son mucho más selectivos en cuanto a las longitudes de onda de reconstrucción, si se les presenta bajo una fuente igual a la de registro, el color, de acuerdo a las imágenes de la Figura 42, mejorará. Sin embargo, debido a razones ya planteadas, aún se tiene inconvenientes con la muestra amarilla; ya que el holograma h47 correspondiente al registro del color Amarillo-16 presentó la mayor diferencia de color; un caso muy distinto se dio para el registro del color Amarillo-16 holograma h49; el cual se registró teniendo mayor cuidado sobre la razón referencia/objeto del láser verde, mientras que para el holograma h47 no; esto corresponde al mismo comportamiento que se presentó para estas muestras reconstruidas con lámpara de Xenón de acuerdo a la Tabla 6. La muestra Verde-14, holograma h48 no presentó diferencias de color altas debido a que la relación referencia/objeto también fue ajustada con detalle para el láser verde en este registro; si se recuerda, como se mencionó anteriormente, respecto al montaje de registro, tener control de la razón referencia/objeto sobre los tres láseres individualmente no fue posible, razón por la cual se hace mención a este ajuste sobre el láser verde.

Igualmente, a la reconstrucción con láseres se puede añadir que estas fuentes corresponden a una iluminación RGB más ligada al funcionamiento del dispositivo LCD utilizado para el registro (por canales individuales RGB), lo que favorece la reconstrucción de los hologramas, razón por la cual también se detalla mucho más el arreglo de píxeles de la pantalla LCD.

Se tiene entonces, un comportamiento que es consistente respecto al resto de medidas anteriores: diferencias de color pequeñas para muestras con alto contenido de rojos y azules tales como el Azul-13 (h43), Rojo-15 (h35) y Magenta-17 (h45); en comparación con las muestras con alto contenido de verde: Amarillo-16 (h47), Cyan-18 (h44) e incluso Blanco-19 (h39 y h31). La falta de uniformidad en el color debido al mode hopping también es notoria en la Figura 42.

4.2.3. Hogramas reconstruidos con láseres RGB (Pseudocolor)

Al realizar el procedimiento de Pseudocolor, es decir, ajustando las intensidades de los láseres de reconstrucción, de forma tal que se beneficiara la componente espectral de la muestra en la cual se esperaba mayor intensidad, se encuentran los resultados mostrados en la Figura 46 para valores CIE-xy y Figura 47 para comparaciones entre valores experimentales (hogramas) y teóricos (objeto registrado) CIE-L*a*b*; con sus respectivas imágenes en la Figura 45. Los valores ΔE presentados en la Tabla 8 fueron calculados de la misma forma que los resultados anteriores.

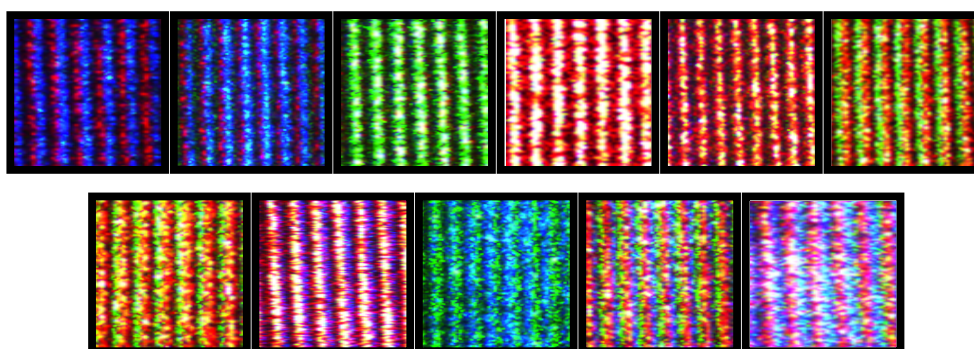


Figura 45. Imágenes adquiridas para hologramas a partir de objetos digitalizados Pseudocolor, de izquierda a derecha: h43 y h32 (Azul 13), h48 (Verde 14), h35 y h41 (Rojo 15), h49 y h47 (Amarillo 16), h45 (Magenta 17), h44 (Cyan 18), h39 y h31 (Blanco 19). Hologramas reconstruidos con láseres RGB.

Holograma	Color	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)
h43	13-Azul	86,95	96,57
h32		68,90	85,00
h48	14-Verde	73,37	85,42
h41	15-Rojo	68,57	61,00
h35		57,19	53,62
h49	16-Amarillo	182,43	184,72
h47		137,65	140,86
h45	17-Magenta	64,91	71,34
h44	18-Cyan	89,98	103,13
h39	19-Blanco	65,55	59,45
h31		40,64	34,88

Tabla 8. Diferencias de color ΔE entre hologramas reconstruidos con láseres RGB por pseudocolor Vs. Valores teóricos para carta de color de acuerdo al fabricante y de acuerdo a iluminación láser RGB. Mediciones con espectrómetro.

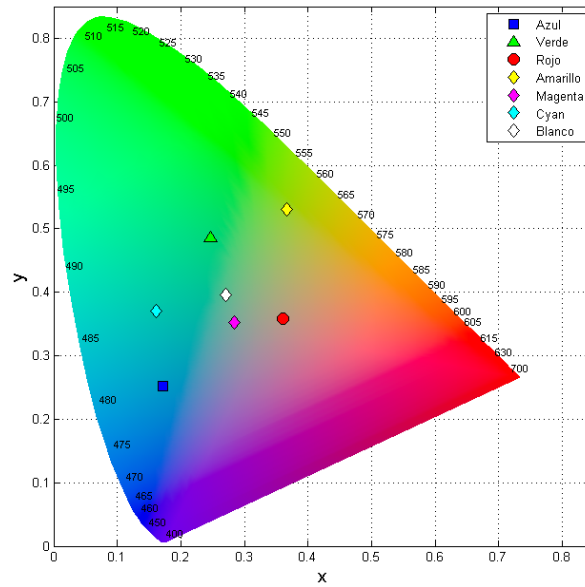


Figura 46. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color presentada en pantalla LCD, reconstrucción con láseres RGB por pseudocolor (hologramas h32, h48, h35, h47, h45, h44 y h31).

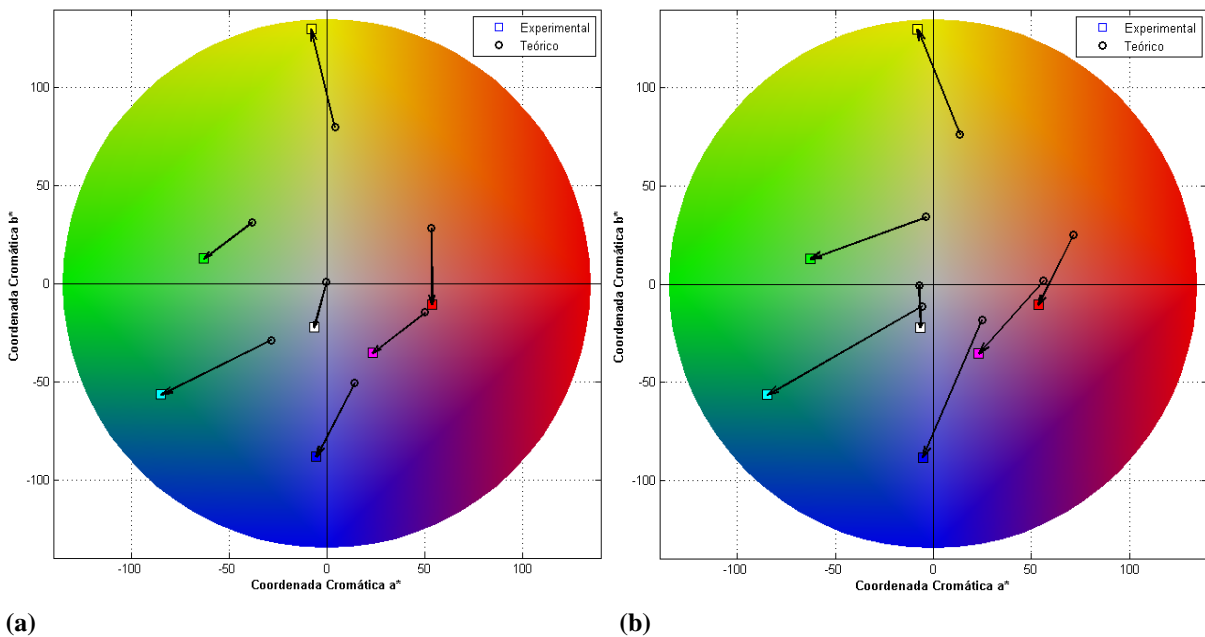


Figura 47. Valores a^*b^* para los hologramas reconstruidos con láseres obtenidos por Pseudocolor (valores experimentales) (a) Vs. Valores a^*b^* teóricos de acuerdo al fabricante y (b) Vs. Valores a^*b^* de la carta iluminada con láseres.

De la Tabla 8 y de los valores representados en las Figura 47 (a) y (b), se nota que de igual forma que en las reconstrucciones anteriores, el color con mayor diferencia ΔE fue el Amarillo.

Al compararse la Figura 44 correspondiente a las diferencias para los hologramas iluminados con láseres (sin pseudocolor) con la Figura 47 donde se muestran las mismas diferencias para los mismos hologramas iluminados con láseres bajo el procedimiento de pseudocolor no se obtiene ninguna mejoría, sólo se identifica un corrimiento de los valores experimentales hacia la región del verde en el mapa CIE- a^*b^* en la Figura 47, caso contrario a la Figura 44 donde la mayoría de los valores experimentales apuntaban hacia la región del rojo. Así mismo, muestras de hologramas correspondientes a colores como Azul-13 y Cyan-18 aumentaron las magnitudes de sus vectores diferencia notoriamente, lo cual se puede ver justificado en que cuando se hizo el procedimiento de pseudocolor, sólo se aumentaron las intensidades de forma que visualmente el holograma fuera similar a los objetos físicos, obteniéndose así que los valores experimentales fueran mayores que los teóricos, esto se puede verificar en la Figura 47. Este comportamiento también se encuentra al comparar la Figura 43 con la Figura 46 y en los datos de la Tabla 7 Vs. los de la Tabla 8, que corresponden a análisis sin pseudocolor y con pseudocolor respectivamente.

Cabe resaltar que el tipo de ajuste de intensidades de láseres para la reconstrucción que se realizó en este ensayo fue subjetivo, es decir, el color se reconstruía de acuerdo a lo que se observaba sobre la imagen capturada con cámara. Debido a estos resultados, para procedimientos de este tipo es recomendable realizar un monitoreo de las coordenadas CIE- $L^*a^*b^*$ *in situ*, es decir, cuando se esté haciendo el pseudocolor se realice una comparación inmediata entre valores experimentales y teóricos para conocer de forma más precisa la cantidad de intensidades de los láseres que se deben aumentar o disminuir.

4.3. Caracterización del LCD a color con espectrómetro.³

Para la caracterización del LCD a color se realizaron varias pruebas, una de ellas consistió en realizar una medición con espectrómetro de las intensidades de los láseres a la salida y entrada de este dispositivo, esto con el fin de verificar si se genera algún cambio en el LCD hacia determinadas longitudes de onda, estos resultados se presentan en la Figura 48.

Otra etapa de la caracterización del LCD consistió en construir imágenes con valores RGB iguales, es decir construir digitalmente una escala de grises desde 0 hasta 255 a un paso de 32 para los canales RGB de la imagen, e iluminando con los láseres a la misma intensidad el LCD. De la misma forma, se tomó cada canal individual R, G, y B y se iban variando sus valores desde 0 hasta 255 mientras los otros dos se mantenían en 0, con las intensidades de entrada de los láseres iguales, (Ver Imágenes en la Figura 49). Estas imágenes construidas digitalmente también pasaron por un procedimiento de medición de valores CIE-L*a*b* y CIE-xy de acuerdo al montaje de la Figura 24, los resultados se presentan en la Figura 50.

Una vez realizadas las mediciones de caracterización descritas, se presentan las imágenes de la carta Macbeth ColorChecker construidas digitalmente y se les realizan las mediciones con espectrómetro para su posterior comparación con los valores teóricos de la Tabla 2, es decir se calcula una diferencia de color entre el objeto físico/real registrado, y el objeto digital registrado. Estas mediciones son presentadas en la Tabla 9 para las diferencias de color ΔE , en la Figura 51 para medición de color en el modelo CIE-xy, y en la Figura 52 para los vectores diferencia CIE-a*b*.

Todas las mediciones con espectrómetro de esta sección se llevaron a cabo mediante el montaje detallado en la Figura 24 del capítulo 3, respecto a la caracterización de LCD, basados en métodos descritos por Khisa, S [26].

³ Los resultados de caracterización de LCD con espectrómetro de esta sección fueron presentados en el XIII Encuentro Nacional de Óptica ENO, IV Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones. Palacios, N., Velásquez, D. Método para la gestión del color de objetos en un LCD a color iluminados con láseres RGB, 2013. [32]

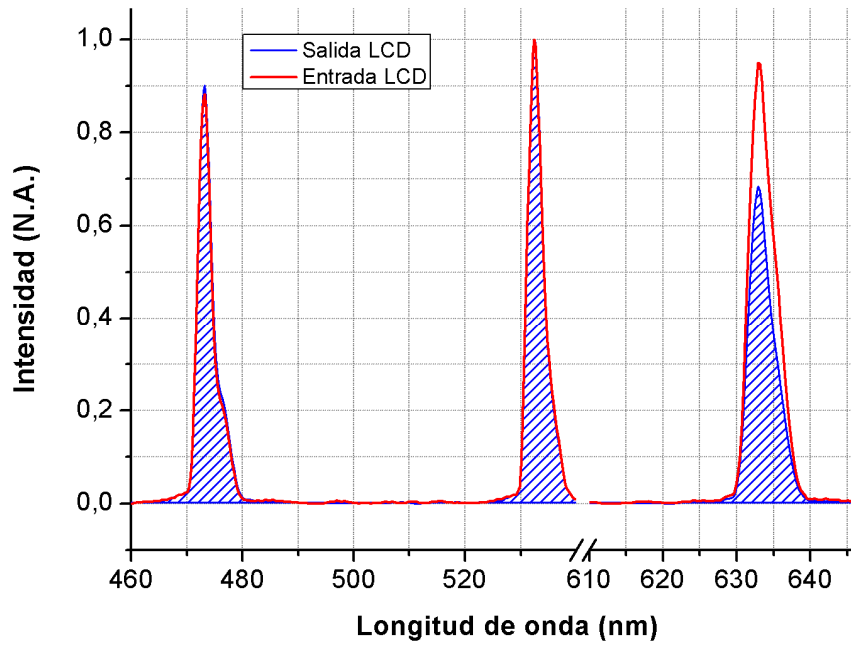


Figura 48. Detalle de las intensidades de entrada y salida al LCD de los láseres RGB. [32]

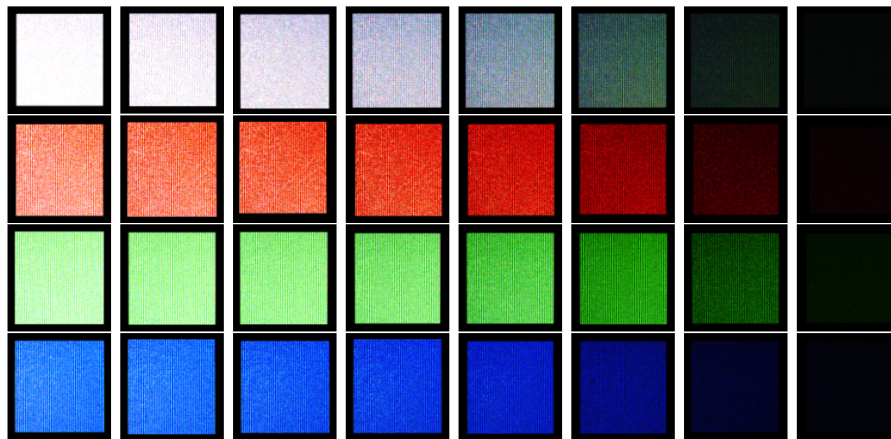


Figura 49. Presentación de imágenes sobre LCD construidas digitalmente. De arriba – abajo y de izquierda a derecha: (R=G=B=255:32), (R=255:32, G=B=0), (G=255:32, R=B=0), (B=255:32, R=G=0).

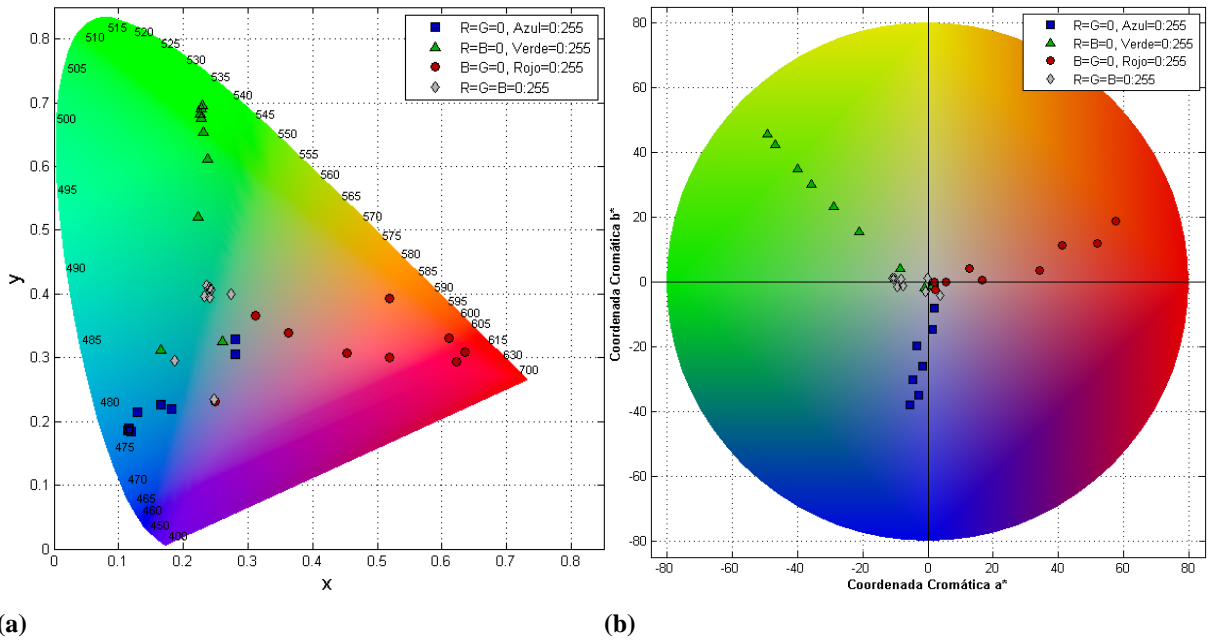


Figura 50. (a) Valores CIE-xy para las imágenes de la Figura 49 (R=G=0 B=0:255, R=B=0 G=0:255, B=G=0 R=0:255, R=G=B=0:255) y presentadas sobre LCD iluminado con láseres RGB. (b) Valores CIE-L*a*b*.

Muestra	Color	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)	ΔE (teóricos fabricante)	ΔE (teóricos carta con láser)
		Sin ajuste en canales RGB del LCD		Con ajuste en canales RGB del LCD	
13	Azul	39,27	46,12	41,45	42,93
14	Verde	39,72	51,58	47,26	53,50
15	Rojo	43,87	57,81	43,18	56,23
16	Amarillo	64,48	63,30	71,84	69,02
17	Magenta	45,37	53,04	46,83	53,46
18	Cyan	36,66	49,28	41,88	52,80
19	Blanco	55,43	59,95	60,42	66,11

Tabla 9. Diferencias de color ΔE entre la carta e color construida digitalmente y presentada en pantalla LCD Vs. Valores teóricos de acuerdo al fabricante de la carta y a la carta iluminada con láseres. Los valores experimentales corresponden a medidas hechas con espectrómetro sobre LCD iluminado con láseres. [32]

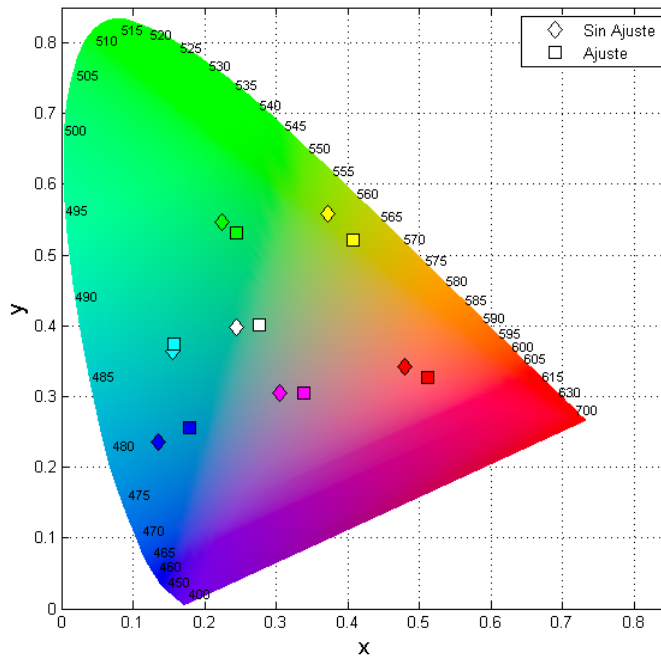


Figura 51. Valores CIE-xy para la carta de color construida digitalmente y presentada sobre LCD iluminado con láseres RGB.

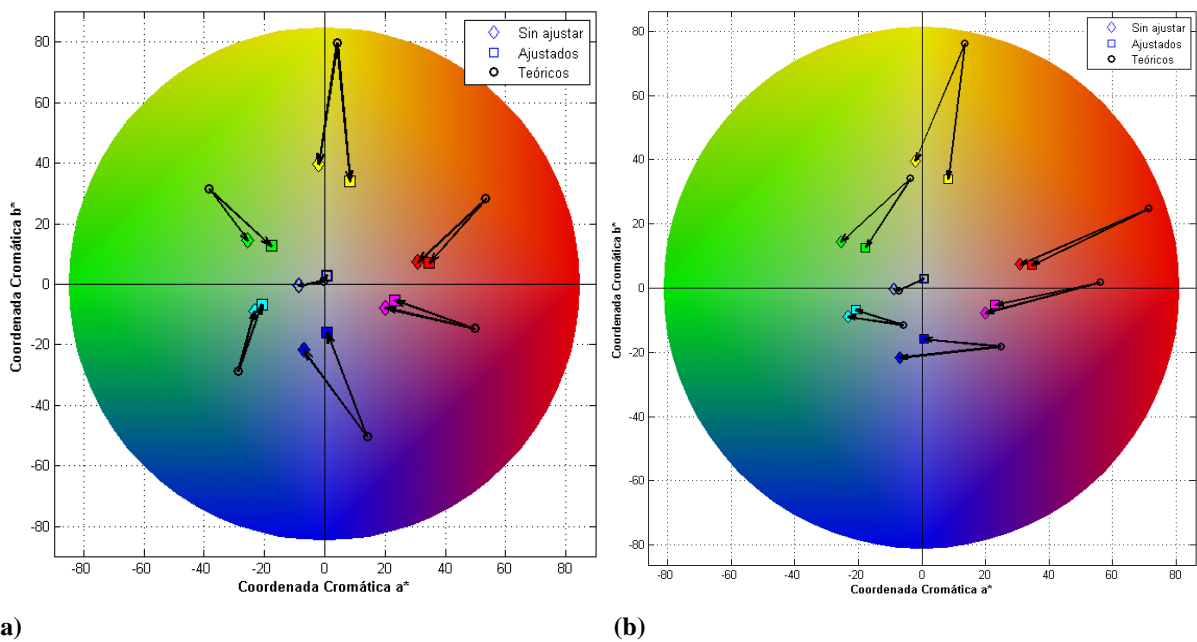


Figura 52. Diferencias CIE-a*b* para la carta de color construida digitalmente y presentada sobre LCD iluminado con láseres RGB (a) Vs. Valores CIE-a*b* de acuerdo al fabricante de la carta. (b) Vs. Valores CIE-a*b* de acuerdo a la carta iluminada con láseres RGB. [32]

La independencia de canales R, G y B del dispositivo, es decir, que las coordenadas cromáticas para cada una de las muestras presentadas sobre el LCD sean las mismas o parecidas sin importar el nivel de gris manejado, es verificado en la Figura 50 (a), donde se observan las coordenadas

CIE-xy similares tanto para muestras de grises construidas digitalmente con los tres canales $R=G=B$, así como para los canales $[R=0:255, G=0, B=0]$; $[R=0, G=0:255, B=0]$ y $[R=0, G=0, B=0:255]$; este comportamiento se verifica en la figura como acumulación de puntos rojos, verdes o azules hacia determinadas regiones. Dicha acumulación se presenta hacia ciertos valores en especial para los canales verde y azul; pero para el canal rojo no. Debido a esto, se verificó la distribución espectral de estos tres canales, encontrándose que, el canal rojo presenta una absorbancia mayor en comparación con los otros dos canales (ver Figura 48); esto también se verifica en la Figura 50 (b) del diagrama CIE- a^*b^* , donde las muestras grises ($R=G=B$) se encuentran desplazadas hacia la izquierda, es decir hacia la región $-a^*$, lo cual significa que tiende hacia el verde, que es donde se genera menor absorbancia de acuerdo a la Figura 48, donde se detalla el análisis espectral a la salida y entrada del LCD.

En la Figura 52, al comparar los valores CIE- a^*b^* medidos sobre el LCD, tanto con los valores reportados por el fabricante, así como con los de la carta física iluminada con láseres RGB se encuentra que los valores experimentales apuntan hacia la región verde del espectro nuevamente, lo cual se verifica para el color blanco, el cual medido sobre el LCD y comparado con el fabricante se desplaza hacia la izquierda ($-a^*$), y comparado con la carta física iluminada con láseres RGB es casi igual, ya que el blanco teórico en este caso ya se encuentra desplazado. El impacto de estos desplazamientos se verifica también en las diferencias de color, para las cuales, las más altas están sobre colores que tienen componentes de rojo tales como: Amarillo, Magenta, Rojo e inclusive el mismo Blanco, mientras que para colores con componentes de verde-azul estas diferencias son menores. Un factor que influencia la diferencia más alta en la muestra Amarillo-16, se encuentra en que tiene una componente baja de rojo, y una alta de verde (debido a la absorbancia hacia el rojo y alta transmitancia hacia el verde); este comportamiento se observa tanto para la comparación con valores teóricos reportados por el fabricante, así como para la carta física iluminada bajo láseres RGB.

Debido a este comportamiento (de absorción de rojos y alta transmitancia de verdes), se realizó un nuevo ensayo que se detalla también en la Figura 51 y Figura 52. Este ensayo consistió en un *Ajuste* sobre la componente roja a la salida del LCD con un parche blanco puesto sobre este, esto con la intención de disminuir la intensidad de la componente verde (e incluso la azul) en comparación con la roja. Es decir, se realizó un ajuste de los tres láseres de forma tal que, a la salida del LCD las intensidades de estos fueran iguales a una muestra blanca presentada sobre el LCD. Este ajuste

se observa como un corrimiento de los valores CIE- a^* en un diagrama tipo CIE- a^*b^* . De acuerdo a la Tabla 9, con el *Ajuste*, todas las diferencias de color aumentan, mas no de forma considerable. Realizando un análisis más detallado de las diferencias Δa^* y Δb^* , se encontró que, la diferencia en la coordenada a^* es mayor para el sistema sin el ajuste que con el ajuste, esto ocurrió para todas las muestras excepto para el Verde-14 y Cyan-18, lo cual se puede justificar en que, al realizar una disminución de la intensidad hacia el verde estas muestras se ven afectadas en la variable (CIE- a^*) que está relacionada con esta componente de color. Cabe resaltar que al realizar este ajuste, la muestra blanca se acerca mucho más hacia el valor teórico dado por el fabricante, lo cual es notorio en los diagramas CIE- a^*b^* de la Figura 52 más no en la Tabla 9, correspondiente a las diferencias de color, por lo cual se puede decir que, para la muestra blanca se ven mejoradas las coordenadas cromáticas más no la de luminosidad.

4.4. Diversas comparaciones de color con espectrómetro.

Los resultados presentados en esta sección consisten en realizar diversas comparaciones entre coordenadas CIE-L*a*b*, obtenidas mediante espectrómetro. Ya que se está realizando gestión del color en todas las etapas de registro de los hologramas, también se requiere conocer cuánto se modifica el color en etapas intermedias, o incluso la diferencia de color entre las dos técnicas: a partir de objeto físico y digitalizado, para conocer su similitud.

Inicialmente, se calcula una diferencia de color entre las coordenadas CIE-L*a*b* de los hologramas generados a partir de la carta física, Vs. Las de los hologramas de la carta construida digitalmente y presentada sobre LCD. Así mismo, se calculan las diferencias de color entre el objeto presentado digitalmente sobre el LCD e iluminado con láseres RGB Vs. las coordenadas CIE-L*a*b* para sus respectivos hologramas registrados y reconstruidos con láseres RGB.

4.4.1. Comparación entre coordenadas CIE-L*a*b* de un holograma registrado a partir de un objeto físico Vs. coordenadas del Holograma registrado a partir de un objeto presentado en LCD.

Los resultados presentados a continuación corresponden a la comparación entre las dos técnicas de registro de hologramas, es decir, comparación entre los hologramas generados a partir de objeto físico (Hologramas de la Figura 28 reconstruidos con lámpara de Xenón y Figura 32 para reconstrucción con láseres) Vs. Hologramas generados a partir de objeto presentado sobre pantalla LCD (Hologramas de la Figura 39 para reconstrucción con lámpara de Xenón y Figura 42 para reconstrucción con láseres). Las comparaciones se presentan en la Figura 53 entre hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón y Figura 54 entre hologramas reconstruidos con láseres; sus correspondientes valores ΔE se muestran en la Tabla 10. En las figuras mencionadas, se toma por convención los valores experimentales aquellos correspondientes a los hologramas registrados a partir de objeto físico, y valores teóricos para hologramas registrados a partir de objeto presentado sobre pantalla LCD.

Color	ΔE (Reconstrucción con lámpara de Xenón)	ΔE (Reconstrucción con Láser RGB)
13-Azul	33,16	66,76
14-Verde	47,64	50,76
15-Rojo	28,12	33,73
16-Amarillo	172,10	114,6
17-Magenta	88,28	41,36
18-Cyan	45,62	61,45
19-Blanco	48,98	51,12

Tabla 10. ΔE entre hologramas a partir de carta de color física Vs. hologramas a partir de presentación sobre LCD.

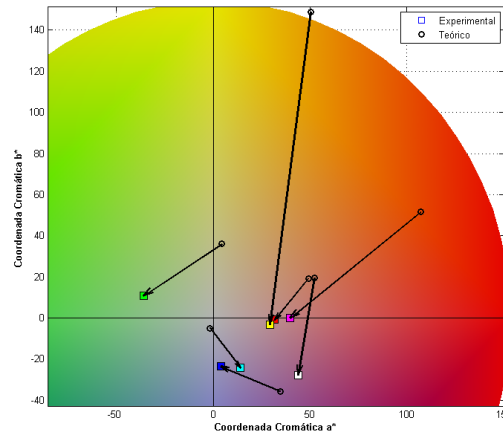


Figura 53. Diferencias CIE-a*b* entre coordenadas de imágenes holográficas registradas a partir de objetos físicos (Valores Experimentales) Vs. CIE-a*b* para hologramas a partir de carta de color presentada sobre LCD (Valores teóricos), reconstrucción con Lámpara de Xenón.

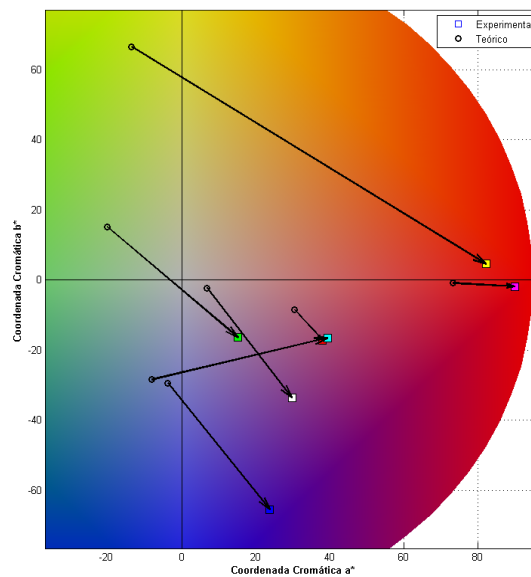


Figura 54. Diferencias CIE-a*b* entre coordenadas de imágenes holográficas registradas a partir de carta de color física (Valores Experimentales) Vs. CIE-a*b* para hologramas a partir de carta de color presentada sobre LCD (Valores teóricos), reconstrucción con Láseres RGB.

A partir de la Tabla 10, se encuentra que al compararse los hologramas generados a partir de la carta de color física en formato grande con los hologramas a partir de objeto presentado sobre pantalla LCD, la diferencia de color más grande se encuentra en el holograma de la muestra de color Amarillo-16 y la más pequeña para el Rojo-15, tanto para reconstrucción con lámpara de Xenón como con láseres RGB. Esto significa que existe alta similitud entre el holograma registrado a partir de objeto físico y el registrado a partir de presentación de objeto sobre monitor LCD para la muestra Rojo-15 de la carta Macbeth ColorChecker; caso contrario para la muestra Amarillo-16. Este resultado coincide con lo observado anteriormente, donde se explicó que los hologramas con componentes altas de color rojo presentaban alta reproducibilidad y hologramas con componentes altas de color verde como el Amarillo-16, presentaban baja reproducibilidad. Si se observa con detalle la Figura 54 (reconstrucción con láseres RGB), se encuentra que los vectores con mayor magnitud corresponden, como ya se observó en medidas anteriores, para colores como: Verde-14 y Amarillo-16, es decir muestras con altas componentes de verde; y los vectores de menor magnitud corresponden a hologramas de muestras con componentes altas de rojo-azul: Rojo-15 y Magenta-17.

El resultado presentado anteriormente no indica que la similitud entre coordenadas de color para los hologramas de ambas técnicas, implica reproducibilidad. Deben existir ambas condiciones: baja diferencia de color entre el holograma (de cualquier técnica) y el objeto original, y entre hologramas de técnicas distintas, ya que puede darse el caso que hologramas de técnicas distintas, presenten la misma diferencia de color (alta o baja) con el objeto registrado y, por ende presentarían una baja diferencia de color entre sí.

4.4.2. Diferencias de color entre el objeto presentado digitalmente sobre el LCD e iluminado con láseres RGB Vs. las coordenadas CIE- $L^*a^*b^*$ para sus respectivos hologramas reconstruidos con láseres RGB.

En la Figura 55 se realiza una comparación entre los valores CIE- a^*b^* de los hologramas registrados a partir de la presentación de imágenes de las muestras de la carta de color sobre monitor LCD (correspondientes a los hologramas mostrados en la Figura 42 y reconstruidos con láseres) y los valores CIE- a^*b^* medidos para esta carta de color presentada sobre el LCD tanto haciendo la corrección para el canal rojo como sin hacerla, tal y como se presentó en la Figura 52. En la Tabla

11 se presentan las correspondientes diferencias de color ΔE . La convención para la Figura 55 es: valores experimentales medidos en imágenes holográficas y valores teóricos sobre LCD.

Holograma	Color	Muestra	ΔE Sin ajuste del LCD	ΔE Con ajuste del LCD
32	Azul	13	8,42	14,52
48	Verde	14	8,66	11,96
41	Rojo	15	15,93	16,41
49	Amarillo	16	47,66	58,00
45	Magenta	17	54,51	52,03
44	Cyan	18	25,68	25,30
39	Blanco	19	17,85	8,63

Tabla 11. Diferencias ΔE para los hologramas registrados a partir de la presentación sobre LCD Vs. Valores CIE-L*a*b* para LCD (ambos iluminados con láseres RGB).

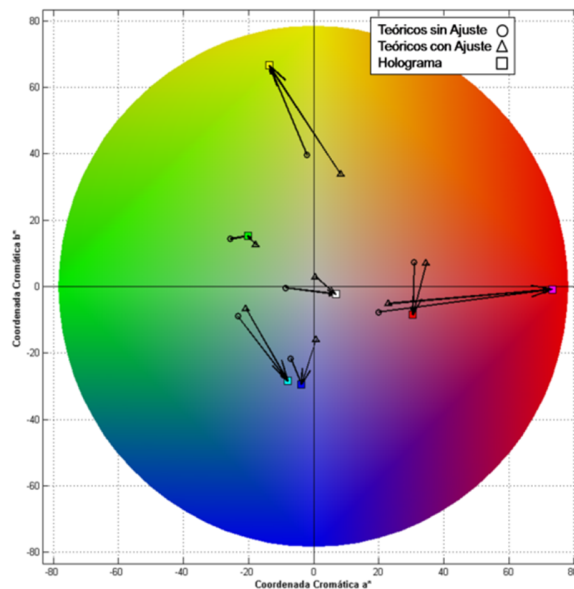


Figura 55. Valores CIE-a*b* para las imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la presentación sobre LCD Vs. Valores CIE-a*b* para LCD (ambos iluminados con láseres RGB).

Para las medidas de la Tabla 11 y Figura 55 se observa que no hay un cambio significativo con o sin ajuste de las intensidades de salida del LCD; sin embargo, se encuentra que al hacer el ajuste del LCD todos los valores teóricos se ven desplazados hacia la región roja del mapa CIE-a*b*; ya que la mayoría de los hologramas reconstruidos se dirigen hacia esta región del espectro, se esperaría que las coordenadas a*b* del holograma se encuentren más cercanas a las teóricas; este comportamiento es notorio solamente para la muestra Blanco-19 tanto en la Tabla 11 como en la Figura 55, lo cual es muy parecido a lo mostrado en la caracterización del LCD (Figura 52). Las diferencias de color de la Tabla 11 son mayores cuando se realiza el ajuste sobre el LCD que cuando

no, esta diferencia se puede atribuir también a una variación generada en la coordenada de luminosidad L^* .

4.5. Medición de color con cámara sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos físicos.

Los resultados de esta sección se obtuvieron a partir de las medidas realizadas con cámara a color sobre las imágenes holográficas del registro de objetos físicos, ya analizadas con espectrómetro previamente al inicio de este capítulo. El montaje utilizado para estas medidas corresponde al de la Figura 22 en el caso de reconstrucción con lámpara de Xenón, y a la Figura 23 para la reconstrucción con láseres RGB. Como se mencionó en el Capítulo 3, respecto de la caracterización de cámaras RGB, para obtención de coordenadas $CIE-L^*a^*b^*$, se hace necesario seguir determinados pasos para poder obtener estas mediciones en un modelo acorde a la gestión del color, por lo cual, los valores $CIE-L^*a^*b^*$ de la cámara presentados a continuación corresponden al dispositivo previamente linealizado y caracterizado. Una vez caracterizado, es decir, una vez realizada la conversión de valores linealizados RGB a valores $CIE-XYZ$, se hace una conversión directa a $CIE-L^*a^*b^*$. Los pasos posteriores, como el cálculo de las diferencias de color se ejecutan de la misma forma que los del espectrómetro. El algoritmo tanto de linealización como de caracterización empleado se encuentra basado en los métodos de Westland, S, et al [21],[24],[25] y las mediciones se muestran de la misma forma que los resultados del espectrómetro, es decir, mapa $CIE-xy$, $CIE-a^*b^*$ y los cálculos de las diferencias se realizan bajo los mismos valores teóricos de la Tabla 2 .

Adicionalmente, se realizó una evaluación del proceso de linealización implementado, por lo cual las tablas de resultados de este capítulo incluyen los valores de diferencias de color calculados para valores RGB con y sin linealización.

Las imágenes holográficas evaluadas bajo este método corresponden a las mismas que con espectrómetro, es decir las correspondientes a: Figura 28, Figura 32 y Figura 36 para hologramas registrados a partir de objetos físicos; y Figura 39, Figura 42 y Figura 45 para hologramas registrados a partir de imágenes construidas digitalmente y presentadas sobre LCD.

4.5.1. Resultados para Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón

Los resultados de la Tabla 12 corresponden a las medidas hechas sobre los hologramas de la Figura 28 evaluados con la cámara CMOS RGB con y sin linealización. En la Figura 56 se presentan los resultados obtenidos para los mismos hologramas en el modelo CIE-xy y en la Figura 57 los resultados correspondientes a las comparaciones CIE-a*b* entre la imagen holográfica y su objeto físico de acuerdo a fabricante y carta física iluminada con láseres RGB.

Holograma	Color	ΔE Con valores teóricos dados por el fabricante		ΔE Con valores teóricos dados por la carta iluminada bajo láseres RGB	
		ΔE (sin linealizar)	ΔE (con linealización)	ΔE (sin linealizar)	ΔE (con linealización)
19	13-Azul	41,1	27,7	46,1	13,5
26	14-Verde	27,5	33,2	32,0	29,2
21	15-Rojo	103,1	31,0	95,5	39,1
28	16-Amarillo	100,0	82,2	95,0	76,7
23	17-Magenta	47,8	17,4	50,9	7,4
25	18-Cyan	79,5	47,5	89,7	27,5
27	19-Blanco	154,4	88,9	160,8	95,2

Tabla 12. Diferencias de color para coordenadas CIE-L*a*b* de imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos físicos Vs. Coordenadas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres RGB. Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón, medición con cámara.

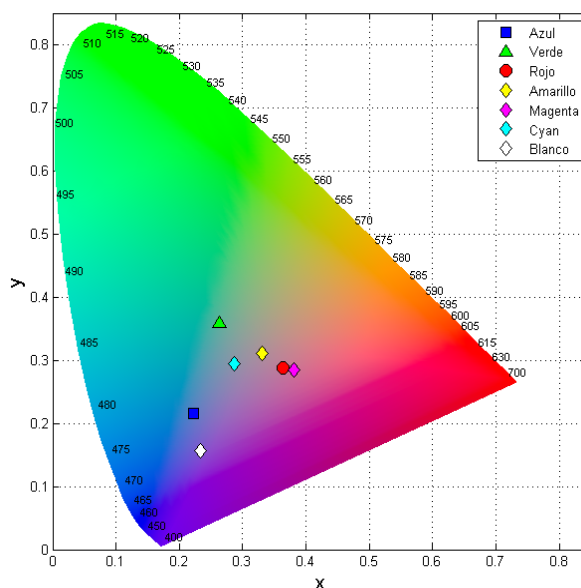


Figura 56. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas registrados a partir de carta de color física, reconstrucción con lámpara de Xenón.

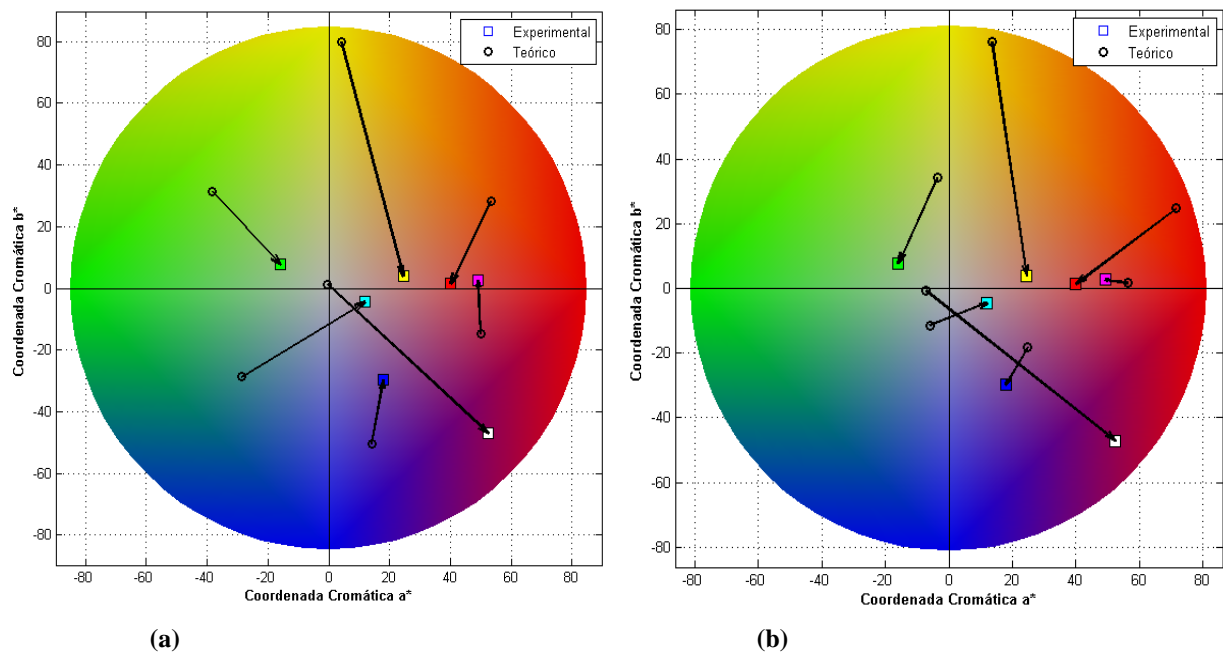


Figura 57. Diferencias CIE-a*b* para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Valores CIE-a*b* para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, reconstrucción con lámpara de Xenón. (a) Vs. Valores teóricos: CIE-a*b* entregados por el fabricante. (b) Vs. Valores teóricos: CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB.

Por medio de la Figura 56 se encuentra que las coordenadas CIE-xy de las muestras son muy similares a las mismas, medidas con espectrómetro: ver Figura 29. Este comportamiento también se identifica en los mapas CIE-a*b* de la Figura 57 Vs. la Figura 30 (con espectrómetro). Así mismo, en la Tabla 3 que corresponde a medición con espectrómetro se identificó que las muestras Amarillo y Blanco tenían la mayor diferencia de color; lo cual es similar a los resultados de la Tabla 12, donde con cámara estas mismas muestras arrojaron las mayores diferencias de color; mientras que el Magenta presentó la menor diferencia.

4.5.2. Resultados para Hologramas reconstruidos con láseres RGB.

Los datos correspondientes a la Tabla 13 son las medidas realizadas con cámara linealizada y sin linealizar sobre los hologramas de la Figura 32 iluminados con láseres RGB. En la Figura 58 se detallan las coordenadas CIE-xy bajo cámara linealizada y en la Figura 59 los vectores diferencia CIE-a*b* entre los valores obtenidos con la cámara linealizada para los hologramas comparados con sus coordenadas teóricas de acuerdo al fabricante de la carta y la misma carta iluminada con láseres.

Holograma	Muestra	ΔE Con valores teóricos del fabricante		ΔE Con valores teóricos dados por la carta iluminada bajo láseres RGB	
		ΔE (sin lin)	ΔE (con lin)	ΔE (sin lin)	ΔE (con lin)
19	13-Azul	37,3	24,7	44,3	41,7
20	14-Verde	59,9	53,7	54,4	34,8
21	15-Rojo	17,7	26,9	6,5	23,3
28	16-Amarillo	70,5	71,1	61,3	63,7
24	17-Magenta	59,8	47,4	42,6	30,5
25	18-Cyan	75,3	69,8	56,1	42,6
27	19-Blanco	75,2	49,4	81,1	54,4

Tabla 13. ΔE entre CIE-L*a*b* de hologramas a partir de objetos físicos Vs. CIE-L*a*b* de carta de color física de acuerdo a fabricante y a la carta iluminada bajo láseres RGB. Reconstrucción con láseres RGB.

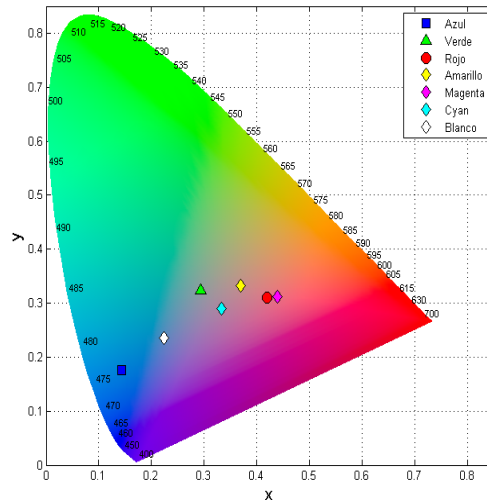
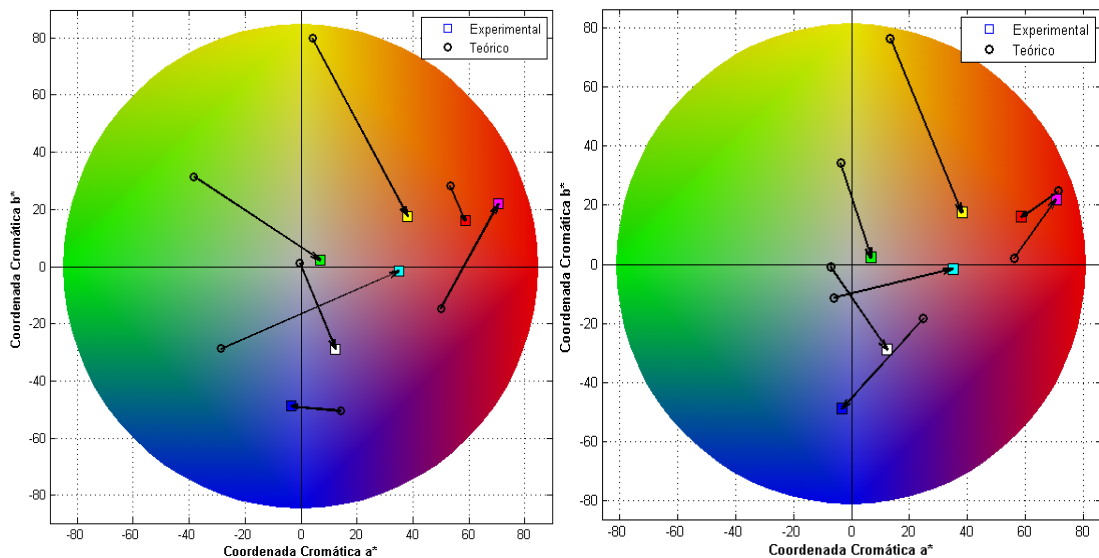


Figura 58. CIE-xy con cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB y registrados a partir de carta de color física.



(a)

(b)

Figura 59. Diferencias CIE-a*b* entre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física, reconstrucción con láseres RGB. (a) Vs. CIE-a*b* del fabricante de la carta. (b) Vs. CIE-a*b* de carta física bajo láseres RGB. Medición con cámara linealizada y caracterizada.

En la Figura 58, se identifica una distribución de coordenadas CIE-xy muy similar a la que se encontró en la medición con espectrómetro en la Figura 33. Respecto a los resultados presentados en la Tabla 13 son muy consistentes respecto a los presentados por la Tabla 4 (medidas con espectrómetro), en lo concerniente a las diferencias de color más altas y más bajas entre cámara y espectrómetro, en especial cuando se comparaban Vs. Las coordenadas del fabricante de la carta; es decir, tanto para cámara como para espectrómetro, las diferencias de color más altas fueron para los hologramas de las muestras Amarillo-16, Cyan-18 y Verde-14; mientras que las más bajas fueron para las muestras Magenta-17, Rojo-15 y Azul-13, cuando se comparaban con las coordenadas entregadas por el fabricante. Cuando se comparaban respecto a las coordenadas de la carta física iluminada con láseres, los hologramas de las muestras Amarillo-16 y Blanco-19 con ambos métodos eran de una diferencia de color alta, mientras que el Magenta-17 para ambos presentó una diferencia pequeña de color.

4.5.3. Resultados para Hologramas reconstruidos con láseres RGB (formato pequeño).

Los resultados presentados a continuación en la Tabla 14 consisten en las diferencias de color medidas con cámara para los hologramas registrados a partir de objeto físico, presentados previamente en la Figura 36. Sus respectivos vectores diferencia CIE- a^*b^* se muestran en la Figura 61. La Figura 60 corresponde a sus valores CIE-xy.

Color	ΔE Con valores teóricos dados por el fabricante		ΔE Con valores teóricos dados por la carta iluminada bajo láseres RGB	
	ΔE (sin lin)	ΔE (con lin)	ΔE (sin lin)	ΔE (con lin)
13-Azul	36,5	48,0	22,5	11,4
14-Verde	46,6	58,1	19,5	25,5
15-Rojo	23,2	26,9	12,6	21,9
16-Amarillo	71,3	70,7	61,9	61,9
17-Magenta	40,4	32,5	24,3	16,8

Tabla 14. Diferencias de color para coordenadas CIE- $L^*a^*b^*$ de imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física Vs. coordenadas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Hologramas reconstruidos con láseres RGB. Carta física en formato pequeño, medición con cámara.

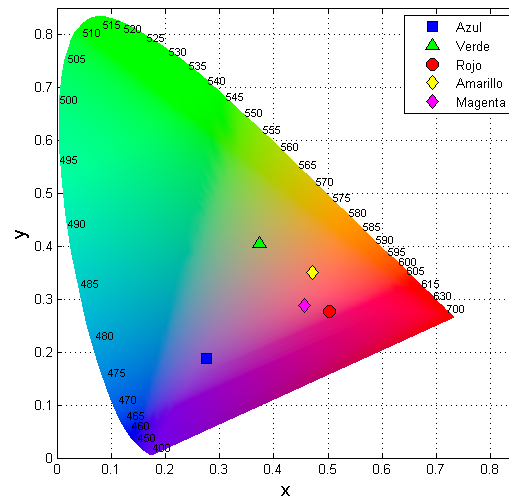


Figura 60. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB registrados a partir de carta física en formato pequeño.

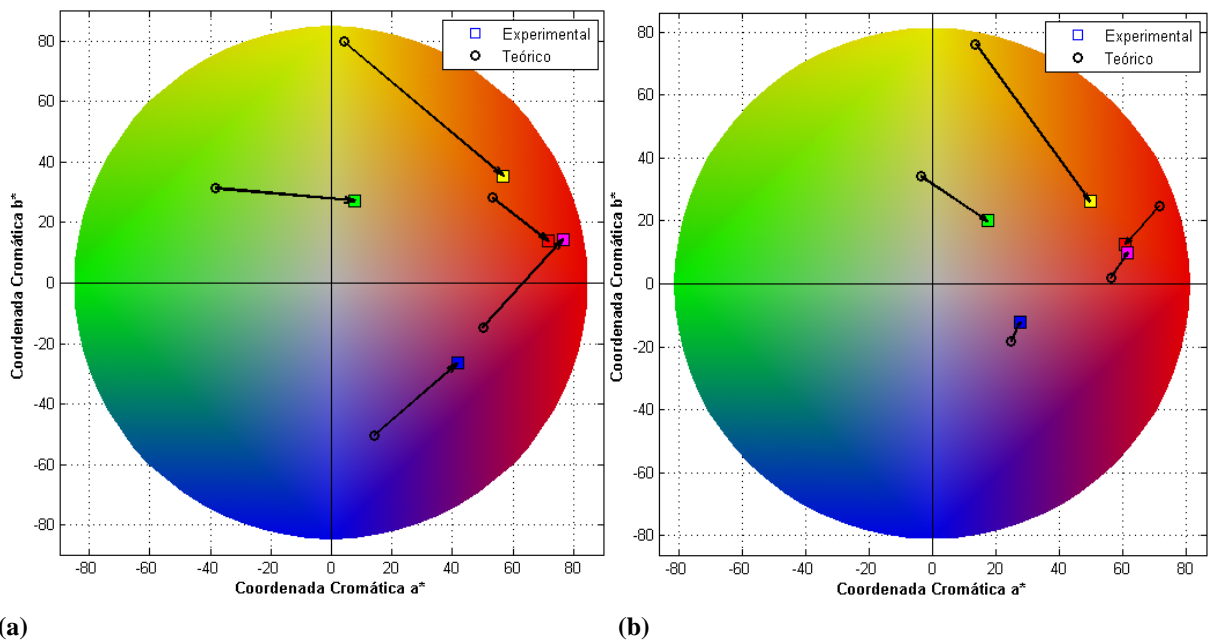


Figura 61. Diferencias CIE-a*b* entre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta de color física formato pequeño. Reconstrucción con láseres RGB. (a) Vs. CIE-a*b* entregados por el fabricante. (b) Vs. CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB. Medición con cámara linealizada y caracterizada

Con respecto a la Figura 60 (medición con cámara) en comparación con la Figura 37 (medición con espectrómetro), se identifica que en su mayoría, las coordenadas CIE-xy de las muestras se ubican en la región roja del espectro cuando son medidas con cámara, (a excepción de la muestra Azul-13), lo cual es similar a los resultados arrojados por el espectrómetro en la Figura 37, donde también se ubican hacia esta región, con tendencia hacia el verde y la muestra Azul-13 se presenta alejada del resto. Un comportamiento parecido se muestra en los diagramas CIE-a*b* correspondientes a la Figura 61 (cámara) y Figura 38 (espectrómetro).

4.6. Medición de color con cámara sobre imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de objetos digitalizados y presentados en monitor LCD.

En esta sección, las medidas con cámara consisten en las mismas realizadas y presentadas previamente con hologramas registrados a partir de objetos físicos, esta vez se realizan sobre los hologramas generados a partir de la presentación sobre monitor LCD. Los montajes utilizados para obtener estas medidas se basan en la Figura 22 para reconstrucción y medición con lámpara de Xenón y en la Figura 25 para reconstrucción y medición con láseres RGB. Los hologramas sobre los cuales se realizaron las medidas corresponden a los de la Figura 39 para hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón, Figura 42 para hologramas reconstruidos con láseres RGB, y Figura 45 para hologramas reconstruidos por Pseudocolor. La técnica de linealización, caracterización y cálculo de diferencias de color es la misma descrita en resultados previos.

4.6.1. Resultados para Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón.

Los datos presentados a continuación en la Tabla 15 corresponden a las medidas realizadas con cámara linealizada y sin linealización sobre los hologramas registrados a partir de la presentación sobre pantalla LCD, reconstruidos con lámpara de Xenón. Las diferencias de color fueron calculadas de acuerdo a los datos teóricos entregados por el fabricante de la carta y también para la carta física iluminada con láseres. La Figura 62 muestra los valores CIE-xy obtenidos para la cámara linealizada y la Figura 63 muestra los vectores CIE-a*b* obtenidos con la cámara linealizada para los mismos hologramas.

Holograma	Muestra	ΔE Con valores teóricos del fabricante		ΔE Con valores teóricos de la carta iluminada bajo láseres RGB	
		ΔE (sin lin.)	ΔE (con lin.)	ΔE (sin lin.)	ΔE (con lin.)
32	13-Azul	37,8	31,7	55,9	54,9
48	14-Verde	232,6	100,6	233,6	93,5
35	15-Rojo	56,8	52,7	48,8	36,5
47	16-Amarillo	41,1	34,0	38,1	28,3
45	17-Magenta	27,4	12,3	33,8	9,3
44	18-Cyan	22,1	30,2	20,4	47,3
39	19-Blanco	52,9	35,5	61,5	44,2

Tabla 15. ΔE entre CIE-L*a*b* de hologramas a partir de objetos digitalizados presentados sobre LCD Vs. CIE-L*a*b* de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Reconstrucción con lámpara de Xenón. Medición con cámara.

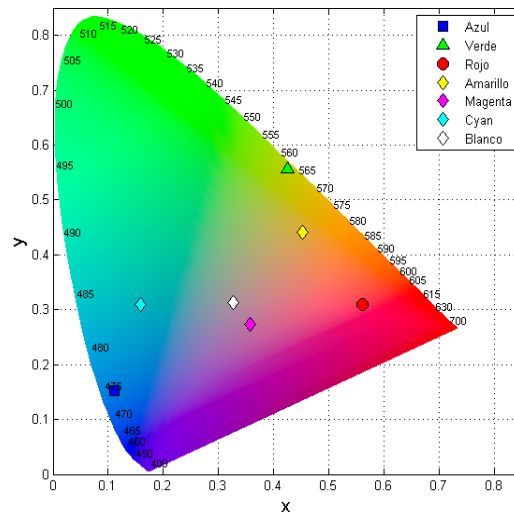


Figura 62. CIE-xy para imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de carta digitalizada y presentada sobre LCD. Hologramas reconstruidos con lámpara de Xenón. Medición con cámara linealizada y caracterizada.

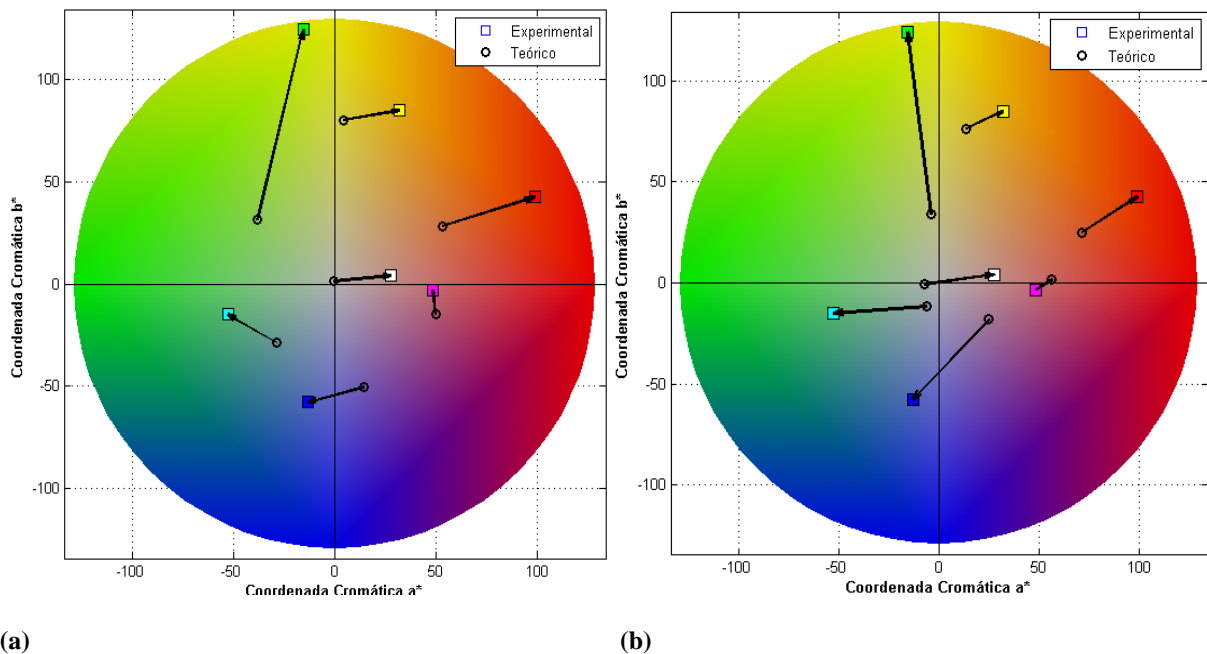


Figura 63. Diferencias CIE-a*b* entre Hologramas obtenidos a partir de la carta de color digitalizada y presentada sobre la pantalla LCD, reconstruidos con lámpara de Xenón. (a) Vs. CIE-a*b* entregados por el fabricante. (b) Vs. CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB. Medición con cámara linealizada y caracterizada.

Realizando un análisis de la Figura 40 (medición con espectrómetro) y Figura 62 (medición con cámara) se encuentra que, al realizar medidas de color con cámara, las coordenadas CIE-xy de los hologramas se encuentran mejor distribuidas sobre las regiones correspondientes a los colores analizados; lo cual no se encuentra para el color medido con espectrómetro, donde las coordenadas

CIE-xy se encuentran más desplazadas hacia la región roja del espectro; este comportamiento también es visible en la Figura 41 (medición con espectrómetro) comparado con la Figura 63 (medición con cámara). En la Figura 63 también es notoria una alta diferencia de color hacia el holograma de la muestra Verde-14.

4.6.2. Resultados para Hologramas reconstruidos con láseres RGB.

Del mismo modo, sobre los hologramas correspondientes a la Figura 42 reconstruidos con láseres RGB y registrados a partir de objetos construidos digitalmente y presentados sobre una pantalla LCD, se realizaron medidas con cámara linealizada y caracterizada. Los resultados se presentan en la Figura 64: para los valores CIE-xy, Figura 65: vectores diferencia CIE-a*b*, y Tabla 16 para las diferencias de color ΔE CIE-L*a*b*.

Holograma	Color	ΔE Con valores teóricos dados por el fabricante		ΔE Con valores teóricos dados por la carta iluminada bajo láseres RGB	
		ΔE (sin lin.)	ΔE (con lin.)	ΔE (sin lin.)	ΔE (con lin.)
43	13-Azul	21,5	35,8	21,0	32,9
48	14-Verde	92,0	46,7	93,2	26,0
35	15-Rojo	25,8	28,2	30,8	29,8
49	16-Amarillo	105,5	17,1	109,2	11,3
45	17-Magenta	58,2	22,2	62,1	26,5
44	18-Cyan	34,2	29,2	21,2	17,4
39	19-Blanco	55,5	43,2	64,1	51,9

Tabla 16. Diferencias de color para coordenadas CIE-L*a*b* de hologramas registrados a partir de objetos digitalizados presentados sobre LCD Vs. Coordenadas teóricas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Hologramas reconstruidos con láseres RGB, medición con cámara.

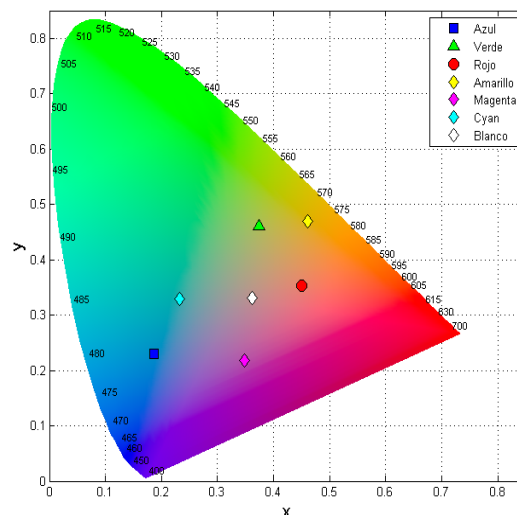
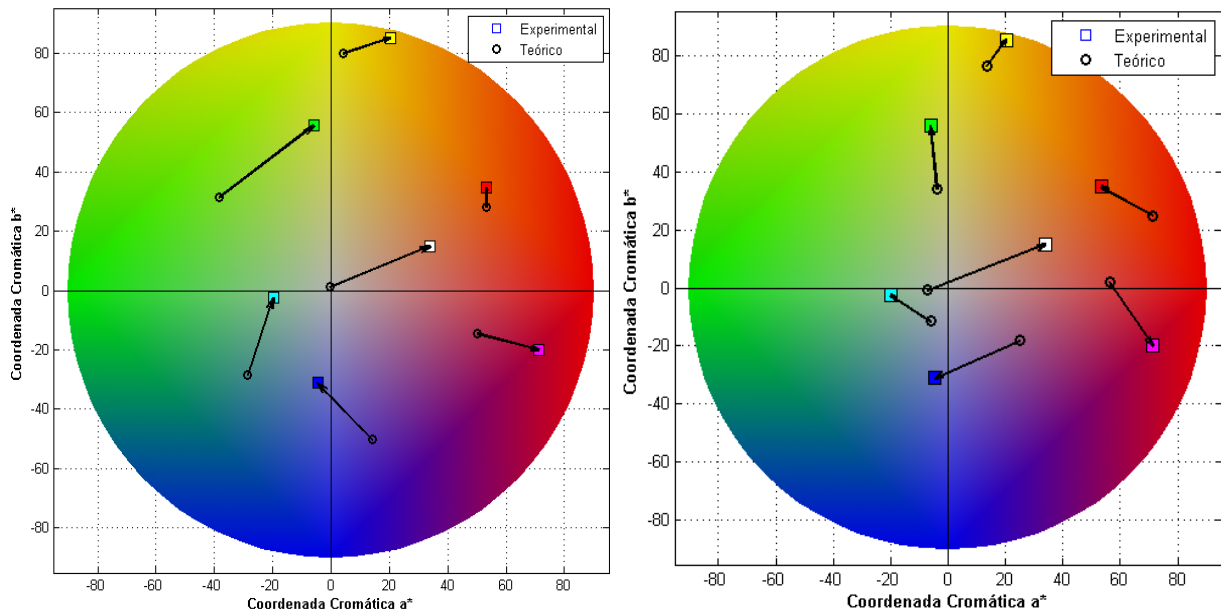


Figura 64. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB registrados a partir de carta digitalizada y presentada sobre LCD.



(a)

(b)

Figura 65. Diferencias CIE-a*b* para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color digitalizada y presentada sobre la pantalla LCD. Reconstrucción con láseres RGB. (a) Valores teóricos: CIE-a*b* entregados por el fabricante. (b) Valores teóricos: CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB.

Realizando una comparación entre las mediciones con cámara (Tabla 16) y las mediciones con espectrómetro (Tabla 7), en hologramas registrados a partir de la presentación sobre LCD y reconstruidos con láseres RGB; se observa que en general, el método de medición con cámara linealizada arrojó diferencias de color más pequeñas; tanto realizando comparaciones con los datos del fabricante de la carta así como con la carta iluminada bajo láseres RGB.

Al comparar la Figura 43 correspondiente a las mediciones con espectrómetro con la Figura 64 presentada anteriormente, se encontró que los colores Azul-13, Verde-14, Rojo-15, Amarillo-16 y Cyan-18 se ubicaron sobre una misma región correspondiente al color que representaban sobre el diagrama CIE-xy, tanto para mediciones con cámara como para mediciones con espectrómetro. Para los hologramas de las muestras Magenta-17 y Blanco-19 las regiones variaron entre espectrómetro y cámara. Igualmente, el gamut u área abarcada por los colores registrados es mucho mayor para los hologramas al ser medidos con espectrómetro que con cámara. Al realizarse la misma comparación en los diagramas CIE-a*b*, es decir entre, la Figura 44 (a) y Figura 65 (a), se nota que, las coordenadas cromáticas arrojadas por la cámara y por el espectrómetro son similares,

o corresponden a la misma región al ser comparadas entre sí; con la excepción de la muestra Blanco-19 que presenta una magnitud vectorial o diferencia en coordenadas CIE-a*b* mayor cuando se analiza su correspondiente holograma con cámara. De acuerdo al espectrómetro y a cámara linealizada, es decir, a la Tabla 7 y Tabla 16 al compararse las diferencias de color de hologramas Vs. Fabricante, es notorio que la diferencias ΔE arrojadas para el holograma de la muestra Blanco-19 son las más diferentes entre un método y otro.

A partir de los análisis realizados con cámara para hologramas registrados por medio de la presentación sobre pantalla LCD, se encuentran consistencias respecto a las medidas realizadas con espectrómetro, pero la similitud en el comportamiento empieza a disminuir, caso contrario a los hologramas registrados a partir de objeto físico. Estos resultados pueden encontrar explicación en el hecho de que se está involucrando en todo el sistema un elemento adicional que consiste en la pantalla LCD, la cual también está realizando cierta modificación del color, además de que el montaje para este registro es un poco más complejo y con mayor cantidad de variables a controlar que en el registro de hologramas a partir de objeto físico.

4.6.3. Hologramas reconstruidos con láseres RGB-Pseudocolor.

Finalmente, aquellos hologramas registrados a partir de presentación sobre pantalla LCD y reconstruidos con láseres mediante Pseudocolor, también fueron medidos con cámara linealizada y caracterizada, los resultados corresponden a los que se presentan a continuación en la Tabla 17, Figura 66 y Figura 67.

Holograma	Color	ΔE Con valores teóricos dados por el fabricante		ΔE Con valores teóricos dados por la carta iluminada bajo láseres RGB	
		ΔE (sin linealizar)	ΔE (con linealización)	ΔE (sin linealizar)	ΔE (con linealización)
32	13-Azul	30,9	25,5	35,2	25,5
48	14-Verde	29,6	33,9	36,3	12,7
35	15-Rojo	17,9	29,9	19,5	30,8
47	16-Amarillo	81,9	16,4	86,1	6,7
45	17-Magenta	14,0	13,7	18,0	16,4
44	18-Cyan	25,9	32,5	13,3	49,0
39	19-Blanco	39,1	29,2	45,5	36,4

Tabla 17. Diferencias de color entre CIE-L*a*b* de hologramas registrados a partir de objetos digitalizados presentados sobre LCD Vs. Coordenadas de carta de color física de acuerdo a fabricante y a carta iluminada con láseres. Hologramas reconstruidos con láseres RGB por Pseudocolor, medición con cámara.

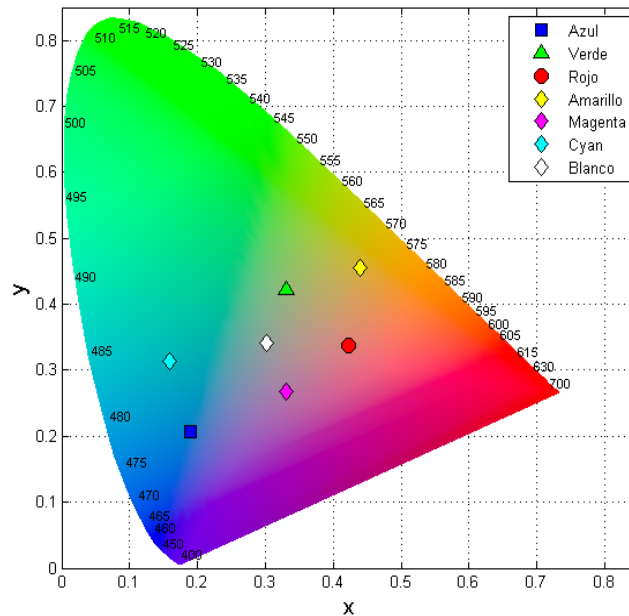
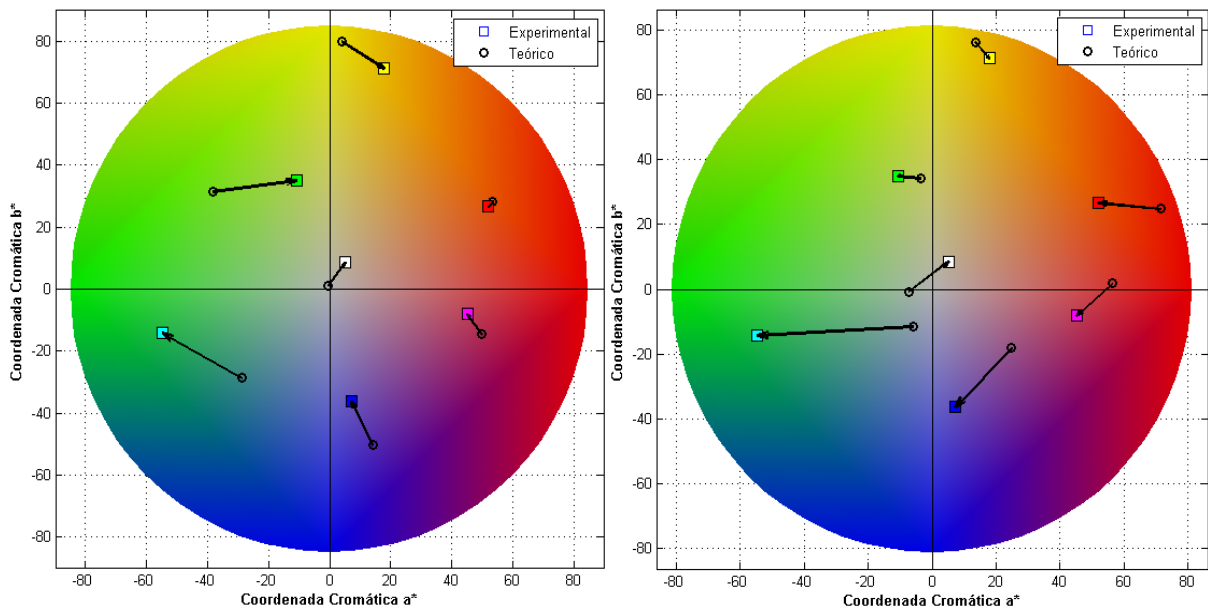


Figura 66. Coordenadas CIE-xy para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Hologramas reconstruidos con láseres RGB por Pseudocolor registrados a partir de carta digitalizada y presentada sobre LCD.



(a)

(b)

Figura 67. Diferencias CIE-a*b* para la medida de color arrojada por la cámara linealizada y caracterizada. Imágenes holográficas obtenidas a partir del registro de la carta de color digitalizada y presentada sobre la pantalla LCD. Reconstrucción con láseres por Pseudocolor. (a) Valores teóricos: CIE-a*b* entregados por el fabricante. (b) Valores teóricos: CIE-a*b* de la carta física bajo láseres RGB.

Al compararse los valores ΔE entre espectrómetro y cámara linealizada de la Tabla 8 y Tabla 17 respectivamente, se llega a que para ambos métodos, una de las muestras con mayor diferencia de color corresponde al holograma de la muestra Cyan-18, esto tanto realizando la comparación Vs. Fabricante como Vs. Tarjeta de color física iluminada con láseres. Así mismo, al observarse los diagramas CIE-a*b* (Figura 47 con espectrómetro y Figura 67 con cámara) se encuentra que la magnitud correspondiente al vector diferencia CIE-a*b* para el holograma de la misma muestra: Cyan-18, en los dos métodos es mayor que para los hologramas de las muestras Blanco-19, Rojo-15, Magenta-17 y Azul-13, especialmente en la comparación respecto a los valores dados por el fabricante de la carta.

En general, las menores diferencias de color se presentaron para las medidas realizadas con cámara. Al compararse la Figura 46 con la Figura 66, es decir, los mapas CIE-xy para medición con espectrómetro y cámara respectivamente, se encuentra que todos los colores se ubican sobre regiones similares en ambos métodos.

4.7. Caracterización de LCD con cámara.

Para la caracterización con cámara del LCD se realizó un procedimiento muy similar al descrito en la sección de la caracterización con espectrómetro. Se presentaron imágenes con valores RGB sobre el LCD desde 0 a 255 en pasos de 32 en 32, es decir, se construyeron digitalmente imágenes de la escala de grises, y se realizó una lectura de sus correspondientes valores RGB a la salida del dispositivo con la cámara, igualmente se construyeron estas imágenes variando un solo canal, R, G o B de 0 a 255, manteniendo los otros dos en 0. Todas las medidas se hicieron con los tres láseres encendidos a igual intensidad. Las imágenes adquiridas con la cámara corresponden a las previamente presentadas en la caracterización de LCD con espectrómetro de la sección 4.3, Figura 49. Los resultados se muestran a continuación en la Figura 68.

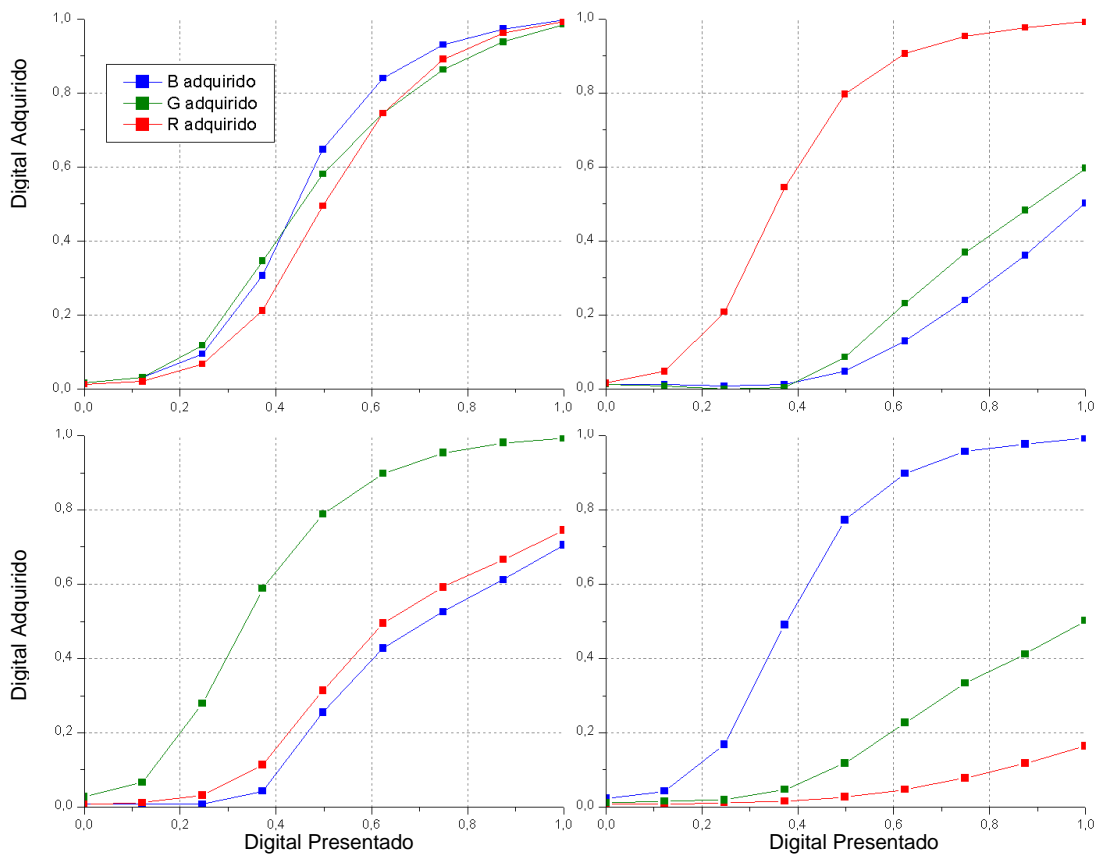


Figura 68. Caracterización de LCD con cámara. De izquierda a derecha y de arriba abajo: a. R=G=B= 0:255. b. G=B=0, R=0:255. c. R=B=0, G=0:255. d. R=G=0, B=0:255.

En la Figura 68 (a) se confirma el comportamiento típico o curva “S” de un LCD de acuerdo a lo mencionado por Sharma, G [28] y previamente mostrado en la Figura 16 (a) En la Figura 68 (c) es decir, cuando sólo el canal verde de la imagen se variaba mientras los otros dos se mantenían en 0,

los valores RGB de salida en el LCD medidos con cámara fueron mayores que para las Figura 68(b) y (d), que corresponden a ensayos cuando se variaban los canales Rojo (Figura 68 (b)) o Azul (Figura 68 (d)). Así mismo, el comportamiento de los canales Rojo y Azul en la Figura 68 (c), es muy similar, mientras que en las Figura 68 (b) y (d) el comportamiento de los canales que se mantenían en cero no lo era, es decir: Rojo con Verde en la Figura 68 (d) y Verde con Azul en la Figura 68 (b). Todo esto da cuenta de un comportamiento diferente del canal Verde (G) respecto a los otros dos; lo cual puede estar muy ligado a la Figura 48, donde se detallaban las intensidades de entrada y salida al LCD por medio de un espectrómetro, y se mostraba una transmitancia mayor para la longitud de onda del verde que para el resto.

5. CONCLUSIONES

En el desarrollo de esta tesis para la gestión y reproducibilidad del color se escogió el modelo CIE- $L^*a^*b^*$, y CIE-xy, ya que de acuerdo a la revisión del estado del arte, en holografía a color estos modelos han sido utilizados para las medidas mencionadas. En general, mediante estas medidas en las imágenes holográficas se encontró similitud entre las características cualitativas (por observación) y las cuantitativas (por aplicación del método). El método implementado hace uso de espectrómetro, cámara, y fuentes de reconstrucción tipo luz día (lámpara de xenón) y láseres RGB, equipos con los cuales se cuenta en el laboratorio de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT. Debido a esto, se considera que el modelo empleado es viable para ser usado en la gestión y medición de la reproducibilidad del color en hologramas de reflexión.

Los resultados presentados se basan en algoritmos implementados en Matlab® que realizan el cálculo de coordenadas XYZ a partir de la potencia espectral relativa de la fuente de reconstrucción empleada (láseres RGB o lámpara de Xenón) obtenida a partir de espectrómetro. Estos algoritmos fueron basados en modelos existentes en Matlab®, que consideran la generación del color mediante procesos de absorción, reflexión o transmisión, los cuales fueron adaptados a la forma en la cual se genera el color en hologramas, es decir, por fenómenos de difracción.

Se realizó la linealización y caracterización de una cámara CMOS-RGB con la capacidad de gestionar el color en cualquiera de las etapas de registro de un holograma de reflexión a color: bien sea partiendo de un objeto real (físico), o de uno presentado digitalmente sobre un monitor LCD a color. La efectividad de este método se muestra en el hecho que, en varias de las etapas de registro evaluadas, existe cierta consistencia entre ambos métodos: con cámara linealizada y caracterizada, y con espectrómetro. De acuerdo a algunos autores, el mejor ajuste de linealización que se puede realizar es mediante curvas de sensibilidad de cámara, lo cual implicaría una caracterización más a fondo de este dispositivo, lo que representa un trabajo futuro en ésta área.

Existen ciertas ventajas que trae realizar mediciones con cámara, es decir, al capturar la imagen de la muestra bajo las mismas condiciones, se puede controlar el área a monitorear, así como realizar un promediado de valores RGB sobre esa área. Con el espectrómetro este control también se puede

realizar, sin embargo, debido a que la imagen que se observa es sobre una pequeña área de fibra óptica, se vuelve más complejo maniobrar con la misma para monitorear el área deseada al ángulo de reconstrucción adecuado. Así como la cámara tiene esta ventaja, el espectrómetro es un elemento que no requiere algún tipo de corrección, y es diseñado para gestión de color con mucho detalle a nivel de distribución espectral. A la luz de este análisis, podría decirse que ninguno de los elementos es mejor que el otro; todo depende del uso y exactitud que se requiera en el laboratorio. Con la cámara como elemento para la gestión del color se crea un precedente novedoso en la holografía, ya que no se encuentran referencias con cámara como método de medición.

En los resultados de medición del color tanto con cámara como con espectrómetro en los hologramas registrados a partir de objeto físico así como de objeto presentado en una pantalla LCD a color se evidenciaron los factores que pueden afectar la reproducibilidad del color:

- El tipo de película o material de registro, lo cual se evidenció en las imágenes holográficas de muestras con componentes verdes, debido a la baja sensibilidad de la película hacia estas longitudes de onda, se presentaron diferencias de color altas relacionadas a muestras con colores de estas componentes, en comparación a las imágenes holográficas de muestras hacia el rojo y azul, que se veían beneficiadas gracias a la mayor sensibilidad del material hacia estos colores.
- Las fuentes empleadas para el registro pueden afectar la medida en las imágenes holográficas, lo cual se verificó cualitativa y cuantitativamente en los hologramas que contenían tonos verdes y requerían altas intensidades del láser de éste color. Debido al “mode hopping” de este láser se obtuvieron también diferencias de color altas para dichas muestras en comparación con las de componentes rojo y azul, por lo tanto, las fuentes de reconstrucción también incrementan o disminuyen la reproducibilidad del color en los hologramas.
- En el caso de hologramas registrados a partir de la presentación sobre pantalla LCD también se observó cierta modificación en el color, ya que este elemento tiene un comportamiento asociado a los primarios R, G, B.

El presente trabajo, encontró un uso satisfactorio, bien sea de cámara a color o espectrómetro en la gestión de color en hologramas de reflexión a color. Siendo así, se plantea un procedimiento basado en los siguientes pasos:

- a. Gestión del color del objeto a registrar, si es un objeto físico (real) se deben obtener sus coordenadas de color CIE- $L^*a^*b^*$ bien sea por cámara o espectrómetro, de acuerdo a la fuente de luz de reconstrucción, normalmente una fuente continua como lámpara de xenón, halógena o discretizada tipo LED. Dichas coordenadas se hayan por relación de curva de potencia del objeto Vs. La curva de potencia de la fuente empleada. En caso de medir con una cámara a color, esta debe pasar por un previo proceso de linealización y caracterización.
- b. Gestión del color del objeto a registrar bajo la fuente de luz empleada para el registro: esto implica iluminar el objeto con los tres láseres RGB y realizar el mismo procedimiento anterior con una fuente de luz no continua. Este paso encuentra su utilidad en el hecho de que se podría evaluar qué tan modificado se encuentra el color durante esta etapa del registro.
- c. Gestión del color del holograma reconstruido: Una vez obtenido el holograma se puede evaluar su color bajo dos condiciones, la primera, bajo la fuente de luz con la cual se evaluó en el paso 1, es decir condiciones bajo las cuales un observador común apreciaría el objeto comparado con su imagen reconstruida y la segunda, bajo la misma fuente de luz de registro, es decir láseres RGB.
- d. El “objeto” es una imagen adquirida del objeto físico o, con sus coordenadas de color construido digitalmente mediante software, para ser presentado, en cualquiera de los casos en un monitor LCD. Puesto que este dispositivo es del tipo RGB, implica entonces una caracterización, que puede ser ejecutada con cámara o espectrómetro como se planteó en los pasos anteriores.
- e. Finalmente, lo que espera el usuario es un holograma reconstruido que sea lo más similar posible al objeto registrado y verificarlo mediante medición del color. Debido a esto, el usuario compara cualitativamente mediante observación objeto con Holograma con una misma fuente de luz. Este trabajo presentó que, de forma cuantitativa también se puede realizar esta comparación calculando la diferencia de color ΔE , entre las coordenadas CIE- $L^*a^*b^*$ del paso (a), es decir del objeto Vs. Las coordenadas del holograma reconstruido en el paso (c). De esta forma, se presentó un método objetivo y cuantitativo de evaluar el color en hologramas.

La importancia de los resultados obtenidos radica en que aunque se esté partiendo de modelos de color reportados en la literatura, los cuales utilizan criterios colorimétricos estándar obtenidos en contextos diferentes al nuestro, este tipo de resultados son completamente necesarios ya que no existe un procedimiento o método único para la medición del color en imágenes holográficas, cada posible medición depende del tipo de holograma que se quiere registrar y las condiciones experimentales disponibles. En nuestro caso, esto está ligado con el hecho de registrar estereogramas holográficos a partir de objetos que son presentados en un LCD a color. Particularmente se ha considerado que la reproducibilidad del color en holografía parte de una modificación intrínseca del color al ser iluminado por fuentes de luz discreta (láseres) y de una modificación en la generación del color en el holograma reproducido por difracción de la luz. Estos resultados posibilitan tener una mayor comprensión de la complejidad de la reproducción del color en sistemas de estereoscopía holográfica que pasa por las diferentes etapas consideradas en este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Hubel, P.M and Solymar, L.** *Color Reflection Holography: Theory and Experiment.* Applied Optics, Vol. 30, número 29, 1991.
- [2] **Noguchi, M.** *Color Reproduction by Multicolor Holograms with White-Light Reconstruction.* Applied Optics, Vol. 12, número 3, 1973.
- [3] **Bjelkhagen, Hans and Mirlis, Evangelos.** *Color holography to produce highly realistic three-dimensional images.* Applied Optics, Vol. 47, número 4, 2008.
- [4] **Bjelkhagen, Hans and Brotherthon-Rathcliffe, David.** *Ultra-Realistic Imaging: Advanced Techniques in Analogue and Digital Colour Holography.* Boca Ratón : Taylor & Francis Group, 2013.
- [5] **Yang, F, Murakami, Y and Yamaguchi, M.** *Digital color management in full-color holographic three-dimensional printer.* Applied Optics, Vol. 51, número 19, 2012,
- [6] **Martínez, F.M.** *Diseño de un colorímetro triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB.* 2001.
- [7] **Velásquez, D.** *Estudio Experimental de Medios de Registro para la Obtención de Hologramas a Color.* Medellín : s.n., 2011.
- [8] **Sachs, J.** *Color Management, Digital Light & Color.* 2000.
- [9] **Born, M and Wolf, E.** *Principles of Optics.* s.l. : Cambridge University Press, 1999.
- [10] **Goodman, J.W.** *Introduction to Fourier Optics.* New York : McGraw-Hill, 1988.
- [11] **Pizzanelli, D.** *The development of direct-write digital holography.*The Holographer Technical Review, 2004.
- [12] **Halle, M.W.** *The Generalized Holographic Stereogram.* Optics Communications, 1991.
- [13] **Munday, Rob and Levine, Chris.** *A holographic portrait of queen Elizabeth II.* 2004.
- [14] **Torcal Milla, F J, et al.** *Realización de estereogramas holográficos a partir de imágenes sintéticas.* Madrid : s.n., Óptica Pura y Aplicada, Sociedad Española de Óptica, Vol. 44, 2011.
- [15] **Benton, S A and Bove, Jr, V M.** *Holographic Imaging.* New Jersey : Wiley Interscience, 2008.
- [16] **DeBitetto, D J.** *Holographic panoramic stereograms synthesized form white-light recordings.* Applied Optics, Vol. 8, número 8, 1969.

-
- [17] **Saxby, G.** *Practical Holography*. London : Prentice Hall International, 2004.
- [18] **Bass, M.** *Handbook of Optics*. s.l. : McGraw-Hill. Sponsored by the Optical Society of America, Vol. 1, 1995.
- [19] **Shevell, S.** *Science of Color*. s.l. : Optical Society of America, 2003.
- [20] **Malacara, Daniel.** *Color vision and colorimetry: Theory and Applications*. Bellingham, Washington : SPIE PRESS, 2011.
- [21] **Westland, S and Ripamonti, C.** *Computational Colour Science using Matlab*. s.l. : Jhon Wiley & Sons, 2004.
- [22] **Sangwine, S and Horne, R.** *Colour image processing handbook*. s.l. : Chapman & Hall, 1998.
- [23] X-RITE PHOTO. *ColorChecker Classic*. [Online]
http://xritephoto.com/ph_product_overview.aspx?ID=1192.
- [24] **Westland, S, Cheung, V and Thomson, M.** *Accurate Estimation of the Nonlinearity of Input/Output Response for Color Cameras*. s.l. : Wiley. Color Research and Application, Vol 29, número 6, 2004.
- [25] **Cheung, V, Westland, S, Connah, D and Ripamonti, C.** *A comparative study of the characterization of colour cameras by means of neural networks and polynomial transforms*. s.l. : John Wiley & Sons, Journal of Coloration Technology, Vol. 120, número 1, 2006.
- [26] **Khisa, S.** *Characterization and Calibration of a LCD display bases ond a limited set of color samples*. 2010.
- [27] **Brainard, D.H, Pelli, D.G and Robson, T.** *Display Characterization*. s.l. : Wiley, 2002.
- [28] **Sharma, G.** *Comparative evaluation of color characterization and gamut of LCDs versus CRTs*. Proceedings of SPIE, Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Applications VII, Vol. 4663, 2002.
- [29] **Giraldo Castaño, Leidy Marcela.** *Registro de hologramas a partir de objetos planos generados en un LCD*. Medellín : s.n., 2012.
- [30] **3M.** www.solutions.3m.com. [Online]
- [31] **Palacios, N, Velásquez, D.** *Evaluation between methods for the color measurement in holograms by using a CMOS-RGB camera and a spectrometer*, 2013, Proceedings of SPIE, 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications, Vol. 8785.

- [32] **Palacios, N, Velásquez, D.** *Método para la gestión del color de objetos en un LCD a color iluminados con láseres RGB*, 2013, XIII Encuentro Nacional de Óptica ENO, IV Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones.

7. ANEXOS

A. Montajes experimentales para registro de hologramas de reflexión y medición de color.

I. Montaje para el registro de holograma de reflexión por rayo simple a partir de objeto real.

El montaje que se muestra a continuación es una fotografía tomada en laboratorio, que consiste en el mismo montaje para registro de holograma de reflexión por rayo simple a partir de objetos reales presentado en la Figura 18.

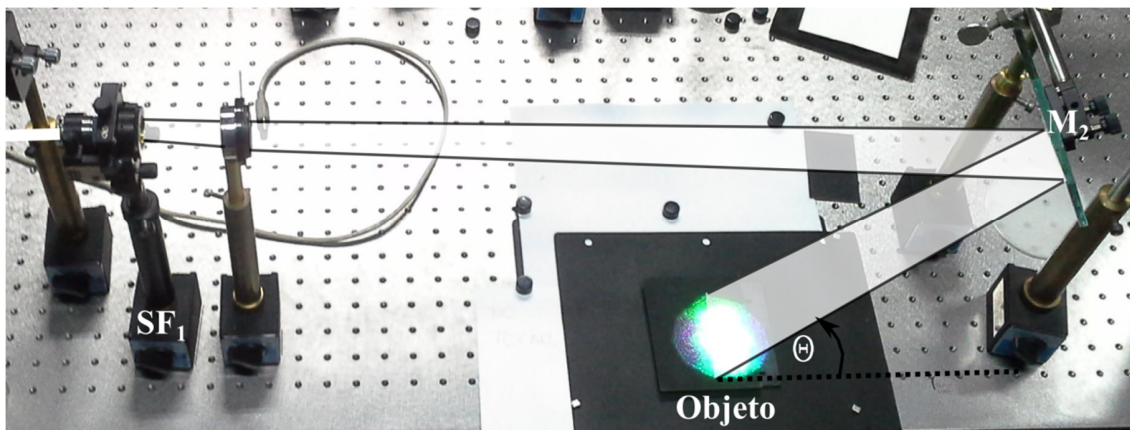


Figura A. 1. Montaje experimental empleado para el registro de holograma de reflexión por rayo simple a partir de objetos reales.

II. Montaje para el registro de holograma de reflexión a partir de objetos presentados sobre LCD.

En la Figura A. 1 se detalla el montaje en laboratorio para el registro de hologramas de reflexión a partir de la presentación sobre LCD de los objetos construidos digitalmente, esta fotografía corresponde al esquema de la Figura 19.

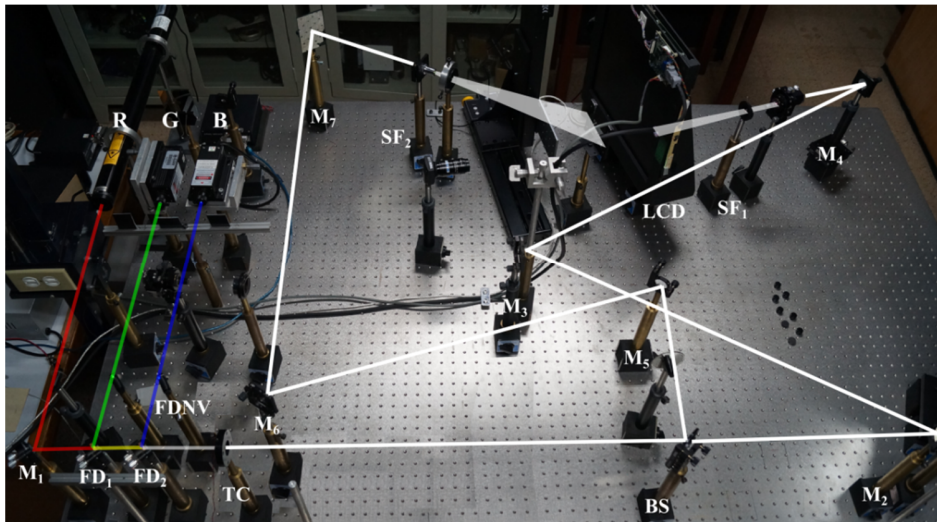


Figura A. 2. Montaje experimental para el registro de holograma de reflexión a partir de objetos presentados en pantalla LCD.

III. Montaje Experimental para medición de color sobre carta de color con espectrómetro o cámara y lámpara de Xenón.

En la Figura A. 3 se muestra el montaje que se utilizó para medición de color con espectrómetro o cámara y lámpara de Xenón en carta de color u holograma.

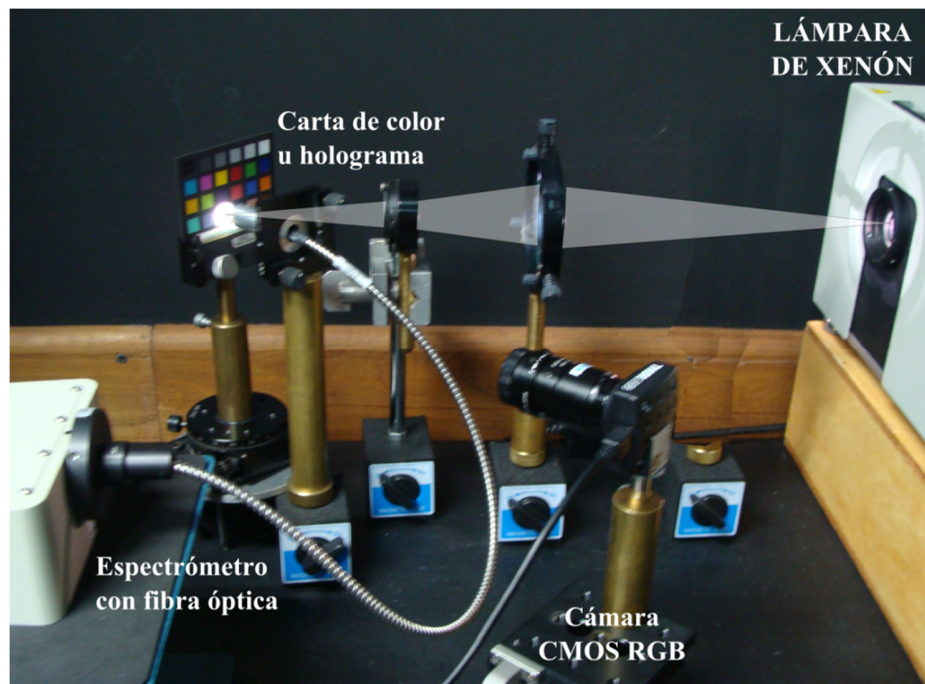


Figura A. 3. Montaje Experimental para medición de color sobre carta de color u holograma con cámara o espectrómetro y Lámpara de Xenón.

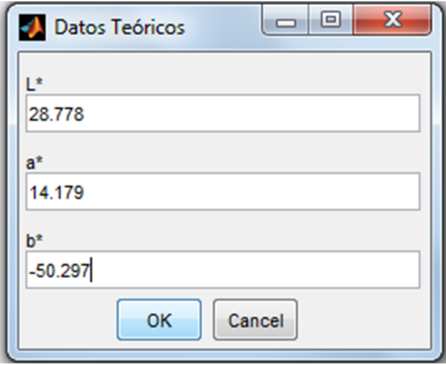
B. Interfaz gráfica programada para la presentación de resultados de medición de color.

Se programó una interfaz gráfica con el objetivo de permitir una visualización de resultados más cómoda para el usuario. En ésta se solicitan determinadas variables básicas tales como: método de medición a emplear, muestra a evaluar y valores teóricos respecto a los cuales se comparará. A continuación, se muestra como ejemplo la imagen del holograma h19, correspondiente al registro del color Azul-13 por rayo simple y reconstruido con lámpara de Xenón, los resultados corresponden a los presentados previamente en la Tabla 3 para medición con espectrómetro y Tabla 12 para medición con cámara.

Adicionalmente, la interfaz tiene una selección que hace parte de la caracterización de LCD, esta consiste en ingresar los datos necesarios para la construcción de una muestra de color sobre el LCD de acuerdo a las coordenadas R, G, B dadas por el usuario, coordenadas (x,y) así como ancho y alto del objeto a dibujar.

I. Selección del método y escritura de los valores CIE-L*a*b* teóricos

En este primer paso, en la Figura B. 1 se observa la interfaz solicita al usuario los valores teóricos CIE-L*a*b* de la muestra a analizar.



The image shows a Windows-style dialog box titled "Datos Teóricos". It contains three text input fields for colorimetric data: L* with the value 28.778, a* with the value 14.179, and b* with the value -50.297. At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura B. 1. Escritura de los valores teóricos CIE-L*a*b* de la muestra a analizar.

II. Selección de la curva de difracción del holograma a analizar

En este paso, se solicita al usuario la curva de difracción del holograma a analizar, la cual se encuentra en formato tipo xls.

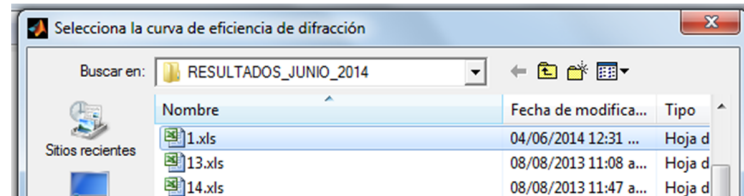


Figura B. 2. Selección de la curva de difracción del holograma a analizar.

III. Selección de la referencia empleada o fuente de luz con que se reconstruyó

De acuerdo a la Ecuación (3), el color es determinado además de la reflectancia de la muestra, también por la curva de distribución espectral de la referencia, o en este caso de la fuente empleada para reconstrucción, el objetivo de este paso es solicitar al usuario el archivo xls con esta información.

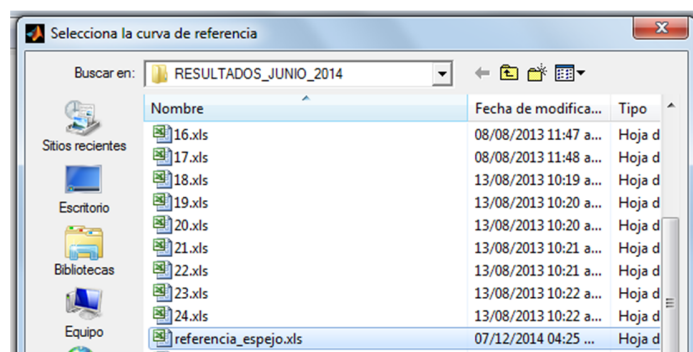


Figura B. 3. Selección de la fuente de luz empleada como referencia.

IV. Selección de la imagen del holograma analizado

Finalmente, y aunque para el método de medición con espectrómetro no se necesita la imagen del holograma, es importante observar este elemento a medida que se analizan junto con los resultados.

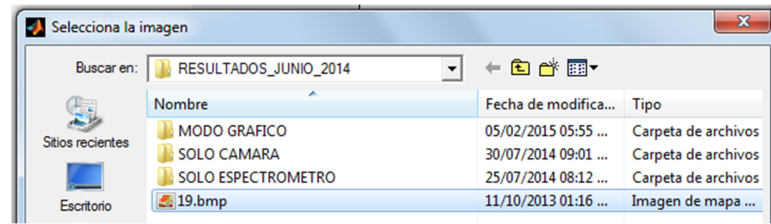


Figura B. 4. Selección de la imagen del holograma analizado.

V. Visualización de resultados con espectrómetro

En la Figura B. 5 se representa la visualización final que se obtiene de la interfaz con los correspondientes mapas CIE-L*a*b* y CIE-xy, las coordenadas teóricas, coordenadas experimentales obtenidas para la imagen holográfica y el vector diferencia detallado. Además, se muestra la imagen del holograma analizado.

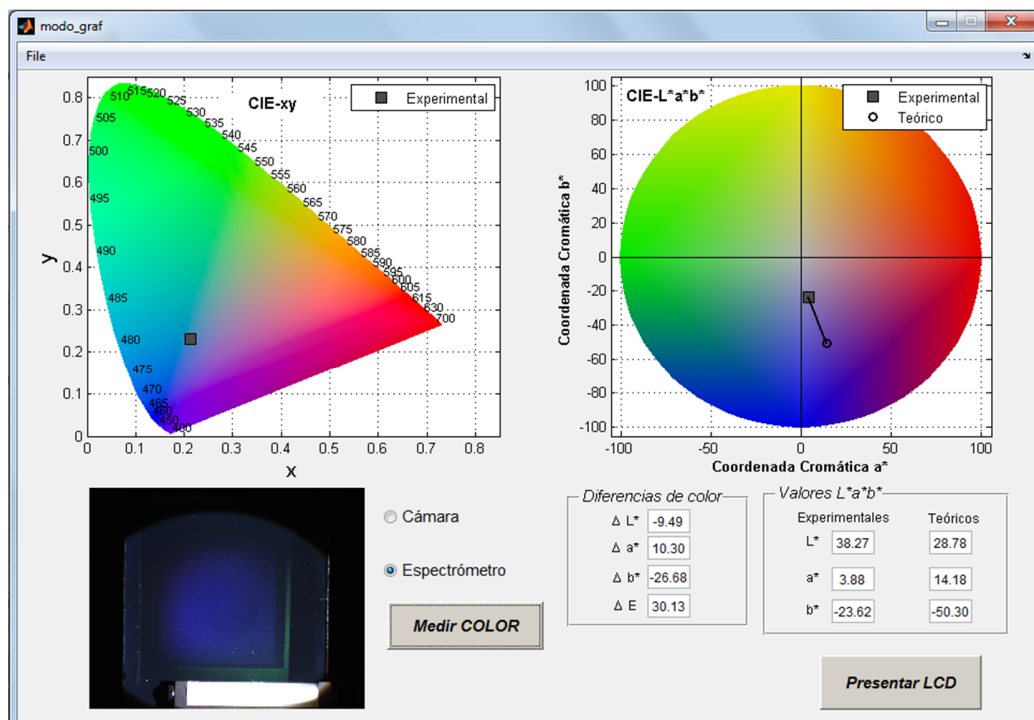


Figura B. 5. Visualización de resultados con espectrómetro como método de medición.

VI. Visualización de resultados con cámara, detalle en el área de interés y selección de método tipo cámara

La interfaz empleada para la cámara como método de medición del color es la misma que con el espectrómetro, sólo basta con seleccionar la opción *Cámara*, escoger la imagen del holograma a analizar y definir el área a analizar sobre la imagen. Los resultados se observan en la Figura B. 6, con el detalle del área analizada.

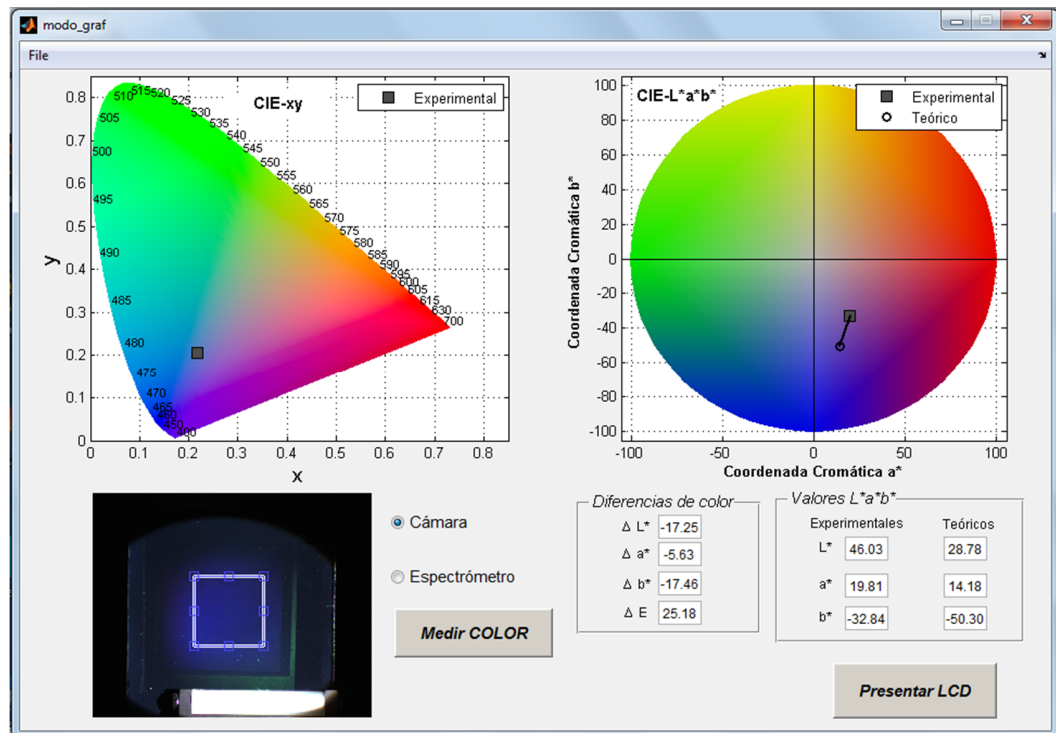
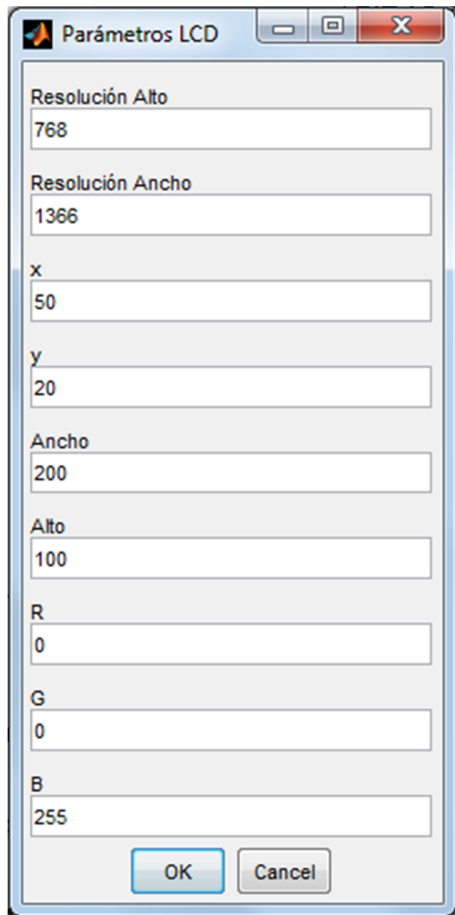


Figura B. 6. Detalle de resultados obtenidos con cámara como método de medición del color y área de interés sobre la imagen.

C. Presentación de imágenes construidas digitalmente sobre LCD.

Esta opción fue agregada a la interfaz debido a que era necesario tener una herramienta que de forma sencilla, permita al usuario ubicar su imagen construida digitalmente con coordenadas R, G, B en determinada posición y tamaño. Esta sección de la interfaz fue programada con base a la referencia [26]. La Figura C. 1 presenta los parámetros requeridos para este paso, y cómo se desplegaría sobre el LCD la muestra a registrar, en este caso, toda la pantalla se cubre de negro y de acuerdo a las coordenadas, tamaños y valores R, G, B ingresados por el usuario se crea la imagen.



The image shows a Windows-style dialog box titled "Parámetros LCD". It contains several input fields with the following values:

Field	Value
Resolución Alto	768
Resolución Ancho	1366
x	50
y	20
Ancho	200
Alto	100
R	0
G	0
B	255

At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.



Figura C. 1 Detalle de los valores ingresados por usuario para presentar imagen construida digitalmente sobre LCD. Presentación de muestra azul (0, 0, 255) sobre LCD de acuerdo a los parámetros

D. Comparación de imágenes holográficas con objeto registrado iluminado con lámpara de Xenón y láseres RGB.

En las siguientes figuras se presentan comparaciones entre las imágenes capturadas para cada uno de los hologramas comparados con los objetos físicos registrados iluminados con lámpara de Xenón y con láseres RGB.

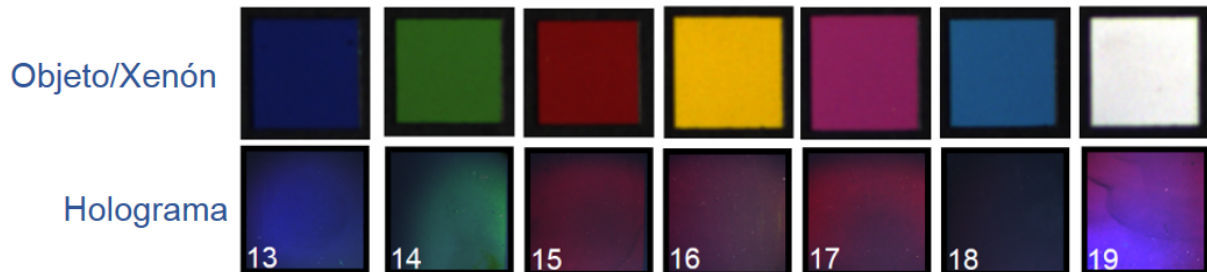


Figura D. 1 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con lámpara de Xenón y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma lámpara.

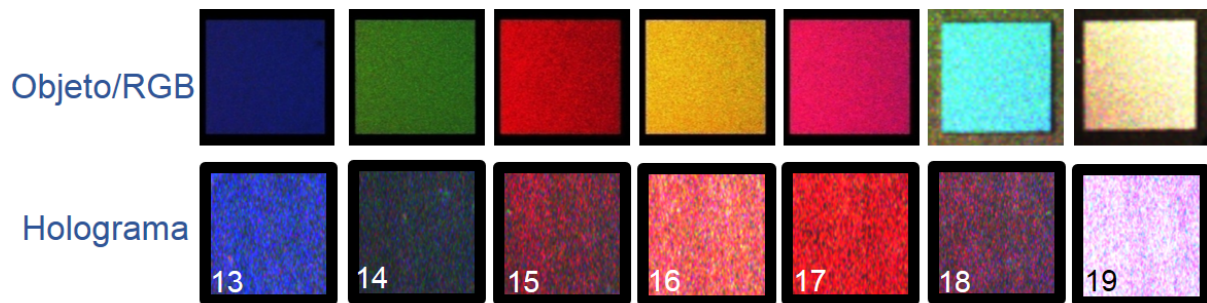


Figura D. 2 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente.

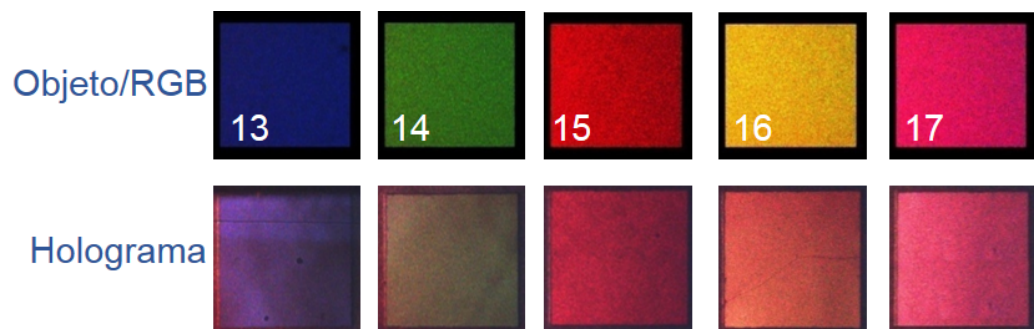


Figura D. 3 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente. Carta de color en formato pequeño. [31]

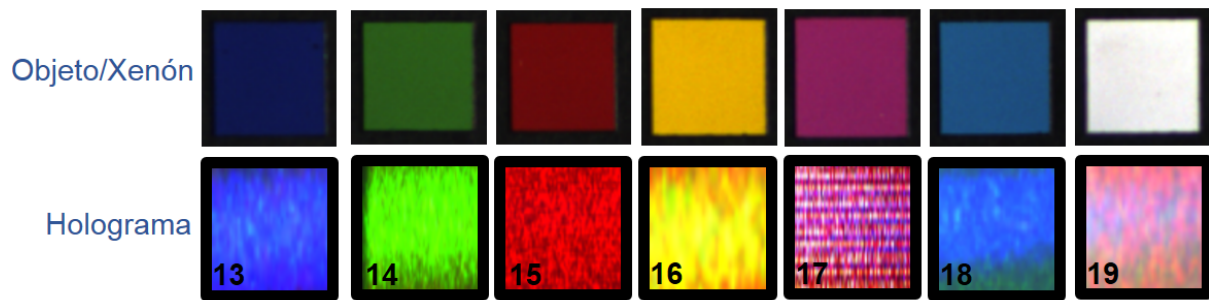


Figura D. 4 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con lámpara de Xenón y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente, registradas a partir de la presentación en LCD.

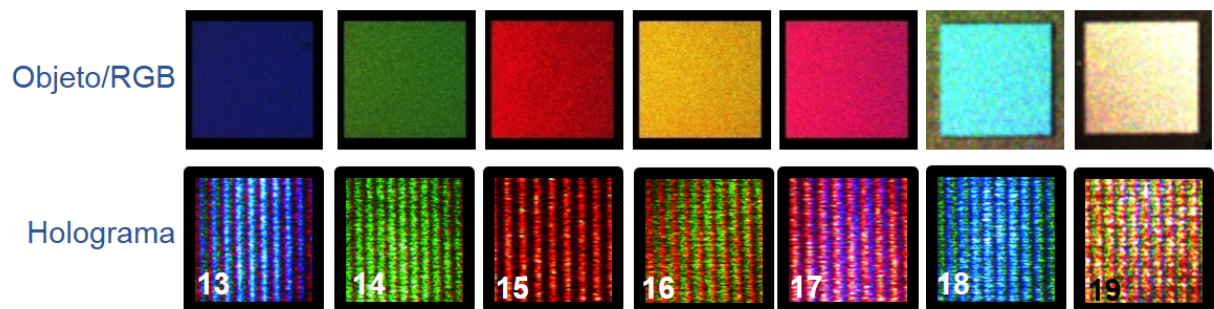


Figura D. 5 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente. Registro a partir de la presentación en LCD.

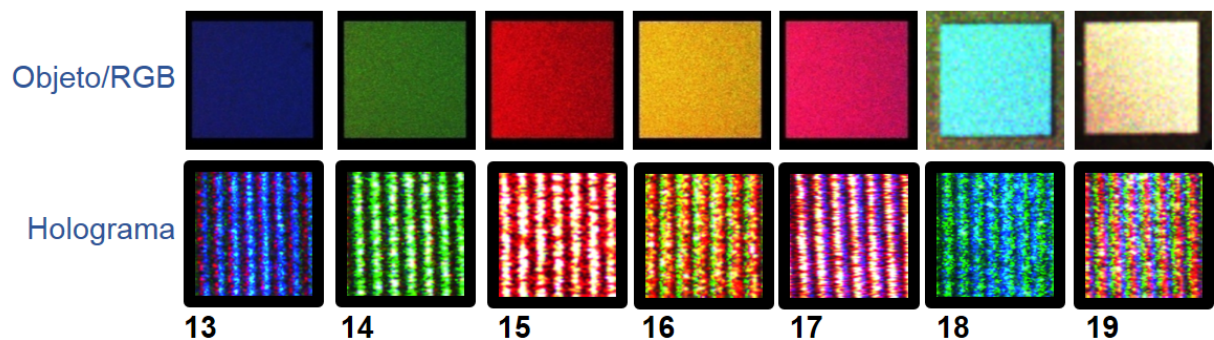


Figura D. 6 Comparación cualitativa entre objetos físicos de la carta de color iluminada con láseres RGB y sus imágenes holográficas reconstruidas con la misma fuente. Registro a partir de la presentación en LCD, pseudocolor.