

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**  
**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**ALGORITMOS PARA MEJORAR LA EXPERIENCIA  
VISUAL DE  
PERSONAS CON DALTONISMO.**

**Alberto Ruiz Guijosa  
Tutor: José María Martínez Sánchez**

**Junio 2020**

# **ALGORITMOS PARA MEJORAR LA EXPERIENCIA VISUAL DE PERSONAS CON DALTONISMO**

**AUTOR: Alberto Ruiz Guijosa  
TUTOR: José María Martínez Sánchez**

**Video Processing and Understanding Lab  
Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid  
Junio de 2020**

## **Resumen (castellano)**

El daltonismo o visión defectuosa de los colores es un problema de origen genético. Desde hace tiempo se trata de ayudar a estas personas a diferenciar aquellos colores que no perciben correctamente. Con la intención de mejorar su experiencia visual se han desarrollado tanto dispositivos físicos como software de recoloreado de imágenes. Este documento se centra en la visión de los sujetos dicromáticos, trabajando en dos conceptos: la simulación y el recoloreado.

El primero trata de mostrar cómo es la visión de los sujetos dicromáticos. Se aportan numerosas imágenes que simulan su percepción de la realidad. Para cada defecto que se estudia se incluyen hasta 3 simulaciones diferentes, extraídas de diferentes artículos científicos, consiguiéndose resultados muy parecidos con todas ellas.

El segundo, consiste en implementar dos técnicas de recoloreado de imágenes mediante software y observar sus resultados. Se trata de dos técnicas muy diferentes entre sí en lo relativo a complejidad del algoritmo. Los resultados avalan que no son necesarios algoritmos muy complejos, si bien, requieren ser confirmados por individuos con estos tipos de deficiencias de visión.

## **Abstract (English)**

The colour blindness, also known as colour vision deficiency, is a genetically based disease. Since a while it has been spent time in order to make these people difference those colours that are not able to perceive correctly. With the main purpose of improving their visual experience, it has been developed both physical devices and image recolouring software. This document is focused in dichromacy vision subjects, working in two concepts: simulation and recolouring.

The first one tries to show how does the dichromatic subjects vision look like. Quite a few images that simulate their perception of reality are provided. For every defect studied even three different simulations are included, extracted from contrasted scientific articles, achieving fairly similar results among all of them.

The second one is to carry out two software-recolouring image techniques and to monitor the results. Both techniques are reasonably different according to computational cost. Both results display that not very complex algorithms are required. However, these results must be confirmed by real colour-blinded people so as to they can be accepted.

## **Palabras clave (castellano)**

Daltonismo. Discromatopsia. Protanopía. Deuteranopía. Tritanopía. Recoloreado. Fuzzy C-Means. Cuaternión. Transformación lineal.

## **Keywords (inglés)**

Colour blindness. Dichromatopsia. Protanopia. Deutanopia. Tritanopia. Recolouring. Fuzzy C-Means, Quaternion. Linear transformation.

## **Agradecimientos**

*A mi profesor de Física de Bachillerato, Alberto Pérez, por esas clases tan amenas y por conseguir que me decantara por una ingeniería cuando mi atracción se centraba en la rama sanitaria.*

*A Juan Carlos San Miguel Avedillo, mi profesor de Análisis de Circuitos, Tratamiento de Señales Visuales y Acción tutelar en la EPS de la UAM, por una conversación que mantuvimos en la que me convenció para que programara el Trabajo Fin de Grado en Python en lugar de Matlab.*

*A mi Tutor, José María Martínez Sánchez, por permitirme desarrollar este TFG que asocia la ingeniería con la medicina y por ayudarme a solventar los problemas que han ido apareciendo durante su desarrollo.*

*A Celia y Fernando, mis mejores amigos, por haber estado ahí cuando los he necesitado.*

*Y finalmente, a mi familia. A mi madre, por arrancarme sonrisas cuando las cosas se torcían, y a mi padre por su apoyo incondicional durante el transcurso de la carrera, pues tengo claro que de no ser por él, no la habría terminado.*

*En mayor o menor medida, todos vosotros me habéis ayudado a dar lo mejor de mí, y he querido reflejarlo en este Trabajo.*

*A todos, gracias de corazón.*

*Alberto.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 Introducción .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Organización de la memoria .....	1
2 Biología del daltonismo .....	3
2.1 Origen del término “daltonismo”. .....	3
2.2 La percepción visual. ....	3
2.3 Clasificación de las deficiencias de la visión en color. ....	6
2.3.1 Tricromatopsia anómala (individuos tricromáticos). ....	6
2.3.2 Discromatopsia (individuos dicromáticos) .....	7
2.3.3 Monocromatopsia (individuos monocromáticos) .....	7
2.3.4 Acromatopsia (individuos acromáticos) .....	7
3 Estado del arte .....	9
3.1 Tecnologías.....	9
3.1.1 Gafas <i>EnChroma</i> .....	9
3.1.2 Pantallas y dispositivos de presentación de imágenes.....	10
3.1.3 Realidad híbrida o mixta.....	10
3.2 Algoritmos de recoloreado .....	13
3.2.1 Conversión de color a escala de grises. ....	13
3.2.2 Aplicación de filtros de color y desplazamiento de histograma .....	14
3.2.3 Recoloreado mediante <i>Clusters</i> .....	15
3.2.4 Recoloreado mediante transformaciones lineales entre espacios de color ...	16
4 Diseño y Desarrollo .....	19
4.1 Librerías .....	19
4.2 Simulación .....	19
4.2.1 Matrices (C) de simulación utilizadas en el algoritmo .....	21
4.3 Recoloreado .....	22
4.3.1 Recoloreado mediante <i>Fuzzy C-Means Clustering</i> . ....	22
4.3.1.1 Algoritmo de recoloreado propuesto por Jeong (solo protanopía) .....	22
4.3.1.2 Observaciones al algoritmo de recoloreado propuesto por Jeong .....	25
4.3.1.3 Parametrización .....	26
4.3.1.4 Algoritmo de recoloreado implementado para protanopía .....	28
4.3.1.5 Adaptación del algoritmo de Jeong para deuteranopía.....	33
4.3.1.6 Adaptación del algoritmo de Jeong para tritanopía. ....	34
4.3.2 Recoloreado mediante Transformaciones lineales .....	36
4.3.2.1 Algoritmo de recoloreado propuesto por Melillo .....	36
4.3.2.2 Implementación del algoritmo de recoloreado de Melillo.....	37
4.4 Interfaz de usuario .....	38
5 Evaluación y resultados .....	41
5.1 Resultados del algoritmo de simulación .....	41
5.2 Resultados de los algoritmos de recoloreado .....	41
5.2.1 Mediante <i>Clusters Fuzzy C-Means</i> . ....	42
5.2.2 Mediante transformaciones lineales .....	42
5.3 Comparativa de ambos recoloreados .....	43
6 Conclusiones y trabajo futuro.....	45
6.1 Conclusiones .....	45
6.1.1 Respecto a los resultados de las simulaciones.....	45

6.1.2 Respecto a los resultados de los algoritmos de recoloreado.....	45
6.2 Trabajo futuro .....	45
A. GENÉTICA Y DEFICIENCIA DE LA VISIÓN EN COLOR .....	49
B. ESPACIOS DE COLOR RGB Y LMS: TRANSFORMACIONES Y SIMULACIÓN DEL DEFECTO DE VISIÓN EN COLOR.....	51
C. ESTUDIO DE PARÁMETROS DE RECOLOREADO.....	53
D. RESULTADOS DEL ALGORITMO DE SIMULACIÓN .....	63
E. RESULTADOS DEL ALGORITMO DE RECOLOREADO MEDIANTE CLUSTERS FUZZY C-MEANS .....	71
F. RESULTADOS DEL ALGORITMO DE RECOLOREADO MEDIANTE TRANSFORMACIONES LINEALES .....	79
G. COMPARATIVA DE AMBOS RECOLOREADOS .....	87
Referencias .....	97

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. PELARGONIUM ZONALE, QUE CASI CON CERTEZA SE CORRESPONDERÍA CON EL GERANIUM ZONALE DE DALTON [2] .....	3
FIGURA 2.2. ESKEMA ANATÓMICO DEL OJO HUMANO [4] .....	4
FIGURA 2.3. CORTE TRANSVERSAL ESQUEMÁTICO DE LA ESTRUCTURA DE LA RETINA EN UN OJO HUMANO MOSTRANDO LOS CONOS Y LOS BASTONES [4] .....	4
FIGURA 2.4. ABSORCIÓN ESPECTRAL DE LOS 3 TIPOS DE FOTO-PIGMENTOS DE LOS CONOS [4].....	5
FIGURA 2.5. SENSIBILIDAD ESPECTRAL RELATIVA DE LOS TRES COLORES ASOCIADOS A LOS FOTOPIGMENTOS. ESCALA LOGARÍTMICA DEL EJE VERTICAL [6] .....	6
FIGURA 3.1. MODELOS DE GAFAS <i>ENCHROMA</i> PARA USO INTERIOR Y EXTERIOR [11] .....	9
FIGURA 3.2. LONGITUDES DE ONDA BLOQUEADAS POR EL FILTRO <i>ENCHROMA</i> [12]. .....	10
FIGURA 3.3. LOGO DE LA APLICACIÓN <i>CHROMATIC GLASS</i> DISPONIBLE EN <i>APP STORE</i> [15] .....	10
FIGURA 3.4. GLASS ENTERPRISE EDITION 2 [16] .....	11
FIGURA 3.5. DISPOSITIVO HOLOLENS 2 [17].....	11
FIGURA 3.6. PROTOTIPO DE GAFAS <i>CHROMAGLASSES</i> [18] .....	11
FIGURA 3.7. ESKEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS GAFAS <i>CHROMAGLASSES</i> [18].....	12
FIGURA 3.8. DIFERENTES TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN DE LA CVD Y SUS RESULTADOS [18] .....	12
FIGURA 3.9. LÁMINAS DE PRUEBA DE ISHIHARA. A) IMAGEN ORIGINAL. B) RESULTADO DE LA CONVERSIÓN DE COLOR A GRIS [19].....	13
FIGURA 3.10. IMAGEN NATURAL DE PRUEBA. A) IMAGEN ORIGINAL. B) RESULTADO DE LA CONVERSIÓN DE COLOR A GRIS [19].....	13
FIGURA 3.11. LÁMINAS DE PRUEBA DE ISHIHARA. A) IMAGEN ORIGINAL. B) RESULTADO DE LA CONVERSIÓN DE COLOR A GRIS [7].....	14
FIGURA 3.12. A) IMAGEN REAL ORIGINAL. B) INTENSIFICACIÓN DE LA COMPONENTE ROJA. C) IMAGEN RECOLOREADA [20].....	15
FIGURA 3.13. A) IMAGEN ORIGINAL. B) IMAGEN RECOLOREADA. C) SIMULACIÓN DE LA VISUALIZACIÓN DE PROTÁNOPE DE LA IMAGEN A). D) SIMULACIÓN DE LA VISUALIZACIÓN DEL PROTÁNOPE DE LA IMAGEN RECOLOREADA B). [21] .....	16
FIGURA 3.14. DE IZQUIERDA A DERECHA, IMAGEN ORIGINAL, IMAGEN PERCIBIDA POR UN SUJETO CON PROTANOPÍA E IMAGEN PERCIBIDA DESPUÉS DE LA CORRECCIÓN [22].....	17

FIGURA 4.1. A) IMAGEN ORIGINAL “FRUITS”. B) PERCEPCIÓN DEL PROTÁNOPE [21] .....	22
FIGURA 4.2. TRANSFORMACIÓN DE COLOR UTILIZADA PARA EL RECOLOREADO.....	24
FIGURA 4.3. A) IMAGEN “FRUITS” RECOLOREADA. B) PERCEPCIÓN DEL PROTÁNOPE DE LA IMAGEN RECOLOREADA [21] .....	25
FIGURA 4.4. EFECTO DEL NÚMERO DE CLUSTERS SOBRE EL RECOLOREADO.....	27
FIGURA 4.5. EFECTO SOBRE EL RECOLOREADO DE DIFERENTES ÍNDICES FUZZY. ....	27
FIGURA 4.6. EFECTO SOBRE EL RECOLOREADO DE DIFERENTES PARÁMETROS $\alpha$ Y $\beta$ .....	27
FIGURA 4.7. DE IZQUIERDA A DERECHA, IMAGEN ORIGINAL UTILIZADA POR JEONG “FRUITS” [21], COLORES QUE PERCIBE ( $O_2$ ) Y COLORES QUE NO PERCIBE CORRECTAMENTE UN PROTÁNOPE ( $O_1$ ). ....	28
FIGURA 4.8. IMÁGENES ANTERIORES SEGMENTADAS (32 CLUSTERS) .....	29
FIGURA 4.9. COMPONENTES DEL EJE DE GIRO PARA DEFINIR EL CUATERNIÓN UNITARIO.....	30
FIGURA 4.10. PORCENTAJE DE GIRO DEL ÁNGULO $\theta_{vr}$ .....	30
FIGURA 4.11. EJE DE GIRO DEL CUATERNIÓN UNITARIO UTILIZADO PARA DESPLAZAR LAS COMPONENTES DE COLOR HACIA TONOS AZULES. ....	31
FIGURA 4.12. VISTA DEL EJE DE GIRO (PARA PROTANOPÍA Y DEUTERANOPÍA) CONTENIDO EN EL PLANO RG.....	31
FIGURA 4.13. IMAGEN RECOLOREADA DEL CONJUNTO $G_1$ .....	31
FIGURA 4.14. VISIÓN DEL PROTÁNOPE DE LA IMAGEN ORIGINAL Y DE LAS COMPONENTES RECOLOREADAS.....	32
FIGURA 4.15. A) IMAGEN “FRUITS” RECOLOREADA. B) SIMULACIÓN DE LA VISIÓN DEL PROTÁNOPE DE LA IMAGEN RECOLOREADA. SE COMPARAN CON C) Y D) IMAGEN RECOLOREADA Y SIMULACIÓN DE CÓMO LA VE EL PROTÁNOPE SEGÚN JEONG. ....	33
FIGURA 4.16. EJEMPLO DE RECOLOREADO Y SU VISIÓN DEL PROTÁNOPE PARA $\alpha = 0.25$ Y $\beta = 0.05$ .....	33
FIGURA 4.17. IMAGEN “CHERRY” ORIGINAL [27] Y SU SIMULACIÓN PARA DEUTERANOPÍA .....	33
FIGURA 4.18. CONJUNTO DE COLORES $O_1$ Y $O_2$ CON FUNCIÓN EXTRACCIÓN TONOS VERDOSOS.....	34
FIGURA 4.19. IMAGEN RECOLOREADA Y COMO LA PERCIBE UN SUJETO CON DEUTERANOPÍA.....	34
FIGURA 4.20. EJE DE GIRO UTILIZADO PARA EL RECOLOREADO EN TRITANOPÍA .....	36
FIGURA 4.21. IMAGEN RECOLOREADA Y COMO LA PERCIBE UN SUJETO CON TRITANOPÍA .....	36
FIGURA 4.22. DE IZQUIERDA A DERECHA: IMAGEN ORIGINAL, PERCEPCIÓN DEL PROTÁNOPE, PERCEPCIÓN DESPUÉS DE LA CORRECCIÓN [22] .....	38

FIGURA 4.23. IMAGEN SIMULADA, IMAGEN RECOLOREADA Y PERCEPCIÓN DESPUÉS DEL RECOLOREADO.....	38
FIGURA 4.24. PERCEPCIÓN DEL PROTÁNOPE, DESPUÉS DEL RECOLOREADO .....	38
FIGURA 4.25. MENÚ PRINCIPAL DE LA APLICACIÓN .....	38
FIGURA 4.26. VENTANA SELECCIÓN DE IMÁGENES .....	39
FIGURA 4.27. VENTANAS DE SELECCIÓN DEL DEFECTO DE VISIÓN Y MATRIZ DE SIMULACIÓN .....	39
FIGURA 4.28. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS POR PANTALLA .....	39
FIGURA 4.29. VENTANA SELECCIÓN TIPO DE RECOLOREADO .....	40
FIGURA 4.30. VENTANAS DE SELECCIÓN DEL DEFECTO A RECOLOREAR Y SIMULACIÓN UTILIZADA. ....	40
FIGURA 4.31. PANTALLA DE RESULTADOS DEL RECOLOREADO .....	40
FIGURA 5.1. (DE IZDA. A DCHA.) LÁMINA ISHIHARA ORIGINAL [1]. SIMULACIÓN DE MELILLO. SIMULACIÓN DE MACHADO .....	41
FIGURA 5.2. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	42
FIGURA 5.3. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN POR EL PROTÁNOPE. IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN. ....	43
FIGURA 5.4. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL PROTÁNOPE PARA LA IMAGEN “CHERRY”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	43
FIGURA 6.1. MATRICES DE SIMULACIÓN DIFERENTES TIPOS CVD DE MACHADO [23] .....	46
FIGURA A.2. PATRONES DE TRANSMISIÓN HEREDITARIA ASOCIADOS A LA VISIÓN EN COLOR [33].	50
FIGURA C.3. IMAGEN “KID” RECOLOREADA CON 8 CLUSTERS (IZDA.) Y 16 CLUSTERS (DCHA.) .....	53
FIGURA C.4. IMAGEN “KID” RECOLOREADA CON 32 CLUSTERS (IZDA.) Y 64 CLUSTERS (DCHA.) .....	54
FIGURA C.5. DETALLE IMAGEN “CHERRY” RECOLOREADA. (DE IZDA. A DRCHA.). ÍNDICE FUZZY 1.1-2-3.....	54
FIGURA C.6. PERCEPCIÓN DEL PROTÁNOPE. (DE IZDA. A DRCHA.). ÍNDICE FUZZY 1.1-2-3.....	55
FIGURA C.7. PERCEPCIÓN DEL PROTÁNOPE DE LA LÁMINA DE ISHIHARA CON DIFERENTES PARÁMETROS.....	55
FIGURA C.8. PERCEPCIÓN DEL PROTÁNOPE DE LA IMAGEN “TEXTURAS” DESPUÉS DEL RECOLOREADO CON DIFERENTES PARÁMETROS.....	56
FIGURA C.9. PERCEPCIÓN DEL DEUTERÁNOPE DE LA LÁMINA DE ISHIHARA CON DIFERENTES PARÁMETROS.....	57

FIGURA C.10. PERCEPCIÓN DEL DEUTERÁNOPE DE LA IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ” CON DIFERENTES PARÁMETROS .....	58
FIGURA C.11. PERCEPCIÓN DE DEUTERÁNOPE DE LA IMAGEN “ <i>FÚTBOL</i> ” CON DIFERENTES PARÁMETROS.....	59
FIGURA C.12. PERCEPCIÓN DEL DEUTERÁNOPE DE LA IMAGEN “ <i>CHERRY</i> ” CON DIFERENTES PARÁMETROS.....	59
FIGURA C.13. PERCEPCIÓN DEL TRITÁNOPE DE LAS LÁMINAS HRR CON DIFERENTES PARÁMETROS. ....	60
FIGURA C.14. PERCEPCIÓN DEL TRITÁNOPE DE LA IMAGEN “ <i>KID</i> ” CON DIFERENTES PARÁMETROS.60	
FIGURA C.15. PERCEPCIÓN DEL TRITÁNOPE DE LA IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ” CON DIFERENTES PARÁMETROS.....	61
FIGURA D.16. (DE IZDA. A DCHA.) LÁMINA ISHIHARA ORIGINAL [1]. SIMULACIÓN DE MELILLO. SIMULACIÓN DE MACHADO .....	63
FIGURA D.17. IMAGEN ORIGINAL “ <i>FÚTBOL</i> ” [28] .....	63
FIGURA D.18. SIMULACIÓN IMAGEN “ <i>FÚTBOL</i> ”. (IZDA.) MELILLO. (DCHA.) MACHADO.....	64
FIGURA D.19. IMAGEN ORIGINAL “ <i>TEXTURAS</i> ” [29].....	64
FIGURA D.20. SIMULACIÓN IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ”. (IZDA.) MELILLO. (DCHA.) MACHADO.....	64
FIGURA D.21. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN “ <i>KID</i> ” ORIGINAL [30]. SIMULACIÓN MELILLO. SIMULACIÓN MACHADO.....	65
FIGURA D.22. IMAGEN ORIGINAL “ <i>CHERRY</i> ” [27] .....	65
FIGURA D.23. SIMULACIÓN IMAGEN “ <i>CHERRY</i> ”. (IZDA.) MELILLO. (DCHA.) MACHADO.....	66
FIGURA D.24. (DE IZDA. A DCHA.) LÁMINA ISHIHARA ORIGINAL [1]. SIMULACIÓN DE VIÉNOT. SIMULACIÓN DE MELILLO. SIMULACIÓN DE MACHADO.....	66
FIGURA D.25. SIMULACIÓN IMAGEN “ <i>FÚTBOL</i> ”. (DE IZDA. A DCHA.) VIÉNOT, MELILLO Y MACHADO .....	66
FIGURA D.26. SIMULACIÓN IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ”. (DE IZDA. A DCHA.) VIÉNOT, MELILLO Y MACHADO .....	67
FIGURA D.27. SIMULACIÓN IMAGEN “ <i>KID</i> ”. (DE IZDA. A DCHA.) VIÉNOT, MELILLO Y MACHADO.	67
FIGURA D.28. SIMULACIÓN IMAGEN “ <i>CHERRY</i> ”. (IZDA.) MELILLO. (DCHA.) MACHADO.....	67
FIGURA D.29. (IZDA.) LÁMINAS HRR [31]. (DCHA.) SÍMBOLOS QUE EL TRITÁNOPE NO DEBE PERCIBIR. ....	68
FIGURA D.30. PERCEPCIÓN DE LAS LÁMINAS HRR SEGÚN MELILLO (IZDA.) Y SEGÚN MACHADO (DCHA.) .....	68

FIGURA D.31. SIMULACIÓN IMAGEN “FÚTBOL”. MELILLO (IZDA.). MACHADO (DCHA.).....	69
FIGURA D.32. SIMULACIÓN IMAGEN “TEXTURAS”. MELILLO (IZDA.). MACHADO (DCHA.).....	69
FIGURA D.33. SIMULACIÓN IMAGEN “KID”. MELILLO (IZDA.). MACHADO (DCHA.).....	69
FIGURA D.34. SIMULACIÓN IMAGEN “CHERRY”. (IZDA.) MELILLO. (DCHA.) MACHADO.....	70
FIGURA E.35. (DE IZDA. A DCHA.) LÁMINA ISHIHARA ORIGINAL [1]. SIMULACIÓN LÁMINA ORIGINAL. LÁMINA RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA LÁMINA RECOLOREADA. ....	71
FIGURA E.36. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “FÚTBOL” [28] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	71
FIGURA E.37. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “TEXTURAS” [29] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. ....	72
FIGURA E.38. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN “KID” ORIGINAL [30]. SIMULACIÓN IMAGEN ORIGINAL. IMAGEN RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA IMAGEN RECOLOREADA. ....	72
FIGURA E.39. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	73
FIGURA E.40. (DE IZDA. A DCHA.) LÁMINA ISHIHARA ORIGINAL [1]. SIMULACIÓN LÁMINA ORIGINAL. LÁMINA RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA LÁMINA RECOLOREADA. ....	73
FIGURA E.41. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “FÚTBOL” [28] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	74
FIGURA E.42. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “TEXTURAS” [29] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. ....	74
FIGURA E.43. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN “KID” ORIGINAL [30]. SIMULACIÓN IMAGEN ORIGINAL. IMAGEN RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA IMAGEN RECOLOREADA. ....	75
FIGURA E.44. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	75
FIGURA E.45. (IZDA.) LÁMINAS HRR ORIGINALES [31] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	76
FIGURA E.46. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “FÚTBOL” [28] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	76
FIGURA E.47. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “TEXTURAS” [29] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. ....	77
FIGURA E.48. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN “KID” ORIGINAL [30]. SIMULACIÓN IMAGEN ORIGINAL. IMAGEN RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA IMAGEN RECOLOREADA. ....	77
FIGURA E.49. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	78

FIGURA F.50. (DE IZDA. A DCHA.) LÁMINA ISHIHARA ORIGINAL [1]. SIMULACIÓN LÁMINA ORIGINAL. LÁMINA RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA LÁMINA RECOLOREADA.....	79
FIGURA F.51. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “FÚTBOL” [28] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	79
FIGURA F.52. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “TEXTURAS” [29] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN .....	80
FIGURA F.53. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN “KID” ORIGINAL [30]. SIMULACIÓN IMAGEN ORIGINAL. IMAGEN RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA IMAGEN RECOLOREADA.....	80
FIGURA F.54. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN POR EL PROTÁNOPE. IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN .....	81
FIGURA F.55. (DE IZDA. A DCHA.) LÁMINA ISHIHARA ORIGINAL [1]. SIMULACIÓN LÁMINA ORIGINAL. LÁMINA RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA LÁMINA RECOLOREADA.....	81
FIGURA F.56. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “FÚTBOL” [28] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	82
FIGURA F.57. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “TEXTURAS” [29] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN .....	82
FIGURA F.58. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN “KID” ORIGINAL [30]. SIMULACIÓN IMAGEN ORIGINAL. IMAGEN RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA IMAGEN RECOLOREADA.....	83
FIGURA F.59. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN POR EL DEUTERÁNOPE. IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN.....	83
FIGURA F.60. (IZDA.) LÁMINAS HRR ORIGINALES [31] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	84
FIGURA F.61. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “FÚTBOL” [28] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN.....	84
FIGURA F.62. (IZDA.) IMAGEN ORIGINAL “TEXTURAS” [29] Y DEBAJO SU SIMULACIÓN. (DCHA.) IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU SIMULACIÓN .....	85
FIGURA F.63. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN “KID” ORIGINAL [30]. SIMULACIÓN IMAGEN ORIGINAL. IMAGEN RECOLOREADA. SIMULACIÓN DE LA IMAGEN RECOLOREADA.....	85
FIGURA F.64. (DE IZDA. A DCHA.) IMAGEN ORIGINAL “CHERRY” [27] Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN POR EL TRITÁNOPE. IMAGEN RECOLOREADA Y DEBAJO SU PERCEPCIÓN .....	86
FIGURA G.65. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL PROTÁNOPE PARA LÁMINA DE ISHIHARA. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.) .....	87
FIGURA G.66. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL PROTÁNOPE PARA LA IMAGEN “CHERRY”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.) .....	88
FIGURA G.67. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL PROTÁNOPE PARA LA IMAGEN “FÚTBOL”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.) .....	88

FIGURA G.68. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL PROTÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	89
FIGURA G.69. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL PROTÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>KID</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	89
FIGURA G.70. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL DEUTERÁNOPE PARA LÁMINA DE ISHIHARA. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	90
FIGURA G.71. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL DEUTERÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>CHERRY</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	91
FIGURA G.72. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL DEUTERÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>FÚTBOL</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	91
FIGURA G.73. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL DEUTERÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	92
FIGURA G.74. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL DEUTERÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	92
FIGURA G.75. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL TRITÁNOPE PARA LAS LÁMINAS HRR. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	93
FIGURA G.76. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL TRITÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>CHERRY</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	93
FIGURA G.77. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL TRITÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>FÚTBOL</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	94
FIGURA G.78. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL TRITÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>TEXTURAS</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	94
FIGURA G.79. APORTACIÓN DEL RECOLOREADO A LA VISIÓN DEL TRITÁNOPE PARA LA IMAGEN “ <i>KID</i> ”. JEONG (IZDA.) MELILLO (DCHA.).....	95



## **INDICE DE TABLAS**

TABLA 2.1. LONGITUD DE ONDA DE LOS PICOS DE ABSORCIÓN DE LOS 3 FOTO-PIGMENTOS [4][5] ...	5
TABLA 2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DEFECTOS DE VISIÓN.....	6
TABLA 4.1 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA SELECCIONAR EL ÁNGULO DE GIRO.....	27
TABLA 4.2. CENTROIDES DEL CONJUNTO DE COLOR QUE PERCIBE CORRECTAMENTE ( $G_2$ ) Y DEL CONJUNTO QUE NO PERCIBE, DESPUÉS DE RECOLOREARLOS Y SIMULAR SU VISIÓN POR EL PROTÁNOPE.....	32
TABLA A.1. TIPOS DE DEFICIENCIAS DE VISIÓN EN COLOR, CON SUS CORRESPONDIENTES PREVALENCIAS Y MECANISMOS DE TRANSMISIÓN HEREDITARIA [34]. ....	49



# **1 Introducción**

---

## **1.1 Motivación**

El daltonismo es un problema de visión, que impide percibir los colores de forma correcta. Por lo general se trata de un problema genético, y por lo tanto hereditario, asociado a un defecto localizado en unas células de la retina denominadas conos.

Existen diferentes grados de severidad del daltonismo. En función de esta severidad, podemos encontrarnos personas con un rango de afectación que va desde pequeñas deficiencias en la percepción de la gama de colores, hasta una visión exclusiva en gama de grises.

Desde hace tiempo se intenta crear soluciones tecnológicas para mejorar la percepción de estos individuos. Estas técnicas se basan en modificar los colores que el daltónico no ve correctamente, de modo que sea capaz de diferenciarlos en la imagen “recoloreada”.

Esto no implica, por ejemplo, que una persona que no percibe el color rojo, vaya a verlo después de recolorear la imagen. Lo que se pretende mediante las técnicas de recoloreado es trasladar aquellos tonos de la gama cromática que no es capaz de percibir, hacia la gama de colores que si percibe, de modo que reconozca contrastes y tonalidades de color diferentes entre aquellos colores que antes no era capaz de diferenciar.

En este trabajo, partiremos de un tipo de defecto de visión previamente conocido, se simulará como percibe el daltónico los colores y además se implementarán diferentes técnicas de recoloreado para observar la posible mejora.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el estudio de las técnicas de análisis de realce de tonos y la implementación de algoritmos de recoloreado existentes, para mejorar la experiencia visual de personas con daltonismo. En concreto nos hemos centrado en todas las variedades de discromatopsia (el tipo de daltonismo que padecen aquellos individuos que solo poseen dos de los tres tipos de conos funcionales -ver sección 2.3.2-).

En primer lugar, se simulará y comparará la visión del daltónico según la propuesta de diferentes autores y posteriormente se procesarán las imágenes para adaptarlas al rango de contraste que el sujeto bajo estudio puede percibir con el objetivo de mejorar su experiencia visual.

Los objetivos específicos que nos planteamos en este trabajo son los siguientes:

1. Estudiar los algoritmos que se han desarrollado en la bibliografía sobre simulación y recoloreado de imágenes para los diferentes tipos de discromatopsia.
2. Simular como percibe los colores el sujeto dicromático respecto a una persona con visión normal.
3. Implementar algoritmos de recoloreado basados en la bibliografía analizada.
4. Evaluar los resultados obtenidos de una forma cualitativa, haciendo uso del test de daltonismo más utilizado en la práctica, basado en las láminas de Ishihara [1], y de imágenes reales.

## **1.3 Organización de la memoria**

La memoria se ha estructurado del modo siguiente:

- Capítulo 1: Describe la motivación y los objetivos que se pretenden conseguir con el presente trabajo.

- Capítulo 2: Se realiza un resumen sobre la biología del daltonismo. Se explica el mecanismo de percepción de los colores por el ojo humano y se definen los diferentes problemas genéticos asociados a la deficiencia de visión en color.
- Capítulo 3: Se comentan los avances y las técnicas más novedosas para mejorar la visión de los daltónicos, así como un breve resumen de los últimos estudios científicos y los algoritmos de recoloreado de imágenes que en ellos se proponen.
- Capítulo 4: Basándonos en los estudios anteriores y centrándonos en las tres variedades de discromatopsia, se describen los algoritmos que se van a implementar. Se trabajan dos conceptos. El primero dedicado al proceso de simulación, que permitirá a un sujeto normal apreciar cómo será la visión de la persona dicromática. El segundo se centra en detallar los pasos de los dos algoritmos de recoloreado que se implementan para mejorar su experiencia visual.
- Capítulo 5: La evaluación de los resultados de los diferentes algoritmos de recoloreado se efectúa comparando la percepción del dicromático “antes” y “después” del recoloreado sobre láminas de Ishihara y sobre imágenes del mundo real.
- Capítulo 6: Finalmente se exponen las conclusiones obtenidas y posibles líneas de trabajo futuro.

## **2 Biología del daltonismo**

---

### **2.1 Origen del término “daltonismo”.**

El daltonismo es un problema que impide la visión correcta de los colores. Por lo tanto, decimos que una persona es “daltónica” cuando no percibe los colores correctamente.

“Daltonismo” o individuo “daltónico” es el término con el que nos referimos a los individuos que presentan un problema de deficiencia de visión en color. Esta denominación se debe al famoso físico y químico John Dalton (1766 - 1844).

Dalton es conocido fundamentalmente por su teoría atómica y la ley de las proporciones múltiples. Sin embargo, su primer artículo científico en 1798 se refería a la descripción de su propio problema para percibir los colores. En él, describe que se sorprendió especialmente al observar que las flores rosadas (ver Figura 2.1) de un “geranium zonale”, a la luz del día, las percibía de forma idéntica al “azul celeste”, mientras a la luz de las velas le parecían amarillentas con un leve tinte rojizo [2].



**Figura 2.1. Pelargonium zonale, que casi con certeza se correspondería con el geranium zonale de Dalton [2]**

En el espectro solar, solo diferenciaba 2 tonos principales. El primero se correspondía con el rojo, naranja, amarillo y verde de un observador normal, mientras que el segundo se correspondía con el azul y violeta. Por este motivo, la cera de lacrar de color rojo, la percibía del mismo color que una hoja de laurel.

Además de describir su propio defecto de visión del color con cierto detalle, detectó a otras personas con una visión similar a la suya, incluido su propio hermano, pero no fue capaz de encontrar a mujeres con esa visión tan peculiar [3].

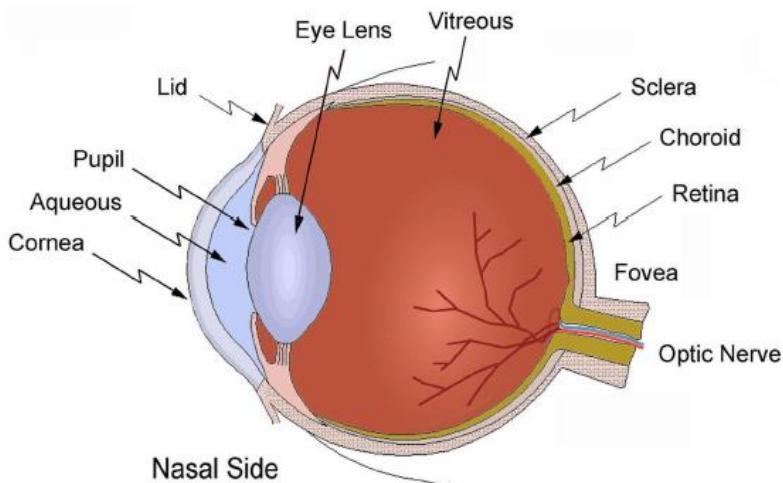
Finalmente, describió el posible mecanismo del defecto. Propuso que el humor vítreo de su ojo estaba teñido de azul, absorbiendo selectivamente longitudes de onda más largas, e instruyó que después de su muerte sus ojos deberían ser diseccionados para confirmar su hipótesis.

Los restos de los ojos de Dalton se conservan en la *Literary and Philosophical Society of Manchester* (Reino Unido); de las muestras tomadas de ellos para analizar el ADN, ahora se sabe que John Dalton padecía deuteranopía (uno de los tipos de daltonismo que se describen más adelante).

### **2.2 La percepción visual.**

Todos los objetos emiten o reflejan radiaciones luminosas de distinta frecuencia e intensidad que penetran en el interior del globo ocular a través de la pupila.

La señal luminosa pasa por la córnea, el cristalino y la cámara interior acuosa hasta llegar a la retina (ver Figura 2.2), la parte fotosensible del ojo, donde se encuentran las células sensibles a la luz, los conos y los bastones.

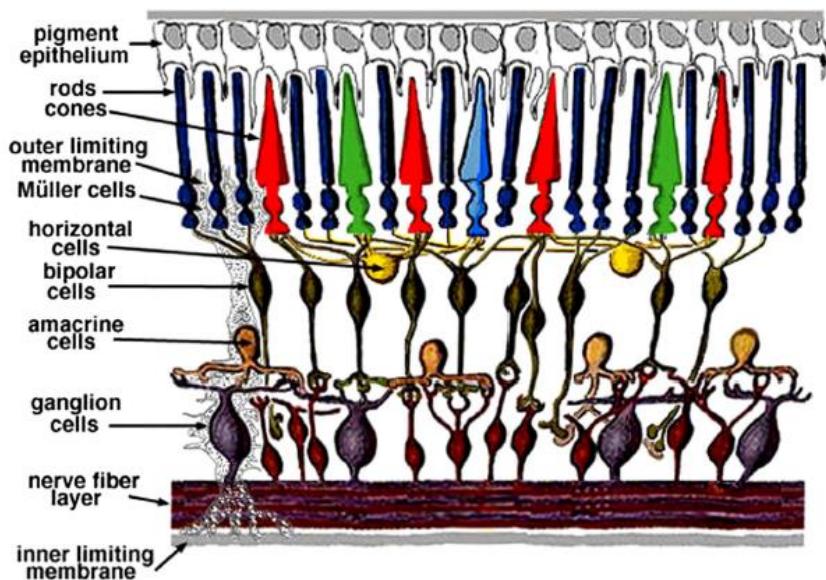


**Figura 2.2. Esquema anatómico del ojo humano [4]**

Estos tipos de células foto-receptoras (ver Figura 2.3) transforman la luz en energía electroquímica que se transmite al cerebro a través del nervio óptico. Sobre la corteza visual del cerebro, situada en el lóbulo occipital, es donde finalmente se produce la propia percepción.

Los bastones son responsables de la visión nocturna y periférica (visión escotópica). Gracias a ellos percibimos los diferentes niveles de grises.

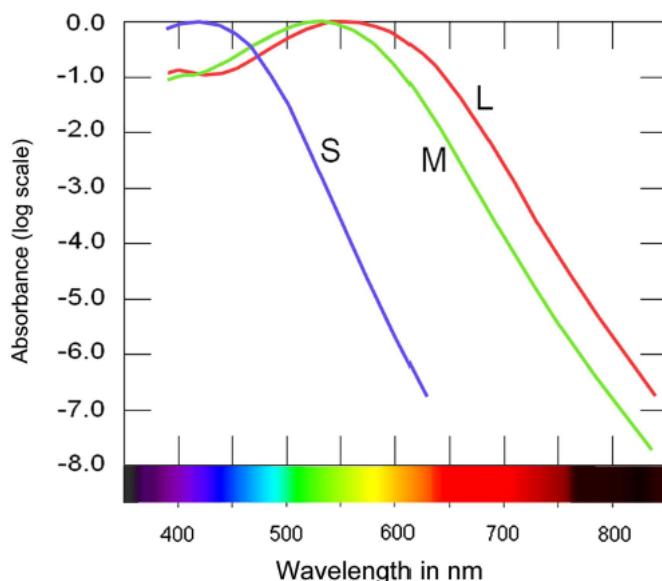
Los conos son los responsables de la visión fotópica, es decir, de la visión en color a la luz del día. Según el foto-pigmento que posean, así será su respuesta espectral a un estímulo luminoso (ver Figura 2.4).



**Figura 2.3. Corte transversal esquemático de la estructura de la retina en un ojo humano mostrando los conos y los bastones [4]**

Se diferencian tres conjuntos de elementos sensibles al color (ver Figura 2.4 y Tabla 2.1):

1. Conos L para longitudes de onda largas. Responden de forma aproximada en la banda espectral de la luz roja, pero con el pico de absorción en 575 nm que corresponde al color amarillo.
2. Conos M para longitudes de onda medias. Responden aproximadamente en la banda espectral de la luz verde, con el pico de absorción en 540 nm que corresponde al color verde.
3. Conos S para longitudes de onda cortas. Responden aproximadamente en la banda espectral azul, con el pico de absorción en 425 nm, que corresponde al color azul-violeta.



**Figura 2.4. Absorción espectral de los 3 tipos de foto-pigmentos de los conos [4].**

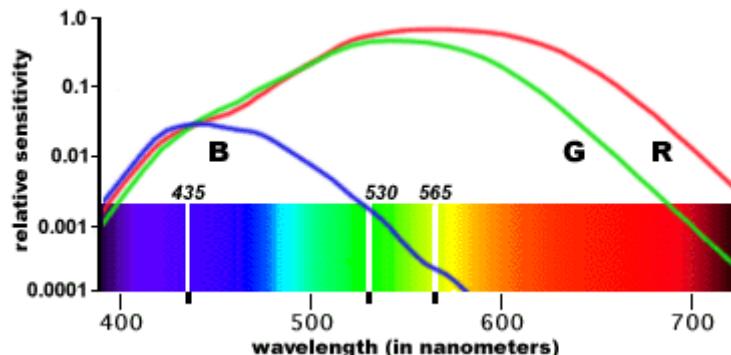
Los conos S azules poseen algunas características que los hacen diferentes de los conos L y M. En la retina hay menos conos S que conos L o M, estando casi ausentes en el centro de la fóvea. No contribuyen a la discriminación del contraste, por lo que no pueden detectar bordes de imagen. Tampoco contribuyen a la luminosidad, pero en cambio, contribuyen de manera muy importante a diferenciar las tonalidades e intensidad de los colores, principalmente la discriminación amarillo-azul [4].

Se considera habitual una distribución de conos LMS en la proporción 10:5:1, si bien, “*las últimas técnicas de interferometría láser (Roorda y Williams, 1999, Hofer et al. 2005), que miden la distribución de los conos rojos y verdes en la fóvea humana viva, muestran que existe una variación considerable entre los individuos. Algunos tienen una distribución igual de conos L y M, pero otros tienen un mayor número de conos rojos, incluso hasta la proporción de 16 conos L : 1 cono M*” [5], distribuyéndose de manera irregular en forma de mosaico.

Color	(%) conos	Pigmentos visuales	Pico de absorción
Rojo (L)	62	opsina (Eritrolabe)	575 nm
Verde (M)	31	opsina (Chrolabe)	540 nm
Azul (S)	7	opsina (Cyanolabe)	425 nm

**Tabla 2.1. Longitud de onda de los picos de absorción de los 3 foto-pigmentos [4][5]**

Los valores indicados en la Tabla 2.1, se corresponden con la absorción espectral de los tres tipos de conos. En cambio, la sensibilidad espectral relativa del “ojo vivo” (Figura 2.5) es ligeramente diferente, ya que hay que tener en cuenta que la señal luminosa interfiere con los pigmentos maculares y cristalinos.



**Figura 2.5. Sensibilidad espectral relativa de los tres colores asociados a los fotopigmentos. Escala logarítmica del eje vertical [6]**

## 2.3 Clasificación de las deficiencias de la visión en color.

A un individuo con visión normal lo denominamos tricromático, ya que es capaz de percibir perfectamente la gama cromática del espectro de color, dado que sus 3 tipos de conos funcionan correctamente.

En función de que posea alguna anomalía en algún tipo de cono, carezca de uno o varios foto-pigmentos o incluso solo posea bastones con total ausencia de conos, se establece una clasificación en cuatro tipos [7].

La Tabla 2.2, presenta un resumen de la clasificación de defectos que se desarrollarán en apartados sucesivos.

Deficiencia visión color	Conos L	Conos M	Conos S	Bastones
Tricromatopsia anómala	Protanomalía	Anómalo	Normal	Normal
	Deuteranomalía	Normal	Anómalo	Normal
	Tritanomalía	Normal	Normal	Anómalo
Discromatopsia	Protanopía	Inexistente	Normal	Normal
	Deuteranopía	Normal	Inexistente	Normal
	Tritanopía	Normal	Normal	Inexistente
Monocromatopsia	Monocromatismo de conos rojos	Normal	Inexistente	Inexistente
	Monocromatismo de conos verdes	Inexistente	Normal	Inexistente
	Monocromatismo de conos azules	Inexistente	Inexistente	Normal
Acromatopsia	Monocromatismo de bastones	Inexistente	Inexistente	Inexistente

**Tabla 2.2. Clasificación de los defectos de visión**

### 2.3.1 Tricromatopsia anómala (individuos tricromáticos)

El afectado posee los tres tipos de conos, pero uno de ellos no funciona correctamente. Como un tipo de conos presenta anomalías, los tonos de los colores se perciben alterados. En función de la clase de conos que está alterada, la deficiencia se clasifica en:

- Protanomalía: Los conos que se encuentran en la retina son [L<sub>a</sub> – M – S]  
(L<sub>a</sub>= conos L con anomalía)
- Deuteranomalía: La retina posee conos [L – M<sub>a</sub> – S]  
(M<sub>a</sub> = conos M con anomalía)
- Tritanomalía: Cuando los conos presentes son [L – M – S<sub>a</sub>]  
(S<sub>a</sub> = conos S con anomalía)

Tradicionalmente se ha asociado el daltonismo a la dificultad de la percepción del rojo y el verde, lo que se conoce como “deficiencia rojo-verde”. Por lo tanto, la protanomalía-deuteranomalía aparecerá en mayor o menor medida dependiendo del grado de afectación de los conos correspondientes. Además, resultan ser las alteraciones más frecuentes en la población [8]. Se difumina la distinción entre el rojo y el verde, con la única diferencia de los tonos percibidos. El rojo lo perciben con tonalidades marrón-verdosas, mientras que la percepción del verde puro se asemeja al tono marrón-verdoso con que perciben el rojo. Por lo general, en su visión predominan las tonalidades marrones-verdosas.

La tritanomalia es la deficiencia al azul-amarillo, y dependerá del grado de afectación de los conos S. Se caracteriza porque los colores azul y amarillo no son percibidos correctamente, asociándose a tonos grisáceos y rosas respectivamente. En su visión predominan las tonalidades rojizas.

### **2.3.2 Discromatopsia (individuos dicromáticos)**

El dicromatismo es una deficiencia moderadamente grave, en la que uno de los tres tipos de conos no funciona en absoluto. Puede ser de tres tipos diferentes:

- Protanopía: El individuo carece de los foto-receptores del color rojo, longitud de onda L. Por tanto, la retina cuenta con conos [□ – M – S]  
(□ = ausencia foto-receptor)
- Deuteranopía: Faltan los foto-receptores retinianos del color verde, longitud de onda M. Los conos existentes son [L – □ – S]
- Tritanopía: Faltan los foto-receptores del color azul, longitud de onda S. Posee conos [L – M – □]

Análogamente, la deficiencia rojo-verde se manifiesta en la protanopía y deuteranopía, mientras que la deficiencia azul-amarillo se manifiesta en la tritanopía.

### **2.3.3 Monocromatopsia (individuos monocromáticos)**

Se presenta cuando únicamente existe uno de los tres tipos de foto-pigmentos en los conos, por lo que la visión del color es muy reducida e incluso inexistente.

- Monocromatismo de conos rojos. Solo posee foto-receptores del rojo [L – □ – □]
- Monocromatismo de conos verdes. Solo posee foto-receptores del verde [□ – M – □]
- Monocromatismo de conos azules. Solo posee foto-receptores del azul [□ – □ – S]

### **2.3.4 Acromatopsia (individuos acromáticos)**

También llamado monocromatismo de bastones.

El individuo acromático es aquel que ve en blanco y negro (escala de grises). No percibe ningún color ya sea porque no tiene ninguno de los tres tipos de conos o no funcionan en su totalidad. Su retina solo dispone de los bastones.

Todas las deficiencias de visión en color que se han definido, están asociadas a trastornos genéticos que se transmiten de forma hereditaria de padres a hijos. Los aspectos genéticos asociados a la visión en color defectuosa se detallan en el Apéndice A.



## 3 Estado del arte

Como ya se ha visto, el daltonismo, o mejor dicho la deficiencia de visión en color, a la que nos referiremos de ahora en adelante como CVD por sus siglas en inglés “*Colour Vision Deficiency*”, es un problema genético y por lo tanto hereditario y sin solución por el momento. No obstante, Jay y Maureen Neitz, investigadores de la Universidad de Washington, en colaboración con la empresa *Avalanche Biotechnologies* [9] han abierto la posibilidad a una posible cura para el daltonismo [10].

Jay y Maureen Neitz, parece ser que han encontrado una forma de implantar genes que podrían reemplazar a las opsinas, las proteínas de los conos. Así se desprende de las primeras pruebas clínicas realizadas con monos, pero están a la espera de que les concedan autorización para su evaluación en humanos.

A la espera de que la solución definitiva llegue, los últimos avances para mejorar la visión de las personas con CVD se basan en las tecnologías y algoritmos de recoloreado que se describen a continuación.

### 3.1 Tecnologías

#### 3.1.1 Gafas *EnChroma*

Las gafas *EnChroma* [11] (Figura 3.1) incorporan en la lente un filtro que bloquea una pequeña banda del espectro luminoso. En concreto, la correspondiente a ciertas longitudes de onda del espectro rojo-verde que se superpone (ver Figura 3.2). Esto permite que la imagen en el cerebro se forme con mayor contraste entre la gama de rojos y la gama de verdes, pudiendo distinguir con mayor precisión los colores.

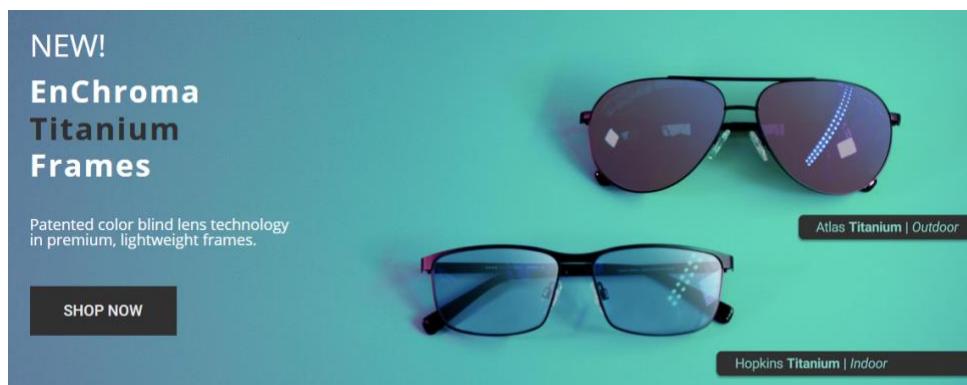
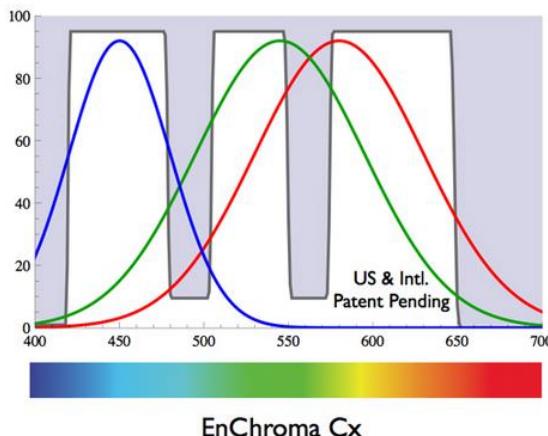


Figura 3.1. Modelos de gafas *Enchroma* para uso interior y exterior [11]

Evidentemente, no se trata de una solución, pero proporciona una mejora en la percepción de los colores para las deficiencias más frecuentes en la población, como son la deuteranomalía y protanomalía, (deficiencia rojo-verde) siempre que el defecto no sea severo.

Cuando el defecto es severo, esto es, una clase de foto-receptores tiene su funcionalidad muy limitada o ha desaparecido por completo, la gama cromática estará muy disminuida, y el filtro no cambiará la percepción del color en estos casos.



**Figura 3.2. Longitudes de onda bloqueadas por el filtro *EnChroma* [12].**

### 3.1.2 Pantallas y dispositivos de presentación de imágenes.

Existe una gran cantidad de literatura para ayudar a las personas con deficiencia de visión al color a la hora de visualizar pantallas (televisores, ordenadores, etc.) Así, por ejemplo, en los artículos [13] y [14] se exponen dos métodos con diferentes técnicas de recoloreado, para mejorar la percepción de individuos dicromáticos.

También están disponibles aplicaciones para teléfonos inteligentes. En la Figura 3.3 se muestra el logo de la App “*Chromatic Glass*” [15] para iPhone. Esta aplicación asegura que mejora la percepción del color para los individuos tricromáticos anómalos y los dicromáticos, configurándose de forma personalizada para cada tipo de problema.

Como en este dispositivo no se requiere que lo que se visualice (videos, fotografías, leer un periódico, videoconferencia, etc.) suceda en tiempo real, un pequeño retardo de procesamiento carece de importancia.



**Figura 3.3. Logo de la aplicación *Chromatic Glass* disponible en *App Store* [15]**

### 3.1.3 Realidad híbrida o mixta.

Se trata de la combinación de realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR), que trata de tomar lo mejor de ambos mundos. En la realidad virtual, el sujeto se aísla por completo del mundo real, se sumerge en un mundo totalmente simulado (virtual). Las imágenes son captadas por cámaras y presentadas en un display. En la realidad aumentada (AR) el individuo contempla el mundo real con sus propios ojos, pero a la vez se superpone una imagen generada por ordenador.

El máximo exponente en AR son las “*google glass*” [16] (Figura 3.4): un mini-proyector situado sobre estas gafas sin cristales proyecta imágenes directamente sobre la retina del individuo, fusionándose con las reales.



**Figura 3.4. Glass Enterprise Edition 2 [16]**

El usuario de realidad híbrida capta las imágenes físicas a través de una pantalla semitransparente. Al igual que la VR dispone de una cámara que envía su señal al display transparente, por lo que ve superpuestas las dos imágenes al igual que en la AR. Actualmente, el máximo exponente en realidad mixta es el dispositivo “*Hololens 2*” de Microsoft [17] (Figura 3.5).



**Figura 3.5. Dispositivo Hololens 2 [17].**

Recientemente, en la conferencia ACM CHI 2018, los investigadores Tobias Langlotz, Jonathan Sutton, Stefanie Zollmann, Yuta Itoh y Holger Regenbrecht, han presentado un prototipo de gafas, llamadas *ChromaGlasses* [18] (ver Figura 3.6), para compensar la CVD.



**Figura 3.6. Prototipo de gafas *ChromaGlasses* [18]**

Lo novedoso de este dispositivo es que la cámara está ubicada en un costado, a poca distancia del ojo, pero de forma que el eje de visión de la cámara coincide con el del ojo.

Los desarrollos de otros, tales como las “*google glass*” hasta ahora se han centrado principalmente en superponer información digital y no en compensar las deficiencias visuales con precisión de píxeles.

Es necesario identificar los colores críticos según el tipo de CVD. Para ello se necesita conocer previamente qué tipo de deficiencia tiene el usuario.

El funcionamiento es el siguiente (ver Figura 3.7):

- La imagen capturada por la cámara I se multiplica por una matriz de ajuste para simular el tipo de CVD del usuario. Para ello hay que transformar la imagen de entrada en espacio de color RGB al espacio de color LMS (ver Apéndice B). Después se aplica la matriz de ajuste para el tipo de CVD que padece el usuario.
- A continuación, se sustraen de la imagen original capturada por la cámara en el espacio LMS, la imagen simulada para el determinado tipo de CVD, obteniendo una máscara de error, que se almacena como una imagen en escala de grises.
- Posteriormente se utiliza el recoloreado de la máscara, que finalmente se proyecta sobre la pantalla, de modo que el ojo del usuario ve simultáneamente la imagen real junto con la máscara recoloreada.

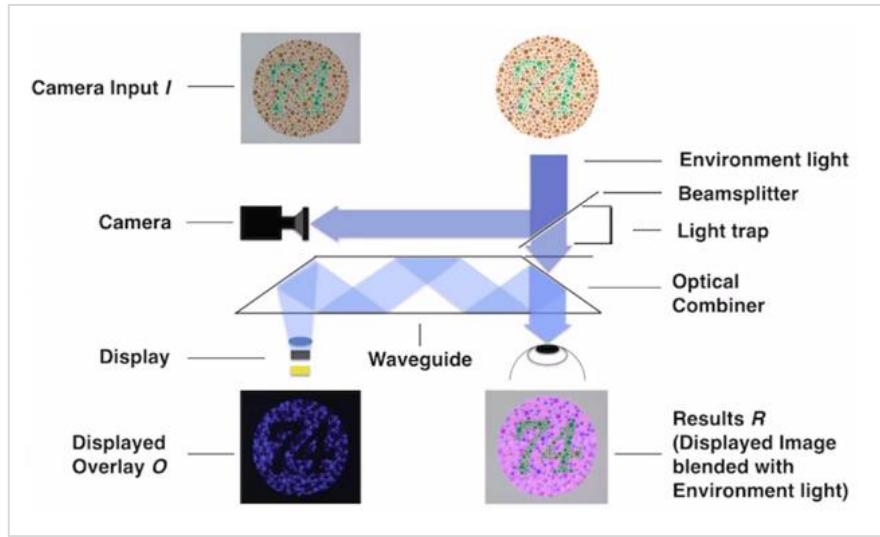


Figura 3.7. Esquema de funcionamiento de las gafas *ChromaGlasses* [18]

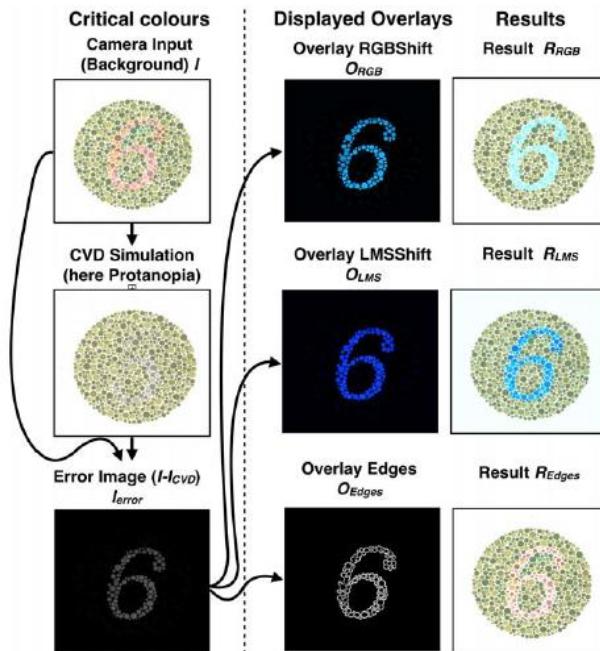


Figura 3.8. Diferentes técnicas de compensación de la CVD y sus resultados [18]

En el artículo [18] se contrastaron un total cinco técnicas diferentes de compensación de la deficiencia de visión en color: *RGBShift*, *RGBShift Adjusted*, *LMSShift*, *LMSShift Adjusted* y *Edges*.

En la Figura 3.8 se ven los resultados con tres de estas técnicas.

### 3.2 Algoritmos de recoloreado

#### 3.2.1 Conversión de color a escala de grises.

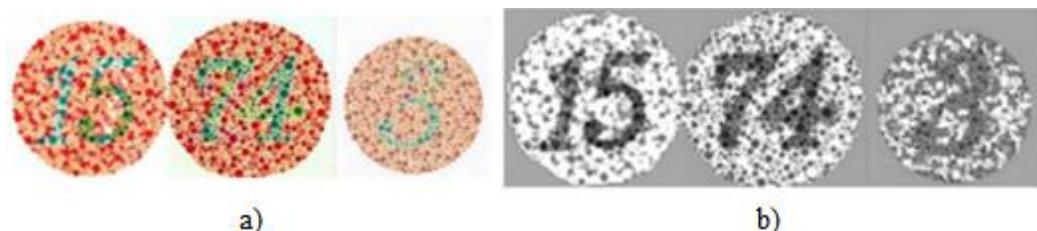
Es válido para todo tipo de daltonismo, mejorando con carácter general la percepción de detalles que de otro modo permanecían no visibles para el daltónico

A) Mediante segmentación.

El algoritmo de conversión de color a gris que proponen L. Zhang et al.[19] se compone de los siguientes pasos:

- Mediante segmentación divide la imagen en regiones de colores. Cada región es un color diferente.
- Conversión de la imagen RGB al espacio de color Lab, que es una aproximación a un espacio de color uniforme.
- Se calcula la diferencia de color entre pares de regiones arbitrarias, simultáneamente en forma de diferencia de luminancia y diferencia de crominancia entre regiones. Se asigna a todos los píxeles incluidos en la misma región, el mismo valor escalar de diferencia de luminancia y crominancia.
- Finalmente se obtiene la imagen de salida en escala de grises, resolviendo la función objetivo basada en la diferencia de escalares usando un proceso de optimización iterativo.

Los resultados obtenidos sobre láminas de Ishihara se muestran en la Figura 3.9



**Figura 3.9. Láminas de prueba de Ishihara. a) Imagen original. b) Resultado de la conversión de color a gris [19]**

En la Figura 3.10 se representa los resultados de este método aplicados a una imagen natural.



**Figura 3.10. Imagen natural de prueba. a) Imagen original. b) Resultado de la conversión de color a gris [19]**

B) Mediante filtrado

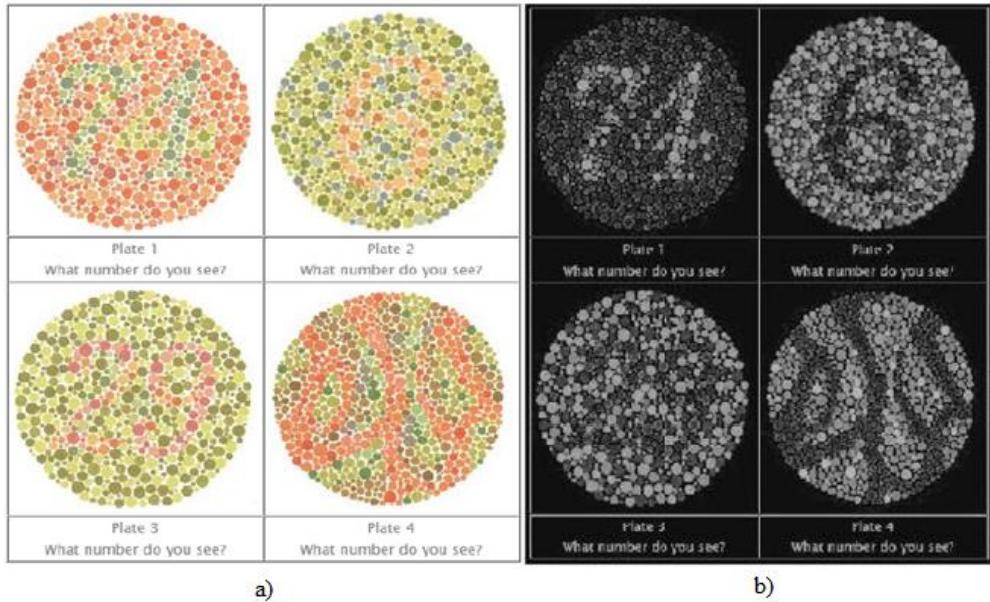
P.K. Nigam y M. Bhattacharya [7] diseñaron un filtro básico, que obtuvo buenos resultados aplicado a las láminas de Ishihara. Permitió a personas daltónicas reconocer fácilmente los números de las láminas.

El filtro se realiza aplicando a la imagen original 3 funciones:

- Ajuste de imagen. Convierte los valores de intensidad de la imagen original en nuevos valores en una imagen en escala de grises.
- Estiramiento de contraste: Mejorar el contraste de la imagen al 'estirar' el rango de valores de intensidad que contiene para abarcar un rango deseado de valores.
- Negativo de la imagen. Se obtiene restando a la máxima luminosidad la imagen resultado de las dos funciones anteriores.

Los autores han diseñado este filtro con el único objetivo de que los daltónicos puedan reconocer formas y caracteres alfanuméricicos en las láminas de Ishihara.

Los resultados se muestran en la Figura 3.11:



**Figura 3.11. Láminas de prueba de Ishihara. a) Imagen original. b) Resultado de la conversión de color a gris [7]**

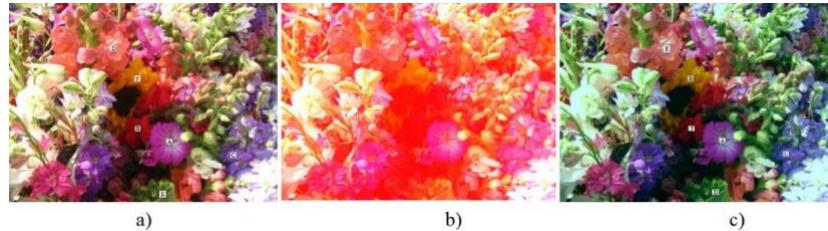
### 3.2.2 Aplicación de filtros de color y desplazamiento de histograma

S. Poret et al., en su artículo “*Image Processing for Colour Blindness Correction*” [20] diseñan un filtro que permite recolorear imágenes, resultando adecuado personas con protanomalía, ya que intensifica los tonos rojos, oscureciéndolos. No obstante, el filtro podría adaptarse a otras anomalías tricromáticas.

El filtro lo construyeron del modo siguiente:

- De la imagen de original se extraen por un lado las componentes verde y azul, dejando solo la componente roja y por otro se extrae solo la componente roja dejando solo la componente verde y azul.
- Se modifica el histograma de la componente roja (lo que hace que sea adecuado para protanomalía), desplazando los valores del histograma hacia la izquierda, oscureciendo los píxeles rojos y eliminando los 50 tonos más claros.
- En esta imagen, con la componente roja modificada, se reintroducen las componentes verde y azul de la imagen original.

Los resultados de este filtro de recoloreado se pueden aplicar tanto a láminas de Ishihara como a imágenes reales. Los resultados después de aplicarlo a una imagen real se muestran en la Figura 3.12.



**Figura 3.12. a) Imagen real original. b) Intensificación de la componente roja. c) Imagen recoloreada [20]**

### 3.2.3 Recoloreado mediante *Clusters*

Jae-Yun Jeong et al., en el artículo “*An Efficient Re-coloring Method with Information Preserving for the Color-blind*” [21], implementan un algoritmo de recoloreado para protanopía. Se puede adaptar para también para deuteranopía y tritanopía.

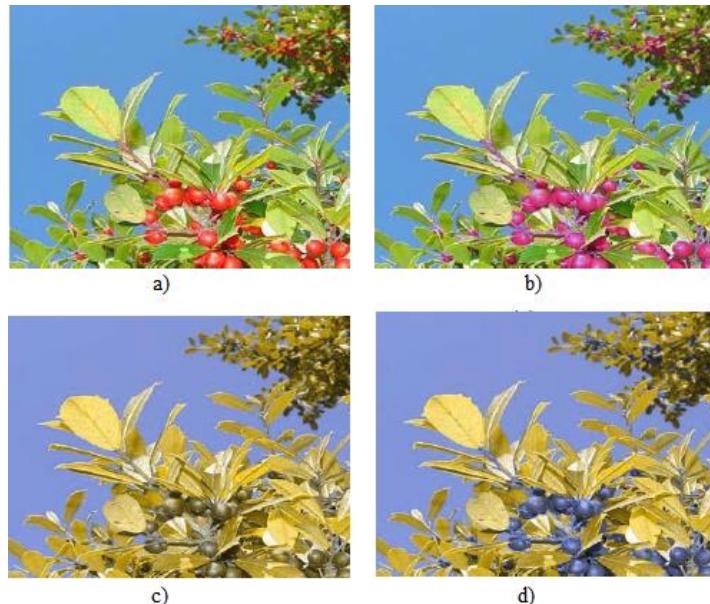
Este método detecta eficazmente los colores que no son perceptibles por el protánope, volviéndolos a colorear con otros que pueda percibir.

Los colores se agrupan en *Clusters* mediante un algoritmo *Fuzzy-C-means*. Se detectan los colores que no son percibidos por el sujeto y sobre ellos se efectúa una translación del color original, a otro próximo que si percibe.

El algoritmo específico para protanopía, incluye los siguientes pasos:

- Se clasifica los colores de la imagen de prueba en 2 subconjuntos O<sub>1</sub> y O<sub>2</sub>. En O<sub>1</sub> se incluyen los colores que el daltónico no ve correctamente y en O<sub>2</sub> los que sí.
- Se diseña una función de extracción del color que se quiere realizar. Para protanopía (se quiere realzar los rojizos), esta función tendrá el valor 1 cuando la componente Roja de la imagen sea simultáneamente mayor que la componente verde (G) y Azul (B).
- Despues de extraer los tonos rojizos, convierte el subconjunto de colores O<sub>1</sub> en G<sub>1</sub>, y O<sub>2</sub> en G<sub>2</sub>. Es decir, agrupa los colores con intensidades similares de O<sub>1</sub> y O<sub>2</sub> en, G<sub>1</sub> y G<sub>2</sub> respectivamente, por medio del algoritmo *Fuzzy-C-means*. Cada elemento que pertenece a los subgrupos G<sub>1</sub> y G<sub>2</sub> tiene un valor representativo, que es un color RGB obtenido por el valor central del *cluster*.
- Se calcula la diferencia existente entre el color original y como lo ve el daltónico. Cuanto mayor sea esa diferencia, mayor probabilidad de que el color original se confunda con colores vecinos, por lo que será necesario modificarlo. El color se desplazará un cierto ángulo sobre la superficie esférica de  $radio = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}$ , componentes RGB que definen el color. El ángulo será proporcional a la cantidad de diferencia de color calculada.
- Se modifican todos los colores que el daltónico no ve de G<sub>1</sub>, simplemente multiplicando los colores RGB de G<sub>1</sub> por una matriz P, que depende solamente del ángulo de giro anterior. Así se obtiene un nuevo conjunto de recoloreado  $\widehat{G}_1$ .
- A partir del conjunto de colores  $\widehat{G}_1$  recoloreado, se simula como verá la imagen el protánope, obteniéndose  $\widehat{G}_1^d$ .
- Se comprueba si los colores tal y como los ve el daltónico del nuevo conjunto recoloreado  $\widehat{G}_1^d$ , difieren del conjunto de colores G<sub>2</sub>.
- Se repiten de forma iterativa los pasos anteriores hasta que todos los colores del subgrupo  $\widehat{G}_1^d$  son diferentes de los colores del grupo G<sub>2</sub>. Lo que quiere decir que se han sustituido todos los colores de G<sub>1</sub>, que el protánope no puede ver, por colores modificados que puede percibir y que además son diferentes a los de la imagen original que percibe.

Los resultados de este algoritmo de recoloreado se recogen en la Figura 3.13:



**Figura 3.13.** a) imagen original. b) imagen recoloreada. c) simulación de la visualización de protánope de la imagen a). d) simulación de la visualización del protánope de la imagen recoloreada b). [21]

### 3.2.4 Recoloreado mediante transformaciones lineales entre espacios de color

P. Melillo et al., en su artículo “*Wearable Improved Vision System for Color Vision Deficiency Correction*” [22] diseñan un sistema portátil de realidad aumentada en tiempo real, para mejorar la visión del color en sujetos que padecen CVD.

Establecen como premisa fundamental para que un sistema trabaje en tiempo real, que el coste computacional del algoritmo sea lo menor posible, lo que implica utilizar un enfoque basado en transformaciones lineales.

Una transformación lineal consiste simplemente en multiplicar los píxeles de la imagen por una matriz de transformación.

En su trabajo, proponen diferentes matrices de transformación, según la deficiencia a corregir, aplicándolas a los tres tipos de discromatopsia: protanopía, deuteranopía y tritanopía.

Su algoritmo, permite la simulación y recoloreado de una imagen RGB mediante unos pasos simples y rápidos:

- Partiendo de una imagen en el espacio de color RGB, transformamos todos sus píxeles denominados como [R,G,B] al espacio de color LMS. (Matriz de transformación RGB a LMS -ver Apéndice B-)
- La imagen LMS obtenida sufre una transformación lineal adicional destinada a simular un daltonismo específico. (Matriz de simulación -ver Apéndice B -)
- Transformación del espacio de color LMS a RGB. (Matriz de transformación inversa, de LMS a RGB -ver Apéndice B-). Permite apreciar a una persona con visión normal, como percibe la imagen una persona con cierto tipo de daltonismo. Los píxeles de esta nueva imagen los denominamos [r,g,b].
- Se calcula la imagen diferencia de color, es decir, la imagen que contiene la diferencia entre el pixel simulado (como lo ve el daltónico) y el pixel original. Es

decir, solamente los píxeles que no se ve correctamente tendrán un valor mayor que cero. Estos píxeles pasan a denominarse  $[R',G',B']$ .

- Se aplica una transformación lineal a la imagen diferencia de color (píxeles que el daltónico no percibe correctamente) para trasladarlos hacia tonos del espectro que si puede percibir. (Matriz de recoloreado). Los píxeles así obtenidos los denominamos  $[RR,GG,BB]$ .
- La imagen final, se obtiene añadiendo a las componentes  $[r,g,b]$  obtenidas de la simulación, las componentes recoloreadas  $[RR,GG,BB]$  :

$$R'' = RR + r$$

$$G'' = GG + g$$

$$B'' = BB + b.$$

- Como  $R'', G'', B''$  podrían tener valores fuera del rango [0-255], sus valores deben someterse a un proceso de saturación.

La Figura 3.14 muestra un ejemplo de simulación y recoloreado para protanopía.



**Figura 3.14. De izquierda a derecha, imagen original, imagen percibida por un sujeto con protanopía e imagen percibida después de la corrección [22]**



# 4 Diseño y Desarrollo

---

Se ha diseñado una aplicación (a desarrollar en lenguaje Python) que consta de dos partes:

- a. Simulación: para procesar la imagen y simular la visión de ésta por un daltónico. Se han utilizado entre 2 y 3 diferentes matrices de simulación para cada uno de los defectos de visión, con objeto de comprobar si existen diferencias significativas según la propuesta de cada autor.
- b. Recoloreado: Se han ejecutado dos métodos diferentes de recoloreado. Se compara el recoloreado mediante *clusters* expuesto en el apartado 3.2.3, con el recoloreado mediante transformaciones lineales del apartado 3.2.4.

A la vista de los resultados, se extraerán las conclusiones pertinentes.

## 4.1 Librerías

Todas las librerías utilizadas quedan reflejadas en la siguiente lista:

- *Numpy*. Es la principal biblioteca para el cálculo científico en Python. Proporciona funcionalidad para procesamiento de matrices multidimensionales.
- *Matplotlib*. Es una librería para mostrar datos. En concreto se ha utilizado el módulo *matplotlib.pyplot*, que proporciona instrucciones muy similares al lenguaje de programación MATLAB. De *matplotlib.pyplot* se utiliza la función *imread* para la lectura de imágenes en la ruta de trabajo.
- *Scikit-skimage*. Es una librería específicamente diseñada para el manejo y tratamiento de imágenes en Python. De *skimage* se utilizan:
  - *img\_as\_float64* para trabajar con valores de píxeles. Inicialmente se leen en formato uint8 en rango [0-255]. Esta función los normaliza en el rango [0-1] y los convierte a float64 para operar con ellos.
  - *io.imread* para la lectura de imágenes en carpetas y subcarpetas situadas fuera de la ruta de trabajo.
- *Math*. Esta librería proporciona acceso a las funciones matemáticas definidas por el estándar C. Se ha utilizado para obtener y trabajar con el valor del número  $\pi$ .
- *Scikit-fuzzy*. Librería que va a permitir agrupar datos mediante Fuzzy C-Means.
- *Imageio*. Biblioteca que nos proporciona la facilidad de guardar cualquier imagen procesada a nuestro dispositivo.
- *Python Imaging Library*. También conocida como “*PIL*”, es una librería que permite múltiples opciones para abrir y manipular imágenes. Se utilizará el módulo *PIL.Image.ANTIALIAS* para redimensionar aquellas imágenes con muy elevadas dimensiones, consiguiendo una gran reducción del coste computacional en el recoloreado.
- *Tkinter*. Es la librería estándar de Python utilizada en el desarrollo de interfaces gráficas (*GUI - Graphic User Interface*). Se utilizan múltiples funciones para designar botones (*Button*) así como mostrar texto o imágenes en la interfaz (*Label*), entre otras muchas.
- *Regular expression (RE)*. Se trata de una librería que busca patrones de coincidencia de texto. Se han utilizado para restringir la entrada de valores de parametrización a únicamente números enteros o decimales, según proceda.

## 4.2 Simulación

Se realizará la simulación de los defectos de protanopía, deuteranopía y tritanopía utilizando los modelos propuestos por diferentes autores.

Los modelos utilizados son los siguientes:

- Protanopía: Se realizan 2 simulaciones diferentes, basadas en los artículos de Melillo et al. [22] y Machado et al. [23].
- Deuteranopía: En este caso, se efectúan 3 simulaciones diferentes, según lo expuesto es las referencias de Melillo et al. [22], Viénot et al. [24] y Machado et al. [23].
- Tritanopía: Se efectúan 2 simulaciones, en virtud de los artículos de referencia Melillo et al [22] y Machado et al. [23].

Los autores anteriores, excepto Machado, realizan la simulación de la visión del daltónico en tres pasos:

1. Transformación de la imagen RGB al espacio de color LMS. (*Matriz A*).

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = (A) \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

2. Simulación en el espacio LMS del defecto de visión. (*Matriz B*).

$$\begin{pmatrix} L_* \\ M_* \\ S_* \end{pmatrix} = (B) \cdot \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}$$

3. Transformación inversa a RGB para poder visualizar la imagen simulada tal y como la percibe el daltónico. (*Matriz A<sup>-1</sup>*).

$$\begin{pmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{pmatrix} = (A^{-1}) \cdot \begin{pmatrix} L_* \\ M_* \\ S_* \end{pmatrix}$$

En el presente trabajo, y con objeto de optimizar el coste computacional, los tres pasos anteriores se han reducido a uno solo. Esto consigue calculando para cada defecto la matriz de simulación resultante en el espacio de color RGB, a la que hemos denominado (*C*):

$$(C) = (A^{-1}) \cdot (B) \cdot (A)$$

De este modo, la imagen simulada será el producto matricial de:

$$\begin{pmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{pmatrix} = (C) \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Es decir,

$$[\text{Imagen simulada}] = (C) \cdot [\text{Imagen real}]$$

Esto mismo es lo que realiza Machado, ya que proporciona, para cada defecto, su correspondiente matriz de simulación (*C*) en el espacio de color RGB. Por lo tanto, el algoritmo se reduce a un solo paso de cálculo.

En el apartado 4.2.1 se definen los coeficientes de todas las matrices C utilizadas.

### **Algoritmo de simulación implementado**

1. El algoritmo se inicia con la lectura de la imagen RGB, obteniéndose valores formato uint8 en rango [0-255], que normalizamos a valores entre [0-1] para operar con ellos.
2. Se calcula la imagen simulada  $\begin{pmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{pmatrix} = (C) \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$
3. Para visualizar la imagen correctamente, se desnormalizan los valores, pasándolos al rango original [0-255].

#### 4.2.1 Matrices (C) de simulación utilizadas en el algoritmo

La matriz ( $C$ ) de simulación del defecto de visión permite trabajar con imágenes en el espacio de color RGB, sin necesidad de ninguna conversión adicional.

El algoritmo la calcula internamente, realizando el producto matricial definido en el apartado anterior:

$$(C_{\text{defecto}}^{\text{autor}}) = (A^{-1}) \cdot (B_{\text{defecto}}) \cdot (A)$$

En cambio, Machado proporciona esta matriz directamente, y así se ha introducido en el algoritmo.

A continuación, se detallan las matrices utilizadas para calcular cada defecto.

1) Protanopía. Autor “Melillo”.

$$(C_p^{\text{Melillo}}) = \begin{pmatrix} 0.080944 & -0.130504 & 0.116721 \\ -0.0102485 & 0.0540194 & -0.113615 \\ -0.000365294 & -0.00412163 & 0.693513 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 2.02344 & -2.52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.11935 \\ 3.45565 & 27.1554 & 3.86714 \\ 0.0299566 & 0.184309 & 1.46709 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.112381 & 0.887599 & -0.000002 \\ 0.112383 & 0.887621 & 0.000000 \\ 0.004006 & -0.004006 & 1.000002 \end{pmatrix}$$

2) Protanopía. Autor Machado.

$$(C_p^{\text{Machado}}) = \begin{pmatrix} 0.152286 & 1.052583 & -0.204868 \\ 0.114503 & 0.786281 & 0.099216 \\ -0.003882 & -0.048116 & 1.051998 \end{pmatrix}$$

3) Deuteranopía. Autor “Melillo”.

$$(C_d^{\text{Melillo}}) = \begin{pmatrix} 0.080944 & -0.130504 & 0.116721 \\ -0.0102485 & 0.0540194 & -0.113615 \\ -0.000365294 & -0.00412163 & 0.693513 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1.42319 & -0.88995 & 1.77557 \\ 0.67558 & -0.42203 & 2.82788 \\ 0.00267 & -0.00504 & 0.99914 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.11935 \\ 3.45565 & 27.1554 & 3.86714 \\ 0.0299566 & 0.184309 & 1.46709 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.425089 & 0.693371 & -0.114702 \\ 0.341704 & 0.588208 & 0.069200 \\ -0.010533 & 0.023375 & 0.987003 \end{pmatrix}$$

4) Deuteranopía. Autor “Viénot”.

$$(C_d^{\text{Viénot}}) = \begin{pmatrix} 0.080944 & -0.130504 & 0.116721 \\ -0.0102485 & 0.0540194 & -0.113615 \\ -0.000365294 & -0.00412163 & 0.693513 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.494207 & 0 & 1.24827 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.11935 \\ 3.45565 & 27.1554 & 3.86714 \\ 0.0299566 & 0.184309 & 1.46709 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.292746 & 0.707241 & 0.000000 \\ 0.292751 & 0.707252 & 0.000000 \\ -0.022337 & 0.022337 & 1.000002 \end{pmatrix}$$

5) Deuteranopía. Autor Machado.

$$(C_d^{\text{Machado}}) = \begin{pmatrix} 0.367322 & 0.860646 & -0.227968 \\ 0.280085 & 0.672501 & 0.047413 \\ -0.011820 & 0.042940 & 0.968881 \end{pmatrix}$$

6) Tritanopía. Autor “Melillo”.

$$(C_t^{\text{Melillo}}) = \begin{pmatrix} 0.080944 & -0.130504 & 0.116721 \\ -0.0102485 & 0.0540194 & -0.113615 \\ -0.000365294 & -0.00412163 & 0.693513 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.95451 & -0.04719 & 2.74872 \\ -0.00447 & 0.96543 & 0.88835 \\ -0.01251 & 0.07312 & -0.01161 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.11935 \\ 3.45565 & 27.1554 & 3.86714 \\ 0.0299566 & 0.184309 & 1.46709 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.950006 & 0.050027 & 0.000003 \\ -0.000017 & 0.833297 & 0.166996 \\ 0.000112 & 0.875200 & 0.125024 \end{pmatrix}$$

7) Tritanopía. Autor Machado.

$$(C_t^{Machado}) = \begin{pmatrix} 1.255528 & -0.076749 & -0.178779 \\ -0.078411 & 0.930809 & 0.147602 \\ 0.004733 & 0.691367 & 0.303900 \end{pmatrix}$$

### 4.3 Recoloreando.

La función del recoloreando es modificar el color de las tonalidades que el daltónico no percibe, sustituyéndolas por otras que es capaz de percibir, de modo que vea contraste y diferencia entre ellas, siendo capaz de apreciar detalles que de otro modo pasarían inadvertidos.

De los diferentes métodos de recoloreando expuestos en el capítulo 3, en este trabajo, se han implementado dos métodos, con el objetivo de comparar resultados y extraer conclusiones:

- Recoloreando mediante *Fuzzy C-Means Clustering*, y
- Recoloreando mediante transformaciones lineales.

#### 4.3.1 Recoloreando mediante *Fuzzy C-Means Clustering*.

Se implementa el algoritmo propuesto por Jeong et al., según se describe en el artículo “*An Efficient Re-coloring Method with Information Preserving for the Color-blind*” [21].

Si bien, este artículo, lo aplica en exclusiva al defecto de protanopía, comenta que se puede adaptar para para deuteranopía y tritanopía.

En el presente trabajo, el algoritmo original se amplía al recoloreando de imágenes para todo individuo dicromático: protánope, deuteránope y tritánope.

##### 4.3.1.1 Algoritmo de recoloreando propuesto por Jeong (solo protanopía)

Para ilustrar los resultados del algoritmo se utiliza la imagen “fruits” (Figura 4.1) del artículo de Jeong.



**Figura 4.1. a) Imagen original “fruits”. b) Percepción del protánope [21]**

1. Se clasifican los colores en 2 conjuntos  $O_1$  y  $O_2$ , del modo siguiente:

$$O_1 = \{X_k | \varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = 0 \text{ and } \gamma(X_k^o) = 1\}$$

$$O_2 = \overline{O_1}$$

Donde:

- $X_k$ : Color “k” dado por los valores de 3 píxeles R, G, B.
- $X_k^o$ : Color “k” de la imagen original
- $X_k^d$ : Color “k” de la imagen simulada. (Se simula como lo percibe el daltónico)
- $O_1$ : Conjunto que contiene los colores  $X_k$  que el daltónico no percibe.
- $O_2$ : Conjunto que contiene los colores  $X_k$  que el daltónico percibe correctamente.
- $\Psi_1$ : Vector umbral. Se establece en el 1% de cada componente RGB para cada color de la imagen original  $X_k^o$

$$\Psi_1 = (\psi_1, \psi_2, \psi_3) \Rightarrow \Psi_1 = (1\%, 1\%, 1\%)$$

- $\gamma$ : Función extracción de color (rojizo en caso de protanopía) de la imagen original  

$$\gamma(X_k^o) = \begin{cases} 1 & \text{si } R^o > G^o \text{ and } R^o > B^o \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

- $\varphi$ : Función diferencia de color entre la imagen original y simulada

$$\varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = \begin{cases} 1 & \text{si } |R^o - R^d| < \psi_1, |G^o - G^d| < \psi_2, |B^o - B^d| < \psi_3 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Luego  $\varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = 0$  cuando la diferencia entre el color original y el simulado supera el umbral del 1% fijado.

2. Mediante *fuzzy c-means* se agrupan los colores de  $O_1$  y  $O_2$  en los conjuntos:

$$G_1 = \{g_{1,1}, g_{1,2}, \dots, g_{1,N_1}\}$$

$G_2 = \{g_{2,1}, g_{2,2}, \dots, g_{2,N_2}\}$  donde cada *cluster*  $g_{u,v}$  tiene un color representativo dado por su centroide  $X_{u,v}$

Por ejemplo, para 3 *clusters*  $G_1 = \{X_{1,1}^o, X_{1,2}^o, X_{1,3}^o\}$

Donde:

- $G_1$ : Conjunto que contiene los colores de  $O_1$  agrupados en *clusters*.
- $G_2$ : Conjunto que contiene los colores de  $O_2$  agrupados en *clusters*.
- $X_{u,v}$ : Centroide que se corresponde con un color RGB.
- $X_{1,v}^o$ : Centroide del conjunto  $G_1$  de la imagen original.
- $X_{2,v}^o$ : Centroide del conjunto  $G_2$  de la imagen original.

3. Para reducir el número de iteraciones se calcula  $\omega$ : Cantidad de diferencia de color entre centroides de la imagen original y simulada del conjunto  $G_1$

$$\omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d) = |R_{1,v}^o - R_{1,v}^d| + |G_{1,v}^o - G_{1,v}^d| + |B_{1,v}^o - B_{1,v}^d|$$

Donde:

- $X_{1,v}^d$ : Centroide del conjunto  $G_1$  de la imagen simulada  

$$X_{1,v}^d = [\text{Matriz simulación}] \cdot X_{1,v}^o$$
- $R_{1,v}^o, G_{1,v}^o, B_{1,v}^o$ : Componentes R, G y B del color dado por el centroide  $X_{1,v}^o$  de la imagen original.
- $R_{1,v}^d, G_{1,v}^d, B_{1,v}^d$ : Componentes R, G y B del color dado por el centroide  $X_{1,v}^d$  de la imagen simulada.

4. Se calcula el nuevo color  $\widehat{X}_{1,v}^o$ . Centroide recoloreado del conjunto  $G_1$ .

$$\widehat{X}_{1,v}^o = P \cdot X_{1,v}^o$$

Donde:

- $\widehat{X}_{1,v}^o$ : Centroide recoloreado del conjunto  $G_1$
- $P$ : Matriz de rotación (denominada así en el artículo de Jeong).  

$$P = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix}$$
- $q_0, q_1, q_2, q_3$ : Coeficientes del cuaternion unitario, definidos como
  - $q_0 = \cos(\theta_v^p/2)$
  - $q_1 = \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(R^o)$
  - $q_2 = \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(G^o)$
  - $q_3 = \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(B^o)$
- $R^o, G^o$  y  $B^o$ : Componente R, G y B de un color  $X_k^o$  de la imagen original.

- $\theta_v^p$ : Ángulo que desplaza el color del centroide para percibirlo correctamente. Se trata de un giro hacia el eje B, (caso de protanopía).

$$\theta_v^p = [\alpha \cdot (\omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d) + \beta) \cdot \theta_v^r]$$

$$\alpha = 0.017$$

$$\beta = 0.182$$

[\*] Significa truncamiento, para que el ángulo sea un número entero.

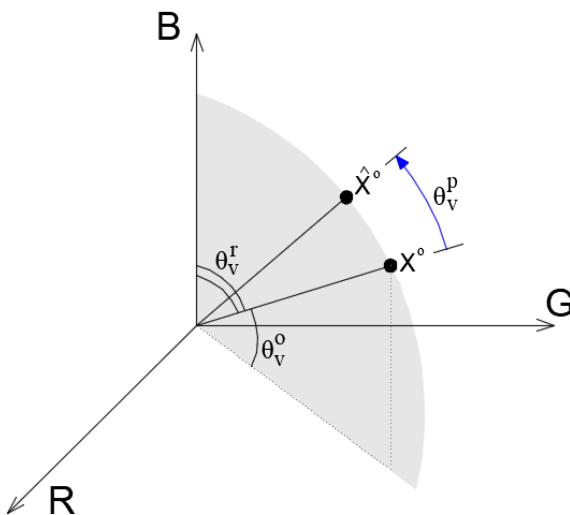
$\theta_v^r$ : Ángulo comprendido entre  $\theta_v^o$  y  $\pi/2$  (rotación máxima) y se debe cumplir:

$$\theta_v^r = \frac{\pi}{2} - \theta_v^o$$

$\theta_v^o$ : Ángulo correspondiente al centroide de un color original

$$\theta_v^o = \arctan\left(\frac{B_{1,v}}{\sqrt{R_{1,v}^2 + G_{1,v}^2}}\right)$$

Los ángulos indicados, y el desplazamiento proyectado se muestran en la Figura 4.2.



**Figura 4.2. Transformación de color utilizada para el recoloreado**

- Se realiza la simulación de la visión del daltónico del color rotado (recoloreado)

$$\widehat{X}_{1,v}^d = [\text{Matriz simulación}] \cdot \widehat{X}_{1,v}^o$$

Donde:

- $\widehat{X}_{1,v}^o$ : Centroide rotado (recoloreado) del conjunto  $G_1$ .
  - $\widehat{X}_{1,v}^d$ : simulación del centroide rotado (recoloreado) del conjunto  $G_1$ . Como lo percibe el daltónico después de recolorear.
- Comprobamos que la simulación para el tono recoloreado  $\widehat{X}_{1,v}^d$  se discrimina del resto de colores que percibe correctamente  $G_2$ .

$$\Phi(\widehat{G}_1^d, G_2) = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists \widehat{X}_{1,v}^d \in \widehat{G}_1^d, X_{2,v}^o \in G_2 \mid \varphi(\widehat{X}_{1,v}^d, X_{2,v}^o, \Psi_2) \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$\Psi_2 = (20, 20, 20)$$

- $\Phi$ : Función discriminación color después de recoloreado. Se simula cómo ve el daltónico el centroide recoloreado  $\widehat{X}_{1,v}^d$  y se compara con el resto de centroides  $X_{2,v}^o$  que percibe correctamente del conjunto ( $G_2$ ).
- $\widehat{G}_1^d$  = Conjunto que contiene los centroides rotados, es decir, recoloreados.

- $\widehat{G_1^d}$  = Conjunto que contiene la simulación los centroides rotados, es decir, como ve los colores el daltónico una vez recoloreados.
  - $G_2$  = Conjunto que contiene los centroides que el daltónico percibe correctamente.
  - $\varphi$ : En este caso, la función diferencia de color viene dada por:
- $$\varphi(X_{1,v}^d, X_{2,v}^o, \Psi_2) = \begin{cases} 1 & \text{si } |R_{1,v}^d - R_{2,v}^o| < 20, |G_{1,v}^d - G_{2,v}^o| < 20, |B_{1,v}^d - B_{2,v}^o| < 20 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Equivale a decir, que el centroide recoloreado se discrimina correctamente del conjunto de colores que ve correctamente ( $G_2$ ), cuando las tres componentes R,G,B de  $X_{1,v}^d$  difieren simultáneamente en más de 20 tonos de cualquier centroide  $X_{2,v}^o$  del conjunto de colores que percibe bien.

7. Los pasos 1 a 6 se repiten de forma iterativa hasta que todos los centroides recoloreados se diferencian lo suficiente de los centroides originales que percibe correctamente. Es decir, el proceso se termina cuando:

$$\Phi(\widehat{G_1^d}, G_2) = 0$$

Cuando esto sucede, se termina el proceso y se recolorea la imagen reemplazando los colores de  $G_1$  por los colores de  $\widehat{G_1}$ .

Los resultados se muestran la Figura 4.3.



**Figura 4.3. a) Imagen “fruits” recoloreada. b) Percepción del protánope de la imagen recoloreada [21]**

#### 4.3.1.2 Observaciones al algoritmo de recoloreado propuesto por Jeong

Se trata de un algoritmo complejo y difícil de replicar, ya que el propio artículo deja algunas lagunas de indefinición. A la hora de implementarlo, surgen los siguientes problemas:

- No define el número de *clusters* que utiliza para clasificar los colores en los conjuntos  $G_1$  y  $G_2$
- No define los parámetros del propio agrupamiento *Fuzzy C-Means*. Mientras que en *K-Means* cada punto pertenece a un solo *cluster*, en *Fuzzy C-Means* un punto puede pertenecer a más de uno, por lo que hay que establecer el valor para un parámetro denominado índice de “fuzzificación”. Este valor, por lo general, comprendido entre valores (1-2), proporciona una idea de lo difusos que son los agrupamientos en *clusters*. Si se utiliza un valor próximo a 1 se aproxima a *K-Means*, y a medida que este valor aumenta, los *clusters* se hacen más difusos.

Tampoco se define el parámetro de error, o diferencia necesaria para detener la búsqueda iterativa del centroide, así como el número máximo de iteraciones para detener la búsqueda o el tipo de inicialización de los centroides.

- El cálculo de los coeficientes  $q_1, q_2, q_3$  del cuaternión unitario no se puede hacer directamente utilizando las expresiones dadas.

$$q_1 = \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(R^\circ)$$

$$\begin{aligned} q_2 &= \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(G^o) \\ q_3 &= \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(B^o) \end{aligned}$$

El motivo es que  $R^o, G^o, B^o$  no son ángulos, sino los valores normalizados (entre 0 y 1) de las componentes de color de un determinado píxel.

- La expresión utilizada para calcular el ángulo de rotación,  $\theta_v^p$  no indica si está utilizando radianes o grados.

$$\theta_v^p = \lfloor \alpha \cdot (\omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d) + \beta) \cdot \theta_v^r \rfloor$$

El hecho de utilizar el valor del coeficiente  $\alpha = 0.017$ , induce a pensar que Jeong trabaja con el máximo ángulo de giro  $\theta_v^r$  en grados, y obtiene el valor de  $\theta_v^p$ , después de truncar, expresado en radianes, ya que:

$$\text{valor en radianes} = \text{valor en grados} \cdot \frac{\pi}{180} = \text{valor en grados} \cdot 0.017$$

Por otro lado, el truncamiento en la expresión invita a pensar que utiliza grados, pero tanto si utilizamos grados como radianes, la expresión proporciona rotaciones ínfimas, y en la mayoría de los casos es nula. Es decir, el recoloreado es inexistente.

- El recoloreado solamente se produce al salir del bucle iterativo, cuando la función de discriminación de color es adecuada, y se cumple  $\Phi(\widehat{G}_1^d, G_2) = 0$ . Se ha observado que, si se trabaja con imágenes con gran variedad de colores y elevado número de *clusters*, ( $\geq 32$ ), esta condición no llega a cumplirse.

#### 4.3.1.3 Parametrización

Ante la falta de concreción y definición en algunos de los parámetros que utiliza el algoritmo de Jeong, se ha efectuado un estudio para ver cómo influyen los diferentes parámetros en el recoloreado.

Para poder apreciar los efectos que producen la variación de parámetros, utilizaremos diferentes imágenes y láminas de prueba. Junto a la descripción se muestran algunas imágenes a modo de ejemplo. El estudio completo de selección de parámetros se recoge en el Apéndice C.

Los parámetros a variar son:

**Número de clusters:** Se ha probado con 8, 16, 32 y 64 *Clusters*. Afecta a la gama de colores que se utilizan para recolorear. Cuando la imagen tiene una gama cromática variada, interesa trabajar con un elevado número de *clusters* (cada *cluster* será un color) pero utilizar un número elevado en una imagen de calidad superior al millón de píxeles hace que el tiempo de cálculo sea inviable. Además, hay que tener en cuenta que el paso 6 de algoritmo de Jeong, con más de 32 *clusters* no encuentra solución en muchas ocasiones.

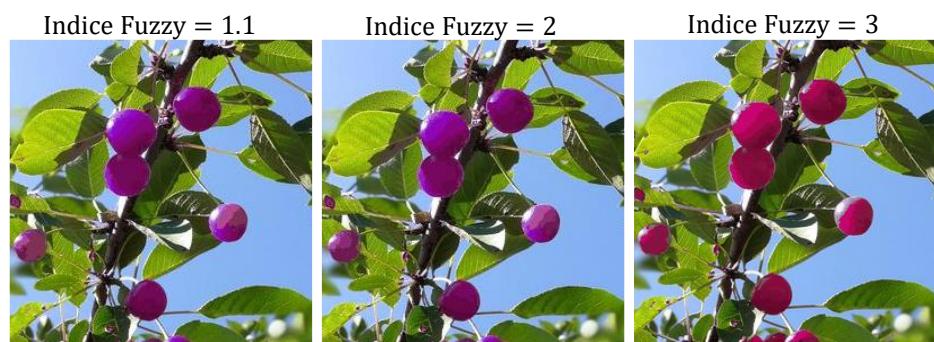
Hemos optado por trabajar siempre con 32 *clusters*, que proporciona resultados y tiempos de cálculo aceptables en la mayoría de las imágenes (ver Figura 4.4).

**Índice de “fuzzificación”:** Normalmente se utilizan valores comprendidos entre 1 y 2. Se han ensayado diferentes valores, apreciando diferencias al comparar los agrupamientos con el índice 1.1 y mayores a 3. Recordamos que con el valor 1 el solapamiento entre *clusters* es nulo, mientras que con un valor 3 el solapamiento es elevado. Es decir, cuanto mayor es el índice, más difusos son los *clusters* (ver Figura 4.5).

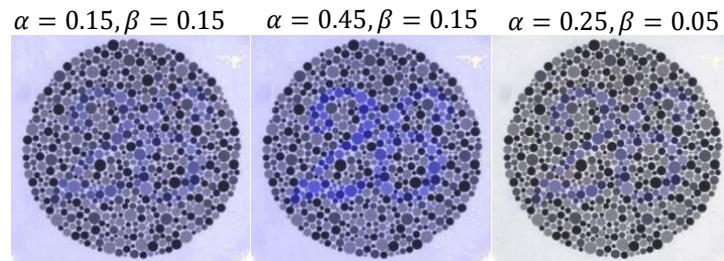
**Alfa y Beta:** Son los coeficientes que definen la proporción de variación que vamos a aplicar al recoloreado. Es decir, el porcentaje del ángulo máximo de giro posible de cada color que no se percibe bien. Estos coeficientes los hemos obtenido mediante una aproximación lineal a partir de diferentes porcentajes del ángulo de variación (ver Figura 4.6).



**Figura 4.4. Efecto del número de clusters sobre el recoloreado**



**Figura 4.5. Efecto sobre el recoloreado de diferentes índices Fuzzy.**



**Figura 4.6. Efecto sobre el recoloreado de diferentes parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ .**

En la Tabla 4.1 se muestra un resumen de los valores ensayados para cada defecto de visión:

Defecto	Ángulo de giro $\theta_v^p$	$\alpha$	$\beta$	Índice Fuzzy
Protanopía	18.2% -19.9% de $\theta_v^r$	0.017	0.182	1.1 - 2 - 3
Deuteranopía	3% - 40% de $\theta_v^r$	0.37	0.03	1.1 - 2 - 3
Prot.-Deut.-Trit.	15% - 30% de $\theta_v^r$	0.15	0.15	1.1 - 2 - 3
Prot.-Deut.-Trit	15% - 60% de $\theta_v^r$	0.45	0.15	1.1 - 2 - 3
Prot.-Deut.-Trit	5% - 30% de $\theta_v^r$	0.25	0.05	1.1 - 2 - 3

**Tabla 4.1 Parámetros utilizados para seleccionar el ángulo de giro**

A la vista de los resultados obtenidos en el Apéndice C, nos decantamos por utilizar 32 clusters y un índice de fuzzy = 1.1 con carácter general. En cuanto a los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ :

- Protanopía y tritanopía:  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$
- Deuteranopía:  $\alpha = 0.37, \beta = 0.03$

#### 4.3.1.4 Algoritmo de recoloreando implementado para protanopía

Para verificar que nuestro algoritmo trabaja del mismo modo que el de Jeong, a la hora de implementarlo hemos utilizado un recorte de la imagen “fruits” que este autor utiliza en su artículo, que a pesar de la baja calidad y resolución sirve para comparar resultados.

1. Se clasifican los colores en 2 conjuntos  $G_1$  y  $G_2$ , de 32 *clusters* cada uno de ellos. Se establece un máximo de 100 iteraciones para *Fuzzy C-Means*, con un índice de “fuzzificación” = 1.1; error = 0.005 e inicialización aleatoria.

$$O_1 = \{X_k | \varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = 0 \text{ and } \gamma(X_k^o) = 1\}$$

$$O_2 = \overline{O_1}$$

Donde:

- $X_k$ : Color “k” dado por los valores de 3 píxeles R, G, B.
  - $X_k^o$ : Color “k” de la imagen original.
  - $X_k^d$ : Color “k” de la imagen simulada (Se simula como lo percibe el daltónico).
  - $O_1$ : Conjunto que contiene los colores  $X_k$  que el daltónico no percibe.
  - $O_2$ : Conjunto que contiene los colores  $X_k$  que el daltónico percibe correctamente.
  - $\Psi_1$ : Vector umbral. Se establece en el 1% de cada componente RGB para cada color de la imagen original  $X_k^o$
- $$\Psi_1 = (\psi_1, \psi_2, \psi_3) \Rightarrow \Psi_1 = (1\%, 1\%, 1\%)$$
- $\gamma$ : Función extracción de color (rojizo en caso de protanopía) de la imagen original
- $$\gamma(X_k^o) = \begin{cases} 1 & \text{si } R^o > G^o \text{ and } R^o > B^o \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$
- $\varphi$ : Función diferencia de color entre la imagen original y simulada
- $$\varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = \begin{cases} 1 & \text{si } |R^o - R^d| < \psi_1, |G^o - G^d| < \psi_2, |B^o - B^d| < \psi_3 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$
- Luego  $\varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = 0$  cuando la diferencia entre el color original y el simulado supera el umbral del 1% fijado.

Los resultados de este paso se muestran en la Figura 4.7 a modo de ejemplo.



**Figura 4.7.** De izquierda a derecha, imagen original utilizada por Jeong “fruits” [21], colores que percibe ( $O_2$ ) y colores que no percibe correctamente un protánope ( $O_1$ ).

2. Mediante *fuzzy c-means* se agrupan los colores de  $O_1$  y  $O_2$  en los conjuntos:

$$G_1 = \{g_{1,1}, g_{1,2}, \dots, g_{1,N_1}\}$$

$G_2 = \{g_{2,1}, g_{2,2}, \dots, g_{2,N_2}\}$  donde cada *cluster*  $g_{u,v}$  tiene un color representativo dado por su centroide  $X_{u,v}$

Por ejemplo, para 3 *clusters*  $G_1 = \{X_{1,1}^o, X_{1,2}^o, X_{1,3}^o\}$

Donde:

- $G_1$ : Conjunto que contiene los centroides del conjunto  $O_1$ .
- $G_2$ : Conjunto que contiene los centroides del conjunto  $O_2$ .

- $X_{u,v}$ : Centroide que se corresponde con un color RGB.
- $X_{1,v}^o$ : Centroide del conjunto  $G_1$  de la imagen original
- $X_{2,v}^o$ : Centroide del conjunto  $G_2$  de la imagen original

En la Figura 4.8 se muestran ambos conjuntos,  $G_2$  y  $G_1$  de izquierda a derecha



**Figura 4.8. Imágenes anteriores segmentadas (32 clusters)**

Dada la escasa variedad cromática de la imagen seleccionada por Jeong, no se aprecian diferencias entre la imagen original y la segmentada, correspondiente a los conjuntos  $G_2$  y  $G_1$ .

3. Para reducir el número de iteraciones se calcula  $\omega$ : Cantidad de diferencia de color entre centroides de la imagen original y simulada del conjunto  $G_1$

$$\omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d) = |R_{1,v}^o - R_{1,v}^d| + |G_{1,v}^o - G_{1,v}^d| + |B_{1,v}^o - B_{1,v}^d|$$

Donde:

- $X_{1,v}^d$ : Centroide del conjunto  $G_1$  de la imagen simulada  

$$X_{1,v}^d = [\text{Matriz simulación}] \cdot X_{1,v}^o$$
- $R_{1,v}^o, G_{1,v}^o, B_{1,v}^o$ : Componentes R, G y B del color dado por el centroide  $X_{1,v}^o$  de la imagen original.
- $R_{1,v}^d, G_{1,v}^d, B_{1,v}^d$ : Componentes R, G y B del color dado por el centroide  $X_{1,v}^d$  de la imagen simulada.

4. Se calcula el color modificado  $\widehat{X}_{1,v}^o$ . Centroides recoloreados del conjunto  $G_1$ .

$$\widehat{X}_{1,v}^o = P \cdot X_{1,v}^o$$

Donde:

- $\widehat{X}_{1,v}^o$ : Centroide rotado (recoloreado) del conjunto  $G_1$
- $P$ : Matriz de rotación  

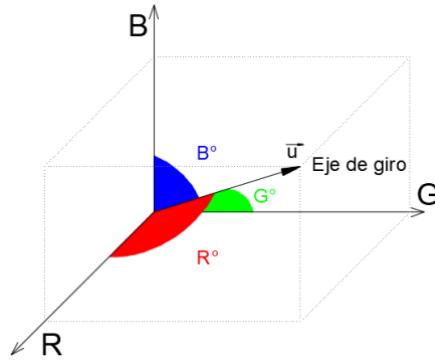
$$P = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix}$$
- $q_0, q_1, q_2, q_3$ : Coeficientes del cuaternión unitario, definidos como:  

$$q_0 = \cos(\theta_v^p/2)$$

$$q_1 = \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(R^o)$$

$$q_2 = \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(G^o)$$

$$q_3 = \sin(\theta_v^p/2) \cdot \cos(B^o)$$
- $R^o, G^o$  y  $B^o$ : Asumimos que son los ángulos formados respectivamente por la componente R y el eje R; la componente G y el eje G; componente B y el eje B de las coordenadas unitarias que definen el eje de giro definido para el cuaternión unitario. Estos ángulos se representan en la Figura 4.9.



**Figura 4.9. Componentes del eje de giro para definir el cuaternion unitario**

- El cuaternion unitario se define a partir del vector unitario que expresa el eje de giro  $\vec{u}$ , y un determinado ángulo  $\theta_v^p$  [25] [26] que indica el ángulo que un punto dado (color), rota entorno al eje  $\vec{u}$ .

Para verificar que la rotación que imprime el cuaternion y que las asociaciones que se indican a continuación son correctas, se ha confeccionado una hoja de cálculo *Excel*, siendo el resultado totalmente satisfactorio.

$$q = \cos \frac{\theta_v^p}{2} + \operatorname{sen} \frac{\theta_v^p}{2} \left( \frac{u_R}{\|u\|} \hat{r} + \frac{u_G}{\|u\|} \hat{g} + \frac{u_B}{\|u\|} \hat{b} \right)$$

Donde por asociación de términos:

$$\cos(R^\circ) = \frac{u_R}{\|u\|} \hat{r}$$

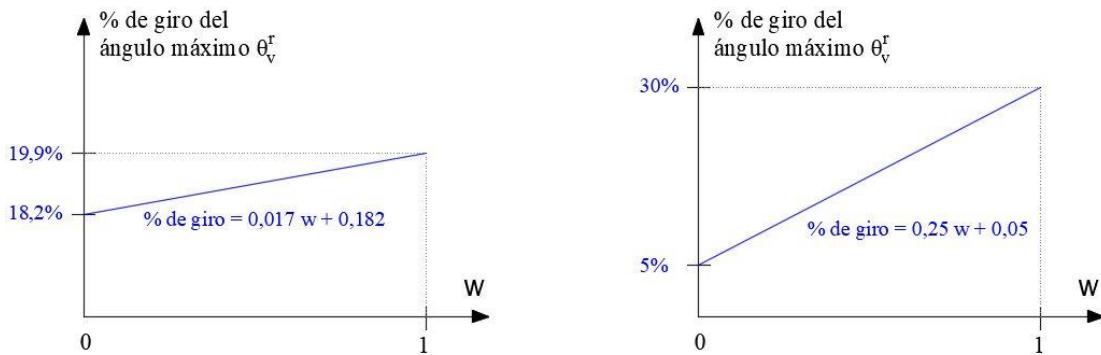
$$\cos(G^\circ) = \frac{u_G}{\|u\|} \hat{g}$$

$$\cos(B^\circ) = \frac{u_B}{\|u\|} \hat{b}$$

- $\theta_v^p$ : Ángulo de desplazamiento en grados del color del centroide para percibirlo correctamente.

$$\theta_v^p = \lfloor (\alpha \cdot \omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d)) + \beta \rfloor \cdot \theta_v^r$$

Donde  $(\alpha \cdot \omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d)) + \beta$  es el porcentaje de giro del ángulo máximo  $\theta_v^r$  que se representa en la Figura 4.10. Esta asociación de términos proporciona un porcentaje de rotación comprendido entre el 18.2% y 19.9% de  $\theta_v^r$  para los parámetros de Jeong  $\alpha = 0.017$  y  $\beta = 0.182$  y del 5% y 30% de  $\theta_v^r$  con nuestra selección, dada por  $\alpha = 0.25$  y  $\beta = 0.05$ . De este modo, la variación de  $\theta_v^p$  es proporcional a la cantidad de diferencia de color  $\omega$ .



**Figura 4.10. Porcentaje de giro del ángulo  $\theta_v^r$**

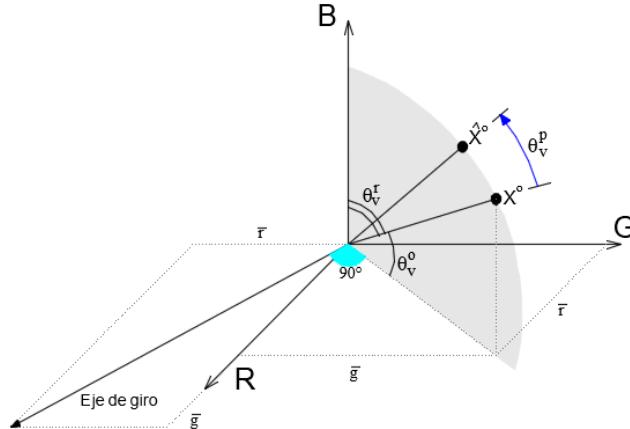
- [\*] Significa truncamiento, para que el ángulo sea un número entero.

- $\theta_v^r$ : Ángulo comprendido entre  $\theta_v^o$  y  $\pi/2$  (giro máximo) y se debe cumplir:  

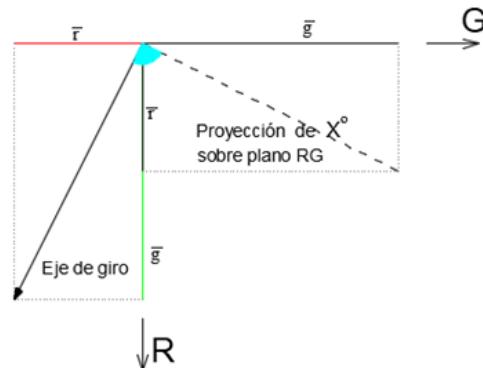
$$\theta_v^r = \frac{\pi}{2} - \theta_v^o$$
- $\theta_v^o$ : Ángulo correspondiente al centroide de un color original

$$\theta_v^o = \arctan \left( \frac{B_{1,v}}{\sqrt{R_{1,v}^2 + G_{1,v}^2}} \right)$$

Los ángulos indicados, y la rotación proyectada se muestran en la Figura 4.11 y Figura 4.12

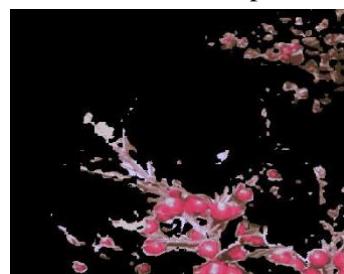


**Figura 4.11.** Eje de giro del cuaternion unitario utilizado para desplazar las componentes de color hacia tonos azules.



**Figura 4.12.** Vista del eje de giro (para protanopía y deuteranopía) contenido en el plano RG

Los resultados del recoloreado definido en este paso se muestran en la Figura 4.13.



**Figura 4.13.** Imagen recoloreada del conjunto  $G_1$

5. Se realiza la simulación de la visión del daltónico del color rotado (recoloreado)

$$\widehat{X_{1,v}^d} = [\text{Matriz simulación}] \cdot \widehat{X_{1,v}^o}$$

Donde:

- $\widehat{X}_{1,v}^o$ : Centroide rotado (recoloreado) del conjunto  $G_1$ .
- $\widehat{X}_{1,v}^d$ : simulación del centroide rotado (recoloreado) del conjunto  $G_1$ . Como lo percibe el daltónico después de recolorear.

En la Figura 4.14 se muestra cómo percibe el daltónico las componentes recoloreadas y se contrasta con la percepción de la imagen original.



**Figura 4.14. Visión del protánope de la imagen original y de las componentes recoloreadas**

Se omite el paso 6, de discriminación entre la simulación de los centroides recoloreados y centroides que ve el daltónico, ya que se ha observado que cuanto más elevado es el número de *clusters*, hay más posibilidades de que siempre exista un color que no diferencia bien y el sistema entra en un bucle sin fin.

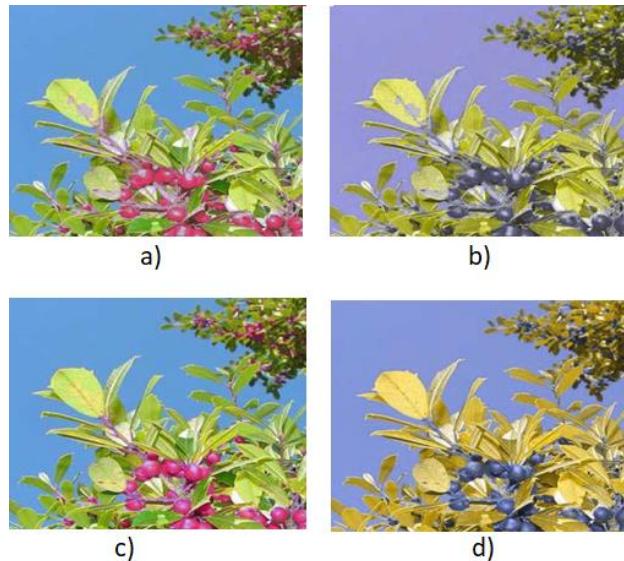
En la Tabla 4.2, se muestran los centroides que compara la función de discriminación. Se puede observar cómo hay uno que no cumple (sombreado en amarillo) y otro que está en el límite de discriminación (sombreado en azul), ya que la diferencia en valor absoluto es igual a 20. Realizar esta comprobación de forma iterativa, en muchas ocasiones no obtiene resultado satisfactorio, obligando a hacer iteraciones de forma indefinida. Motivo por el que se omite este punto.

6. Termina el proceso y se recolorea la imagen reemplazando los colores de  $G_1$  por los colores de  $\widehat{G}_1$ .

Los resultados obtenidos con nuestra implementación, utilizando  $\alpha = 0.017$  y  $\beta = 0.182$  se comparan con los de Jeong en la Figura 4.15.

Centroides $G_2$			Centroides $\widehat{G}_1^d$		
R	G	B	R	G	B
121	146	46	173	190	100
101	158	221	147	171	56
205	220	165	138	163	55
136	165	141	117	156	179
116	141	36	193	208	119
160	180	91	185	200	126
129	154	52	97	117	31
207	228	119	99	157	215
109	132	35	99	157	220
205	219	130	129	153	72
159	181	72	183	199	110
77	96	23	109	155	195
99	157	219	60	74	16
145	168	72	136	162	42
103	156	215	97	156	213
144	168	103	124	159	162
			163	163	182
				54	54
					36

**Tabla 4.2. Centroides del conjunto de color que percibe correctamente ( $G_2$ ) y del conjunto que no percibe, después de recolorearlos y simular su visión por el protánope.**



**Figura 4.15.** a) Imagen “fruits” recoloreada. b) simulación de la visión del protánope de la imagen recoloreada. Se comparan con c) y d) Imagen recoloreada y simulación de cómo la ve el protánope según Jeong.

Puesto que se ha indicado en el estudio de parámetros, que nosotros nos decantamos por utilizar  $\alpha = 0.25$  y  $\beta = 0.05$  (variación comprendida entre 5% y el 30% del ángulo de giro máximo  $\theta_v^r$ ), en la Figura 4.16, se muestran los resultados obtenidos, que se asemejan un más a los de Jeong.



**Figura 4.16.** Ejemplo de recoloreado y su visión del protánope para  $\alpha = 0.25$  y  $\beta = 0.05$

#### 4.3.1.5 Adaptación del algoritmo de Jeong para deuteranopía.

Para evaluar este algoritmo utilizaremos la imagen “cherry” [27], que posee tonos rojos, verdes y azules y es parecida a “fruits”, pero con mayor resolución.

En la Figura 4.17 se muestra la imagen original y como la percibe un sujeto con deuteranopía.



**Figura 4.17.** Imagen “cherry” original [27] y su simulación para deuteranopía

Al igual que en protanopía (ausencia de conos L) utilizamos la función de extracción de color rojizo. Podríamos pensar que en deuteranopía (ausencia de conos M) habría que utilizar la función equivalente, extracción de color verdoso. Es decir:

$$\gamma(X_k^o) = \begin{cases} 1 & \text{si } G^o > R^o \text{ and } G^o > B^o \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Extraer los tonos verdes induce a error, ya que en la visión del deuteránope predominan los tonos verdosos. Es cierto que la percepción del verde es diferente al original, pero sigue siendo verde. En cambio, el rojo lo percibe como verde, lo que supone un mayor error de percepción.

Si se ejecuta la función de extracción del color verdoso, estamos afirmando que el conjunto de colores que no percibe correctamente un deuteránope ( $O_1$ ) y los que percibe bien ( $O_2$ ) son los representados en la Figura 4.18.

Es decir, afirmamos que percibe correctamente el rojo de las cerezas, cuando en la simulación se ve perfectamente que no es así. Por este motivo, se va a utilizar la función de extracción del color rojizo, de modo que serán los tonos rojizos, los que se van a modificar.



**Figura 4.18. Conjunto de colores  $O_1$  y  $O_2$  con función extracción tonos verdosos**

En definitiva, utilizamos para deuteranopía el mismo algoritmo de recoloreado diseñado en protanopía, ajustando los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , según el estudio de parámetros realizado.

Para deuteranopía, la mejor opción es utilizar  $\alpha = 0.37$  y  $\beta = 0.03$ .

El resultado del recoloreado y como lo percibe el deuteránope se muestra en la Figura 4.19.



**Figura 4.19. Imagen recoloreada y como la percibe un sujeto con deuteranopía**

#### 4.3.1.6 Adaptación del algoritmo de Jeong para tritanopía.

Se utiliza también la imagen “cherry” del apartado anterior.

1. Se clasifican los colores en 2 conjuntos  $G_1$  y  $G_2$ , de 32 *clusters* cada uno de ellos. Número máximo iteraciones = 100. Índice de “fuzzificación” = 1.1; error = 0.005 e inicialización aleatoria.

$$O_1 = \{X_k | \varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = 0\}$$

$$O_2 = \overline{O_1}$$

Definimos la función de extracción del color azulado:

$$\gamma(X_k^o) = \begin{cases} 1 & \text{si } B^o > R^o \text{ and } B^o > G^o \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

En la visión del tritánope predominan los tonos rojizos, mientras que los verdosos y azules están desvirtuados. Utilizamos la función de extracción del color azulado por carecer el tritánope de conos S.

Donde:

La función diferencia de color se mantiene invariante.

$$\varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = \begin{cases} 1 & \text{si } |R^o - R^d| < \psi_1, |G^o - G^d| < \psi_2, |B^o - B^d| < \psi_3 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Luego  $\varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1) = 0$  cuando la diferencia entre el color original y el simulado supera el umbral fijado.

2. Mediante *fuzzy c-means* se agrupan los colores de  $O_1$  y  $O_2$  en los conjuntos:

$$G_1 = \{g_{1,1}, g_{1,2}, \dots, g_{1,N_1}\}$$

$G_2 = \{g_{2,1}, g_{2,2}, \dots, g_{2,N_2}\}$  donde cada *cluster*  $g_{u,v}$  tiene un color representativo dado por su centroide  $X_{u,v}$

3. Se calcula  $\omega$ : Cantidad de diferencia de color entre centroides de la imagen original y simulada del conjunto  $G_1$

$$\omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d) = |R_{1,v}^o - R_{1,v}^d| + |G_{1,v}^o - G_{1,v}^d| + |B_{1,v}^o - B_{1,v}^d|$$

4. Se calcula el color modificado  $\widehat{X}_{1,v}^o$  (Centroides recoloreados del conjunto  $G_1$ ).

$$\widehat{X}_{1,v}^o = P \cdot X_{1,v}^o$$

Donde:

$$P = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix}$$

-  $q_0, q_1, q_2, q_3$ : Coeficientes del cuaternión unitario, definidos en protanopía.

Los ángulos y coeficientes

$$\theta_v^p = \left\lfloor \left( (\alpha \cdot \omega(X_{1,v}^o, X_{1,v}^d)) + \beta \right) \cdot \theta_v^r \right\rfloor$$

-  $\alpha = 0.25$  y  $\beta = 0.05$

-  $\theta_v^r$ : Ángulo comprendido entre  $\theta_v^o$  y  $\pi/2$  (giro máximo) y se debe cumplir:

$$\theta_v^r = \frac{\pi}{2} - \theta_v^o$$

-  $\theta_v^o$ : Ángulo correspondiente al centroide de un color original

$$\theta_v^o = \arctan \left( \frac{G_{1,v}}{\sqrt{R_{1,v}^2 + B_{1,v}^2}} \right)$$

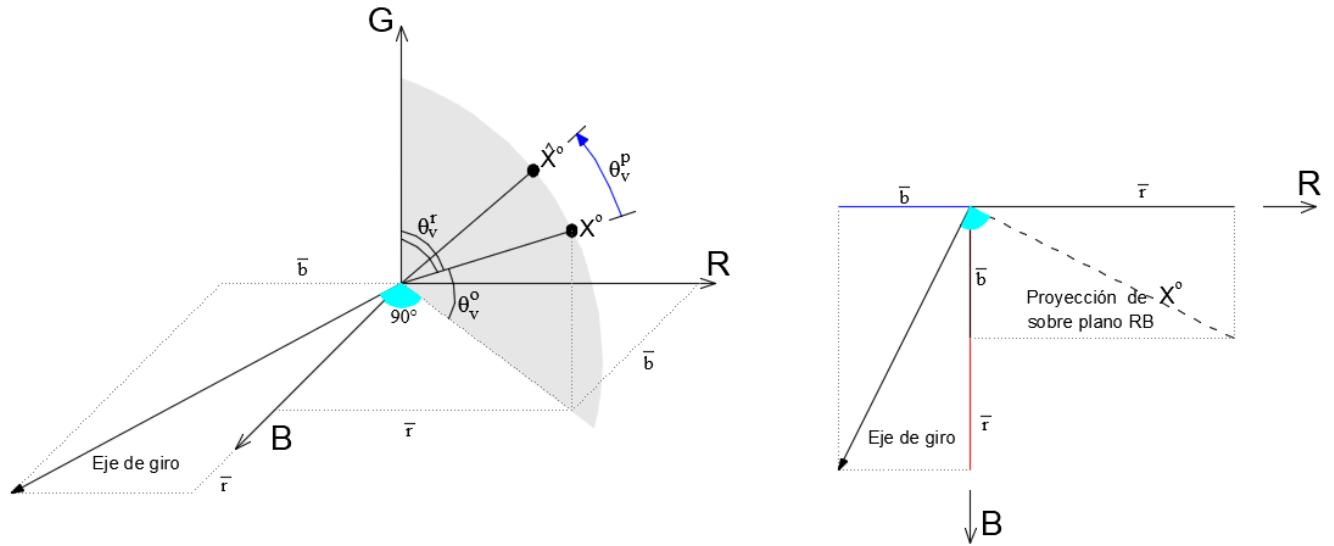
El ángulo  $\theta_v^p$  se gira hacia el eje G como muestra la Figura 4.20.

5. Se realiza la simulación de la visión del daltónico del color rotado (recoloreado)

$$\widehat{X}_{1,v}^d = [\text{Matriz simulación}] \cdot \widehat{X}_{1,v}^o$$

6. Termina el proceso y se recolorea la imagen reemplazando los colores de  $G_1$  por los colores de  $\widehat{G}_1$ .

El resultado del recoloreado y como lo percibe el tritánope se muestra en la Figura 4.21.



**Figura 4.20. Eje de giro utilizado para el recoloreado en tritanopía**



**Figura 4.21. Imagen recoloreada y como la percibe un sujeto con tritanopía**

### 4.3.2 Recoloreado mediante Transformaciones lineales

Se implementa el algoritmo propuesto por Melillo et al., según se describe en el artículo “*Wearable Improved Vision System for Color Vision Deficiency Correction*” [22], donde se aplica a los tres defectos que sufren los individuos dicromáticos.

Partimos de la imagen simulada, calculada en el apartado 4.2, con valores normalizados, es decir, en el rango [0-1].

$$\begin{pmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{pmatrix} = (C) \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Los píxeles de la imagen simulada se definen de forma genérica como  $R_*, G_*, B_*$ , si bien, en función del defecto de visión se corresponden con:

- Protanopía:  $R_p, G_p, B_p$
- Deuteranopía:  $R_d, G_d, B_d$
- Tritanopía:  $R_t, G_t, B_t$

#### 4.3.2.1 Algoritmo de recoloreado propuesto por Melillo

- 1) Calculamos la imagen diferencia de color entre la imagen simulada y la imagen original.

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Donde:

- $R_*, G_*, B_*$ : Componentes de cada píxel de la imagen simulada para un tipo de defecto
- $R, G, B$ : Componentes de cada píxel de la imagen original
- $R', G', B'$ : Componentes de cada píxel de la imagen diferencia de color

2) Aplicamos a la imagen diferencia de color, la matriz de recoloreado ( $M_{Rec}^*$ ):

$$\begin{pmatrix} RR \\ GG \\ BB \end{pmatrix} = (M_{Rec}^*) \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix}$$

Donde:

- Protanopía:

$$(M_{Rec}^p) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Deuteranopía:

$$(M_{Rec}^d) = \begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{pmatrix}$$

- Tritanopía:

$$(M_{Rec}^t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0.7 \\ 0 & 1 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- $RR, GG, BB$ : Componentes de cada píxel de la imagen diferencia después de recoloreada.

3) Se calcula la imagen final recoloreada como la suma de la imagen diferencia recoloreada y la imagen simulada:

$$\begin{pmatrix} \hat{R} \\ \hat{G} \\ \hat{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RR \\ GG \\ BB \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{pmatrix}$$

Donde:

- $\hat{R}, \hat{G}, \hat{B}$ : Componentes de cada píxel de la imagen final recoloreada.

4) Se realiza la simulación de la visión del daltónico de la imagen final recoloreada.

$$\begin{pmatrix} \widehat{R}_* \\ \widehat{G}_* \\ \widehat{B}_* \end{pmatrix} = (C) \cdot \begin{pmatrix} \hat{R} \\ \hat{G} \\ \hat{B} \end{pmatrix}$$

Donde:

- $(C)$ : Matriz de simulación definida en el apartado 4.2.1
- $\widehat{R}_*, \widehat{G}_*, \widehat{B}_*$ : Componentes de cada píxel de la simulación de la imagen final recoloreada, para verla como la percibe el daltónico.

Se debe tener en cuenta que hay que desnormalizar la imagen antes de representarla, para convertirla al rango [0- 255], teniendo la precaución de limitar los valores al citado rango, ya que las operaciones matriciales efectuadas, en algunos casos, pueden proporcionar valores que no están comprendidos entre 0 y 255.

#### **4.3.2.2 Implementación del algoritmo de recoloreado de Melillo**

Comprobaremos el resultado de la implementación, partir de un recorte de la Figura 4.22 “ISO” que aparece en su artículo, aplicada al defecto de protanopía.



**Figura 4.22.** De izquierda a derecha: Imagen original, percepción del protánope, percepción después de la corrección [22]

Nuestra implementación arroja el resultado de la Figura 4.23:



**Figura 4.23.** Imagen simulada, imagen recoloreada y percepción después del recoloreado.

El resultado final no se asemeja al que proporciona Melillo. Si modificamos el paso 1, de modo que la diferencia de color es el resultado de restar a la imagen original la simulada:

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{pmatrix}$$

El resultado que ahora obtenemos es igual al de Melillo (Figura 4.24).



**Figura 4.24.** Percepción del protánope, después del recoloreado

Por lo tanto, se modifica el paso 1 del algoritmo según lo indicado, aplicándose de aquí en adelante, al recoloreado de los tres defectos.

#### 4.4 Interfaz de usuario

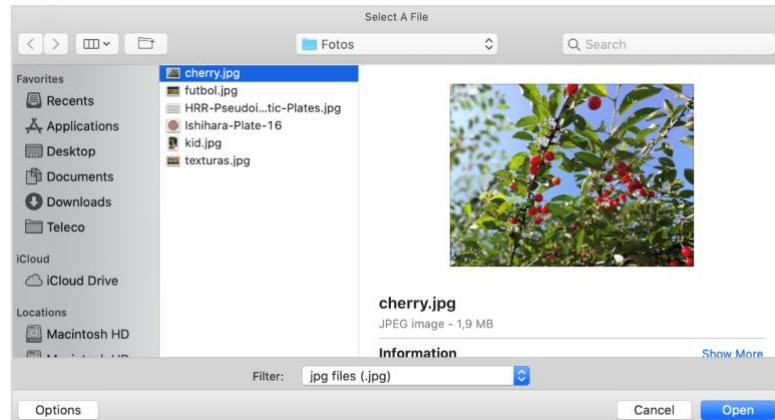
Para generar un entorno más amigable, se ha diseñado una *GUI* sencilla y funcional que permite ejecutar los algoritmos de simulación y recoloreado implementados.

Al ejecutar el programa aparece la ventana de inicio o menú principal. Consta de tres botones: < simulación >, < recoloreado > y < Exit >, tal y como se muestra en la Figura 4.25.



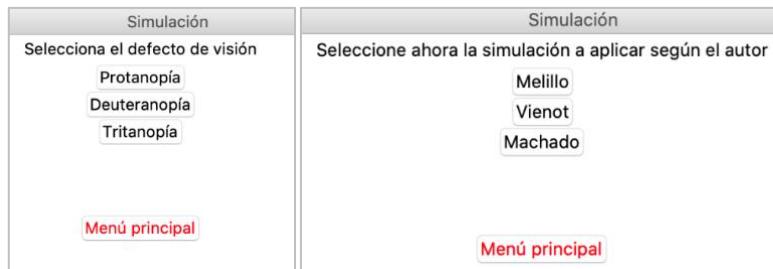
**Figura 4.25.** Menú principal de la aplicación

Si seleccionamos < simulación >, aparecerá una nueva ventana (Figura 4.26) que nos pedirá seleccionar una imagen de cualquier directorio. En este caso se selecciona una de nuestra base de datos.



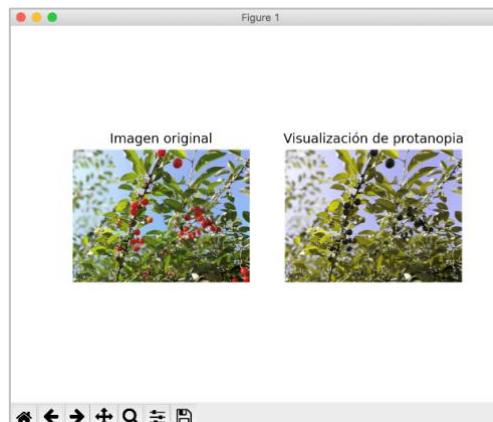
**Figura 4.26. Ventana selección de imágenes**

Una vez seleccionada la imagen, una nueva ventana nos muestra los tres tipos de defecto de visión que se pueden simular para que seleccionemos uno de ellos. Finalmente, otra ventana nos solicita el autor cuya matriz de simulación se utilizará para generar la imagen simulada. En la Figura 4.27 se muestran estas dos ventanas.



**Figura 4.27. Ventanas de selección del defecto de visión y matriz de simulación**

La imagen simulada se presenta por pantalla y simultáneamente se guarda en el directorio `/simulated_ori/a` con el siguiente formato: *nombre\_imagen\_a\_b.jpg*, donde “a” es el nombre del autor y “b” es el defecto de visión simulado. Al cerrar la presentación por pantalla se vuelve al menú principal.



**Figura 4.28. Presentación de resultados por pantalla**

Si seleccionamos < recoloreado > lo primero que nos aparece, como en el caso anterior, es la base de datos para que seleccionemos una imagen. A continuación, una nueva pantalla (Figura 4.29) invita a elegir uno de los dos tipos de recoloreado: el basado en el algoritmo de Melillo (Transformaciones lineales) o en el algoritmo de Jeong (*Fuzzy c-means clustering*).



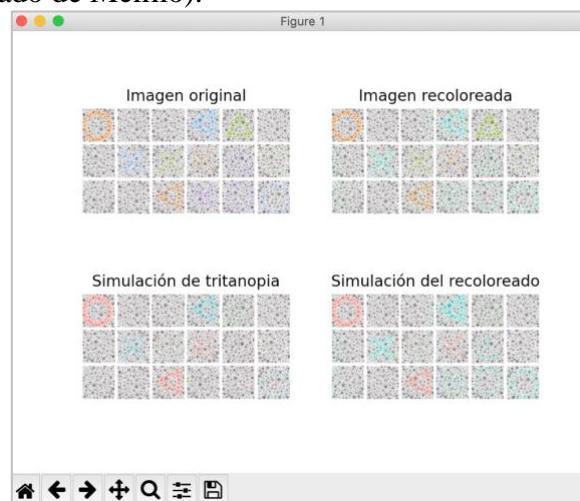
**Figura 4.29. Ventana selección tipo de recoloreado**

Si se selecciona Jeong, nos aparecerá una ventana para seleccionar el defecto de visión que deseamos mejorar junto con los parámetros del algoritmo. Estos parámetros vienen inicialmente cumplimentados con unos valores por defecto, los de nuestro estudio de parametrización. No obstante, son personalizables. A continuación, se debe seleccionar la matriz de simulación que utilizará el algoritmo de recoloreado. Estas ventanas se muestran en la Figura 4.30.



**Figura 4.30. Ventanas de selección del defecto a recolorear y simulación utilizada.**

El resultado por pantalla muestra la imagen original, la imagen recoloreada y sus correspondientes simulaciones (Figura 4.31). De forma simultánea, la imagen recoloreada y su correspondiente imagen simulada se guardan respectivamente en los directorios `/recolored/jeong/a` y `/simulated_rec/a`. La imagen se guarda con el nombre: `nombre_imagen_sim_recolor_J_a_b.jpg`, donde la “J” indica que el recoloreado es de Jeong. (“M” si fuera recoloreado de Melillo).



**Figura 4.31. Pantalla de resultados del recoloreado**

Al cerrar la imagen se vuelve a menú principal, al igual que si se selecciona <Menú principal>. Si se escoge Melillo, el proceso es el mismo, pero desaparece la parametrización. Si seleccionamos <Exit>, finaliza la ejecución del programa.

# 5 Evaluación y resultados

---

## 5.1 Resultados del algoritmo de simulación

Se van a mostrar y comparar los resultados que proporciona el algoritmo de simulación, con las diferentes matrices de simulación que proponen los autores ya mencionados, para los tres defectos en estudio.

Recordamos que se van a simular los defectos:

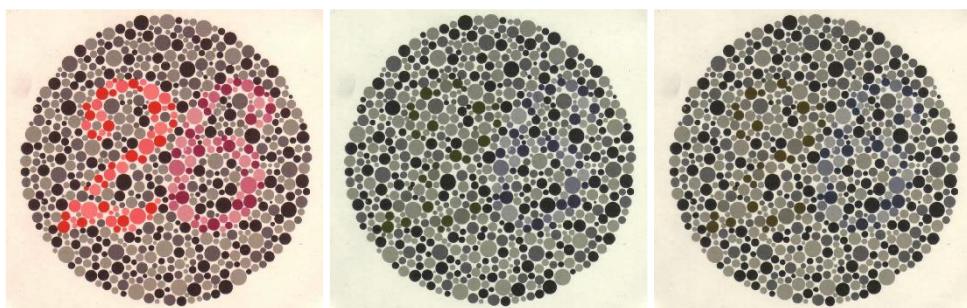
- Protanopía: Según Melillo y Machado. (Melillo y Viénot utilizan la misma matriz de simulación).
- Deuteranopía: Según Viénot, Melillo y Machado.
- Tritanopía: Según Melillo y Machado.

En los apartados siguientes se mostrarán ejemplos de simulaciones de percepción para los tres defectos que presentan las personas dicromáticas. Con ellos, podremos apreciar cómo es la visión de estos sujetos.

El defecto rojo-verde se comprobará mediante láminas de Ishihara, adecuadas para diagnosticar protanopía y deuteranopía. Para el defecto azul-amarillo utilizaremos láminas HRR (adecuadas para tritanopía).

Finalmente, se aplicará la simulación a diferentes imágenes naturales con gran variedad de colores con las que podremos ver cómo perciben el mundo las personas con discromatopsia. En el Apéndice D se incluyen los resultados obtenidos al aplicar este algoritmo a las láminas de Ishihara y HRR, ya mencionadas, junto con tres imágenes naturales de prueba, denominadas “fútbol”, “texturas” y “kid”. Se añade, además, la imagen denominada “cherry” que como se ha justificado en el apartado 4.3.1.5 sustituye a la imagen “fruits” de Jeong.

A modo de ejemplo, en la Figura 5.1 se muestra la lámina de Ishihara que contiene en su interior el número 26, y como la percibe un protánope después de aplicar la simulación de Melillo y de Machado. Teóricamente, el protánope debe ver solamente el número 6.



**Figura 5.1. (De Izda. a Dcha.) Lámina Ishihara original [1]. Simulación de Melillo. Simulación de Machado**

Aunque con algo de dificultad, con ambas simulaciones se aprecia el número 6. El conjunto completo de simulaciones se recogen en el Apéndice D.

## 5.2 Resultados de los algoritmos de recoloreando

Las láminas o imágenes que han servido para presentar la visión de los sujetos dicromáticos, se reutilizan para verificar si su percepción mejora después de aplicar un cierto recoloreando a la imagen original.

Como los dos algoritmos de recoloreado son de características muy diferentes, a la vista de las imágenes resultantes, se podrán comparar ambos de forma cualitativa.

### 5.2.1 Mediante *Clusters Fuzzy C-Means*.

Respecto a este algoritmo, Jeong et al. lo definen únicamente para protanopía. Hay que resaltar, que en el presente Trabajo Fin de Grado se ha realizado un esfuerzo por adaptarlo y poder aplicarlo también a los defectos de deuteranopía y tritanopía.

En el Apéndice E se incluyen los resultados obtenidos para los tres defectos de visión. Se aplica a las láminas de Ishihara, láminas HRR, imagen “*cherry*” y a las tres imágenes de prueba.

Como muestra, en la Figura 5.2 se puede apreciar como un protánope percibe la imagen “*cherry*” antes y después de recolorearla, siendo la diferencia bastante notable. Este algoritmo destaca por la naturalidad del recoloreado, ya que para un tricromático normal el rojo de las cerezas se sustituye por un tono fucsia.



**Figura 5.2. (Izda.) Imagen original “*cherry*” [27] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.**

Las dos imágenes inferiores simuladas, que representan la percepción del daltónico, se han obtenido aplicando el algoritmo de simulación definido por Melillo. Esto último es extensible a todos los resultados que se muestran en el Apéndice E.

### 5.2.2 Mediante transformaciones lineales

Este algoritmo propuesto por Melillo et al., se aplica de forma rápida y sencilla a los tres defectos que engloba la discromatopsia.

El Apéndice F recopila los resultados obtenidos para las láminas de Ishihara, láminas HRR, imagen “*cherry*” y las tres imágenes de prueba.

La Figura 5.3 se muestra el recoloreado para la imagen “*cherry*” y como la percibe un protánope antes y después de colorearla. Si se compara con la imagen anterior, se aprecia que el recoloreado es menos natural que el de Jeong (las cerezas adquieren un tono azul-verdosado) mientras que la percepción final toma un tono azulado menos intenso que el anterior.



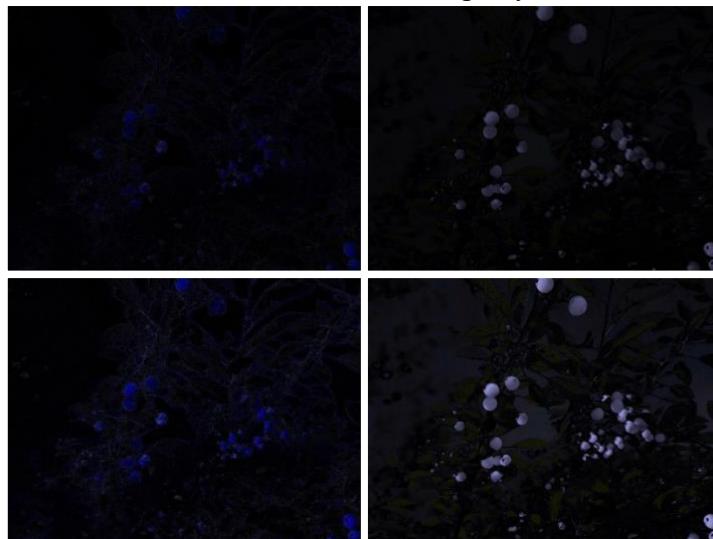
**Figura 5.3. (De Izda. a Dcha.) Imagen original “cherry” [27] y debajo su percepción por el protánope. Imagen recoloreada y debajo su percepción.**

### 5.3 Comparativa de ambos recoloreados

A modo de ejemplo, se representa la “imagen diferencia”, entre la percepción original y la percepción recoloreada de “cherry” para los dos algoritmos implementados para el protánope. Se puede apreciar en que píxeles incide cada uno de ellos y con qué intensidad. Las componentes superiores de la Figura 5.4 indican el valor absoluto RGB de la diferencia de percepciones. Cómo ese valor suele ser muy pequeño, se han multiplicado las tres componentes RGB por un mismo coeficiente para poder apreciar donde se aplica el recoloreado con mayor intensidad (componentes inferiores de la Figura 5.4).

Para mantener la proporción de intensidades y que ninguna componente RGB exceda del valor 255, el coeficiente multiplicador se ha obtenido del siguiente modo:

$$coef = \frac{255}{\text{valor máx. } R, G, B \mid \text{img. diferencia} \mid}$$



**Figura 5.4. Aportación del recoloreado a la visión del protánope para la imagen “cherry”. Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)**

El estudio completo de imágenes comparativas se puede ver en el Apéndice G.



# **6 Conclusiones y trabajo futuro**

---

## **6.1 Conclusiones**

### **6.1.1 Respeto a los resultados de las simulaciones.**

Respecto a las simulaciones de los diferentes autores, podemos concluir que todas ellas son muy similares, con leves diferencias de tonalidad, que se aprecian solamente viendo las imágenes juntas. Con carácter general, la simulación de Machado aporta unos tonos de color un poco más intensos al resto de autores.

La única excepción la constituye la simulación del defecto de tritanopía. La diferencia de color es acusada en la imagen “fútbol” (color del césped) o en la imagen “kid” (color del lazo en el pelo). Nos parece más natural la simulación de Machado, pero solo un tritánope puede decidir cuál de ellas se ajusta más a la realidad.

### **6.1.2 Respeto a los resultados de los algoritmos de recoloreado.**

La principal conclusión es que el recoloreado debe ser capaz de modificar en profundidad los tonos de color que no percibe bien, mientras que aquellos que percibe de forma moderadamente aceptable, debe modificarlos levemente.

Lo que está claro, es que el sujeto dicromático percibe una gama de colores disminuida, y por mucho que modifiquemos algunos colores, lo único que conseguiremos es que pueda diferenciarlos respecto de otros próximos entre sí, pero nunca ampliaremos su espectro de visión. Por lo tanto, un recoloreado exagerado lo único que consigue es reducir la gama cromática que percibe (ver Apéndice C).

El recoloreado de Melillo presenta dos ventajas fundamentales respecto al de Jeong:

- Coste computacional menor. Esto se traduce en que el algoritmo de recoloreado de Melillo es muchísimo más rápido que el de Jeong. El hecho de hacer *clusters* y calcular la matriz de rotación, enlentece el algoritmo, no siendo adecuado para aplicaciones en tiempo real.
- Mejor calidad de imagen recoloreada. Melillo modifica la imagen píxel a píxel. En cambio, la “clusterización” asigna a un grupo de píxeles un único valor, el de su centroide. Por lo tanto, la imagen pierde definición.

Ventajas recoloreado Jeong

- Mayor naturalidad. La principal ventaja que apreciamos en el algoritmo de Jeong es la naturalidad de la imagen recoloreada. Un sujeto con visión normal verá la imagen recoloreada por Jeong más parecida a la original que la imagen recoloreada por Melillo.
- Mejor diferenciación de rojos en deuteranopía, al transformarlos en tonos azulados. Melillo los desplaza hacia verdes, cuando la visión que predomina en un deuteránope es la de tonos verdosos.
- Mejor respuesta en tritanopía respecto a la percepción sobre Láminas HRR.

Ahora bien, solamente un individuo dicromático podrá indicarnos qué recoloreado es más adecuado. Nosotros, como tricromáticos normales, en algunas de las imágenes de prueba solamente apreciamos diferencias muy sutiles como efectos del recoloreado.

## **6.2 Trabajo futuro**

Sería interesante poder comprobar los resultados de la simulación y recoloreado con pacientes reales, que pudieran dar validez a los resultados obtenidos.

De este modo, la simulación de los diferentes defectos podría utilizarse como medio de detección del tipo de CVD y su grado de afectación.

Nos referimos tanto a tricromáticos anómalos (mayoría de sujetos con CVD) como a dicromáticos.

Puesto que Machado tiene definidas las matrices de simulación de CVD (Figura 2.1) que cubren el intervalo entre visión normal (severidad 0.0) y discromatopsia (severidad 1.0), pasando por anomalías tricromáticas con 10 grados de afectación, la simulación del rango de defectos se podría usar como sistema de detección, es decir, como un test para confirmar el tipo de daltonismo.

Table 1: Simulation matrices ?CVD									
Severity	Protanomaly			Deuteranomaly			Tritanomaly		
0.0	1.000000	0.000000	-0.000000	1.000000	0.000000	-0.000000	1.000000	0.000000	-0.000000
	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
	-0.000000	-0.000000	1.000000	-0.000000	-0.000000	1.000000	-0.000000	-0.000000	1.000000
0.1	0.856167	0.182038	-0.038205	0.866435	0.177704	-0.044139	0.926670	0.092514	-0.019184
	0.029342	0.955115	0.015544	0.049567	0.939063	0.011370	0.021191	0.964503	0.014306
	-0.002880	-0.001563	1.004443	-0.003453	0.007233	0.996220	0.008437	0.054813	0.936750
0.2	0.734766	0.334872	-0.069637	0.760729	0.319078	-0.079807	0.895720	0.133330	-0.029050
	0.051840	0.919198	0.028963	0.090568	0.889315	0.020117	0.029997	0.945400	0.024603
	-0.004928	-0.004209	1.009137	-0.006027	0.013325	0.992702	0.013027	0.104707	0.882266
0.3	0.630323	0.465641	-0.095964	0.675425	0.433850	-0.109275	0.905871	0.127791	-0.033662
	0.069181	0.890046	0.040773	0.125303	0.847755	0.026942	0.026856	0.941251	0.031893
	-0.006308	-0.007724	1.014032	-0.007950	0.018572	0.989378	0.013410	0.148296	0.838294
0.4	0.539009	0.579343	-0.118352	0.605511	0.528560	-0.134071	0.948035	0.089490	-0.037526
	0.082546	0.866121	0.051332	0.155318	0.812366	0.032316	0.014364	0.946792	0.038844
	-0.007136	-0.011959	1.019095	-0.009376	0.023176	0.986200	0.010853	0.193991	0.795156
0.5	0.458064	0.679578	-0.137642	0.547494	0.607765	-0.155259	1.017277	0.027029	-0.044306
	0.092785	0.846313	0.060902	0.181692	0.781742	0.036566	-0.006113	0.958479	0.047634
	-0.007494	-0.016807	1.024301	-0.010410	0.027275	0.983136	0.006379	0.248708	0.744913
0.6	0.385450	0.769005	-0.154455	0.498864	0.674741	-0.173604	1.104996	-0.046633	-0.058363
	0.100526	0.829802	0.069673	0.205199	0.754872	0.039929	-0.032137	0.971635	0.060503
	-0.007442	-0.022190	1.029632	-0.011131	0.030969	0.980162	0.001336	0.317922	0.680742
0.7	0.319627	0.849633	-0.169261	0.457771	0.731899	-0.189670	1.193214	-0.109812	-0.083402
	0.106241	0.815969	0.077790	0.226409	0.731012	0.042579	-0.058496	0.979410	0.079086
	-0.007025	-0.028051	1.035076	-0.011595	0.034333	0.977261	-0.002346	0.403492	0.598854
0.8	0.259411	0.923008	-0.182420	0.422823	0.781057	-0.203881	1.257728	-0.139648	-0.118081
	0.110296	0.804340	0.085364	0.245752	0.709602	0.044646	-0.078003	0.975409	0.102594
	-0.006276	-0.034346	1.040622	-0.011843	0.037423	0.974421	-0.003316	0.501214	0.502102
0.9	0.203876	0.990338	-0.194214	0.392952	0.823610	-0.216562	1.278864	-0.125333	-0.153531
	0.112975	0.794542	0.092483	0.263559	0.690210	0.046232	-0.084748	0.957674	0.127074
	-0.005222	-0.041043	1.046265	-0.011910	0.040281	0.971630	-0.000989	0.601151	0.399838
1.0	0.152286	1.052583	-0.204868	0.367322	0.860646	-0.227968	1.255528	-0.076749	-0.178779
	0.114503	0.786281	0.099216	0.280085	0.672501	0.047413	-0.078411	0.930809	0.147602
	-0.003882	-0.048116	1.051998	-0.011820	0.042940	0.968881	0.004733	0.691367	0.303900

**Figura 6.1. Matrices de simulación diferentes tipos CVD de Machado [23]**

Basándonos en el hecho de que un sujeto con CVD percibe igual la imagen real que la simulada para su defecto de visión, el test de detección se propone realizarlo en tres pasos.

- Paso 1. Determinar si posee defecto protan, deután o tritan. Se presenta al sujeto una imagen y tres simulaciones de ella realizadas con un grado de severidad intermedia

(*severity* 0.5) para indique cuál de las tres se parece más a la original. La imagen seleccionada nos indicará el tipo de deficiencia.

- Paso 2. Determinar el grado de afectación. Se presentará al individuo la imagen original y 10 simulaciones correspondientes a los 10 grados de severidad. Se propone que seleccione las 5 que más se parecen a la original y que las puntué de 1 a 5, dando 5 puntos a la de mayor semejanza y 1 a la que menos se parezca.
- Paso 3. Repetir el paso 2 con otras 4 imágenes de coloridos y temas muy diferentes entre sí.

Sumando las puntuaciones de las 5 imágenes según el grado de severidad, podremos obtener un máximo de 25 puntos.

Determinaremos como grado de severidad del defecto de visión del individuo, aquel que más se aproxime a 25 puntos.

En última instancia, se puede aproximar más el grado de severidad mediante interpolación de valores de los coeficientes entre dos matrices consecutivas. Así lo indica Machado et al. [23].

Una vez que el defecto está bien diagnosticado, a aquellos pacientes definidos como dicromáticos se les podría solicitar la valoración de las dos técnicas de recoloreado que se han planteado en este trabajo.

De este modo tendríamos una verificación objetiva para conocer que técnica de recoloreado funciona mejor, y dado que una de ellas es parametrizable, serviría también para ajustar los parámetros de forma interactiva.



## A. GENÉTICA Y DEFICIENCIA DE LA VISIÓN EN COLOR

La incorrecta visión cromática generalmente es debida a problemas genéticos que provocan que este trastorno sea hereditario, transmitiéndose de padres a hijos. Los genes para los conos L y M se encuentran en el cromosoma X, mientras que los genes para los conos S están en un autosoma (cromosoma 7) [32].

Los cromosomas sexuales (cromosomas X y Y) presentan unos patrones hereditarios diferentes a los patrones de genes ubicados en autosomas (los cromosomas 1 a 22) [33].

Con carácter general la transmisión hereditaria puede ser dominante o recesiva. En las mutaciones dominantes, la enfermedad se manifiesta simplemente con una sola copia de la mutación. En las mutaciones recesivas, se necesitan dos copias mutadas para desarrollarla. Además, en función de que gen afectado sea el cromosoma X o un autosoma, se definen cuatro patrones básicos de transmisión hereditaria:

- Dominante ligado al cromosoma X
- Recesivo ligado al cromosoma X
- Autosómico dominante
- Autosómico recesivo

En la Tabla A.1 se recogen todas las deficiencias de visión en color junto con el modo de transmisión hereditaria y la frecuencia de cada una de ellas en la población mundial. En la Figura A.2 se representan los tres patrones de transmisión hereditaria asociados a la deficiencia de visión en color.

Dalton, ya en su día, solamente detectó problemas de visión similares al suyo en hombres, pero no en mujeres. Hoy se explica fácilmente que los problemas de visión los padecen los hombres y en muy poca medida las mujeres (siendo portadoras en muchos casos, pero sin sufrir la deficiencia de visión en color) si tenemos en cuenta el modo en que se transmiten los genes mutados de padres a hijos, ya que el más frecuente es de tipo recesivo ligado al cromosoma X.

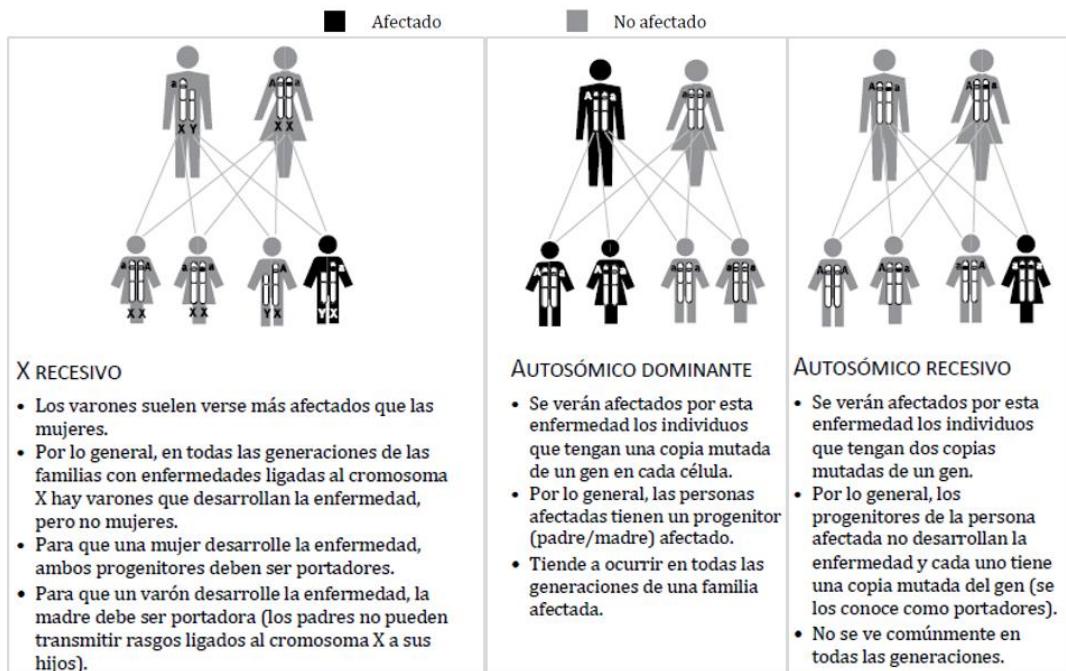
Deficiencia visión color	Frecuencia Hombre # Mujer	Herencia
Protanomalía	1/100 # 0.1/100	Recesivo ligado al cromosoma X
Deuteranomalía	6/100 # 0.4/100	Recesivo ligado al cromosoma X
Tritanomalía	0.1/100 # 0.1/100	Autosómico dominante
Protanopía	1,01/100	Recesivo ligado al cromosoma X
Deuteranopía	1,27/100	Recesivo ligado al cromosoma X
Tritanopía	1/500	Autosómico dominante
Monocromatismo de conos rojos	< 1/1x10 <sup>6</sup>	Recesivo ligado al cromosoma X
Monocromatismo de conos verdes	< 1/1x10 <sup>6</sup>	Recesivo ligado al cromosoma X
Monocromatismo de conos azules	1/100.000	Recesivo ligado al cromosoma X
Monocromatismo de bastones	1/33.000	Autosómico recesivo

**Tabla A.1. Tipos de deficiencias de visión en color, con sus correspondientes prevalencias y mecanismos de transmisión hereditaria [34].**

Los cromosomas X e Y son los cromosomas sexuales. Las mujeres tienen dos cromosomas X (XX), mientras que los hombres tienen un cromosoma X y un cromosoma Y (XY). En función de que el gen mutado se transmita de forma dominante o recesiva, dará lugar a que:

- Los hombres, como solo tienen un cromosoma X, cualquier gen mutado ligado al cromosoma X, ya sea dominante o recesivo, desarrollarán la enfermedad.
- Las mujeres, como tienen dos copias de los genes ligados al cromosoma X, se verán afectadas si heredan solamente uno de ellos mutado cuando la transmisión es

dominante. En cambio, para que desarrolle una enfermedad recesiva ligada al cromosoma X, ambas copias del gen deben haber mutado.



**Figura A.2. Patrones de transmisión hereditaria asociados a la visión en color [33].**

Una de las características más sorprendentes de la herencia ligada al cromosoma X es que el padre no puede transmitir a sus hijos varones los rasgos ligados al cromosoma X. Solamente pasa los cromosomas X a sus hijas (convirtiéndose siempre en portadoras) y los cromosomas Y a sus hijos. Por el contrario, las madres transmiten sus genes ligados al cromosoma X tanto a sus hijos como a sus hijas.

Además de la mutación genética y su transmisión hereditaria, existen otras causas que pueden provocar problemas de visión en color, como son:

- El envejecimiento. La capacidad para diferenciar los colores se deteriora lentamente a medida que se envejece.
- Enfermedades. Por ejemplo: diabetes, degeneración macular, glaucoma, ...
- Algunos medicamentos para tratar problemas nerviosos o psicológicos.
- La exposición a ciertas sustancias químicas, como sulfuro de carbono o fertilizantes.

## B. ESPACIOS DE COLOR RGB Y LMS: TRANSFORMACIONES Y SIMULACIÓN DEL DEFECTO DE VISIÓN EN COLOR

---

El espacio de color RGB se define en 1931 por la “Comission Internationale de l’Éclairage” (CIE). A partir de tres colores primarios Rojo (R), verde (G) y Azul (B), se puede formar cualquier otro por adicción de cada uno de ellos en diferentes proporciones.

Cada uno de estos tres primarios se define mediante 8 bits, por lo que tenemos una gama de tonalidad color comprendida entre [0-255], donde el valor 0 equivale a la ausencia de color primario y el valor 255 al color completamente saturado.

Como hemos indicado anteriormente, cualquier color se puede formar por adicción de estos tres primarios, obtenemos una gama de  $256^3$  colores diferentes, es decir una paleta de 16.77.216 colores diferentes.

Por lo tanto, se trata de un espacio tridimensional formado por tres ejes ortogonales R, G y B que gráficamente podemos representarlo como un cubo de colores.

El espacio de color LMS también es un espacio tridimensional, en el que los ejes ortogonales L, M y S representan la proporción de captura de los tres tipos de conos cuando se someten a un determinado estímulo de color.

Los vectores componentes L, M y S para cualquier estímulo de color se obtienen a partir de la distribución espectral de potencia del estímulo de color dado. Es decir, se asocian a tres funciones que dependen de la longitud de onda del espectro visible.

Tanto Jeong, como Melillo en sus respectivos artículos, se basan en el trabajo previo de Viénot, Brettel y Mollon “*Digital Video Colourmaps for Checking the Legibility of Displays by Dichromats*” [24] para realizar las transformaciones entre estos dos espacios de color, que a continuación se describen:

- Matriz ( $A$ ) de transformación de espacio de color RGB a LMS

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = (A) \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$
$$(A) = \begin{pmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.11935 \\ 3.45565 & 27.1554 & 3.86714 \\ 0.0299566 & 0.184309 & 1.46709 \end{pmatrix}$$

- Matriz ( $A^{-1}$ ) de transformación inversa. Transformación de espacio de color LMS a RGB.

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = (A^{-1}) \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}$$
$$(A^{-1}) = \begin{pmatrix} 0.080944 & -0.130504 & 0.116721 \\ -0.0102485 & 0.0540194 & -0.113615 \\ -0.000365294 & -0.00412163 & 0.693513 \end{pmatrix}$$

Como en el espacio LMS, la respuesta de los conos la expresamos matemáticamente mediante una función que depende de la longitud de onda del estímulo de color, resulta muy sencillo simular un defecto en uno de los tres tipos de conos, ya que una de las tres funciones de respuesta al estímulo se modifica (tricromáticos anómalos) o se anula (dicromáticos).

Por lo tanto, para simular cualquier defecto de visión de color, debemos pensar en los colores en términos de estimulaciones para los conos L, M y S en el ojo humano.

Una vez simulado el defecto, solamente habrá que hacer una conversión al espacio de color RGB deseado.

A continuación, se relacionan las matrices de simulación del defecto de visión ( $B$ ) en el espacio de color LMS que utilizan diferentes autores:

- Protanopía. Autor “Melillo” [22] y Viénot [24].

$$(B_p) = \begin{pmatrix} 0 & 2,02344 & -2,52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Deuteranopía. Autor “Melillo” [22].

$$(B_d) = \begin{pmatrix} 1.42319 & -0.88995 & 1.77557 \\ 0.67558 & -0.42203 & 2.82788 \\ 0.00267 & -0.00504 & 0.99914 \end{pmatrix}$$

- Deuteranopía. Autor “Viénot” [24].

$$(B_d) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.494207 & 0 & 1.24827 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Tritanopía. Autor “Melillo” [22].

$$(B_t) = \begin{pmatrix} 0.95451 & -0.04719 & 2.74872 \\ -0.00447 & 0.96543 & 0.88835 \\ -0.01251 & 0.07312 & -0.01161 \end{pmatrix}$$

## C. ESTUDIO DE PARÁMETROS DE RECOLOREADO

Se utilizarán para los tres defectos, con carácter general, las imágenes de prueba nº 1, 2 y 3 junto con la imagen “cherry”.

La “lámina de Ishihara” nº 16 es de uso exclusivo para protanopía y deuteranopía.

Las “Láminas HRR” son específicas para Tritanopía.

Los parámetros a seleccionar son: Nº de *clusters*, índice de Fuzzy,  $\alpha$  y  $\beta$ .

El nº de cluster a utilizar es independiente del resto de parámetros y del tipo de defecto, ya que solo influye sobre la definición de la imagen resultante.

A continuación, se presentan los resultados para seleccionar:

- Nº de *clusters*
- Índice de “fuzzyficación”.
- Parámetros de recoloreado para protanopía
- Parámetros de recoloreado para deuteranopía
- Parámetros de recoloreado para tritanopía

### NÚMERO DE CLUSTERS.

Se ha seleccionado la imagen “kid” con su recoloreado para deuteranopía, porque en ella se puede apreciar claramente el efecto del nº de clusters. Se han utilizado 8, 16, 32 y 64 clusters. Presentamos esta imagen junto con este defecto, porque exige recolorear amplias zonas que no percibe correctamente y que, a su vez, contienen una gran variedad cromática.

Ya hemos dicho que la elección del nº de *clusters* es independiente del resto de parámetros. En este caso, la imagen se ha recoloreado con  $\alpha = 0.45, \beta = 0.15$ ; *Indice fuzzy* = 1.1

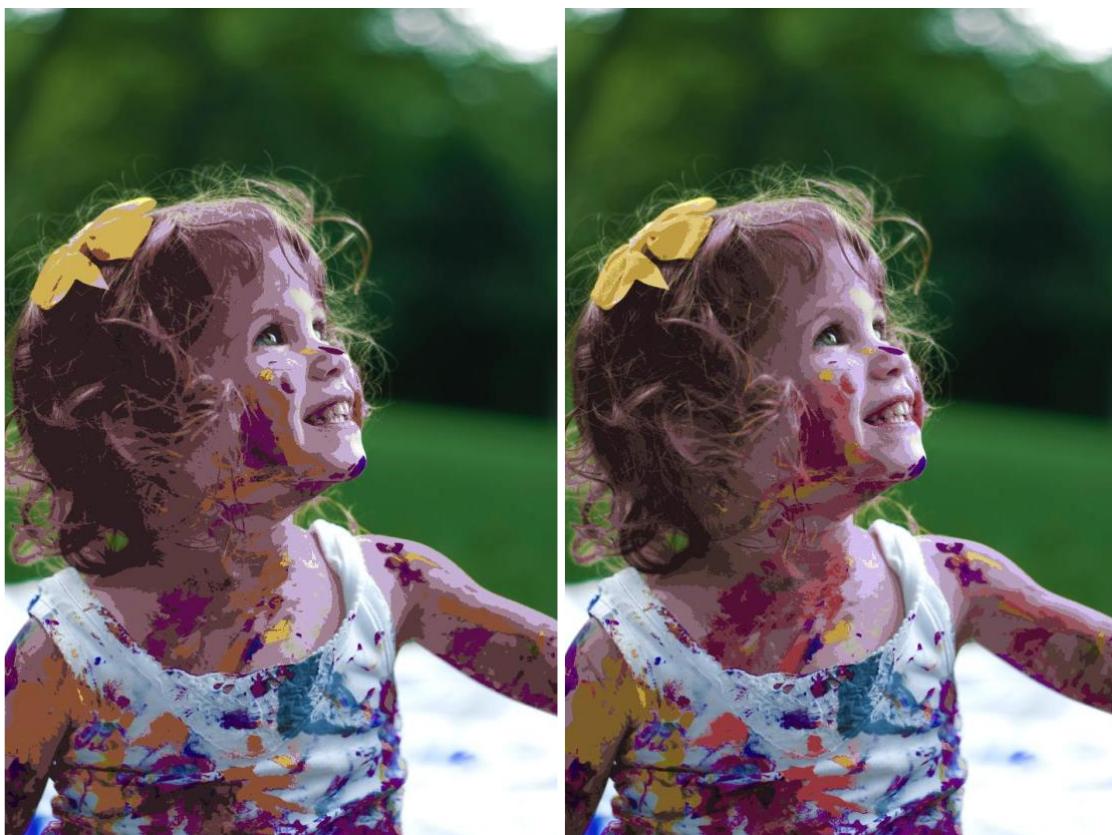
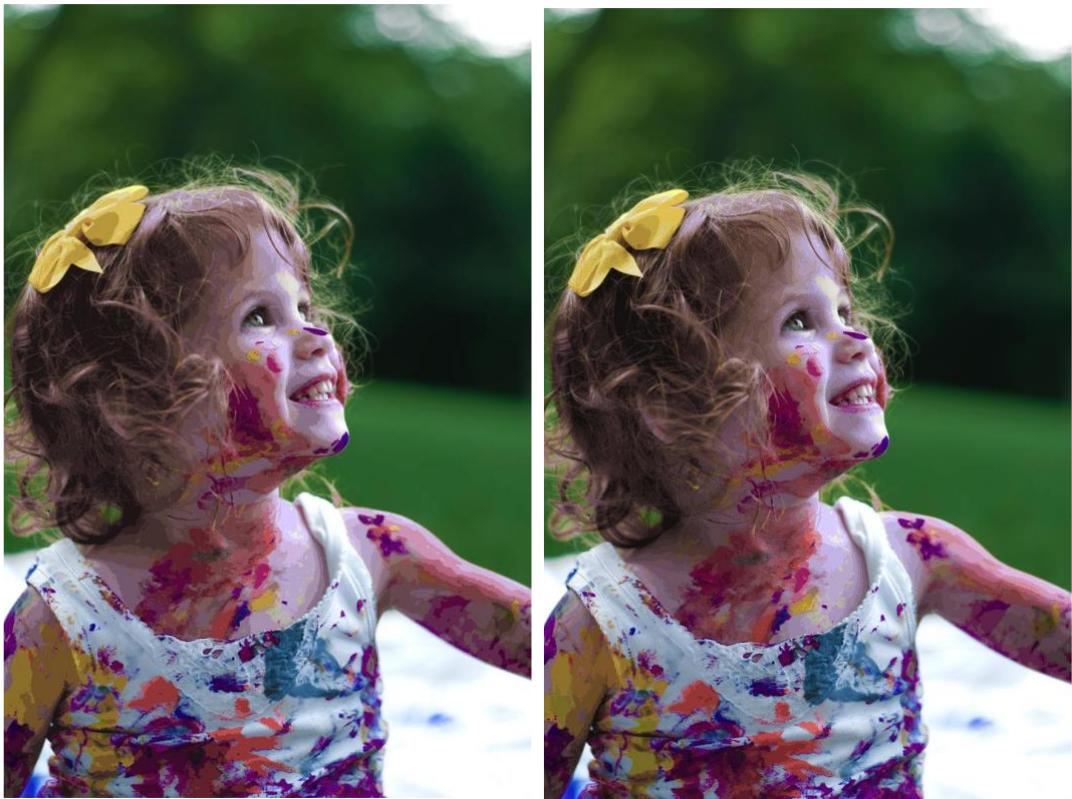


Figura C.3. Imagen “kid” recoloreada con 8 *clusters* (Izda.) y 16 *clusters* (Dcha.)



**Figura C.4. Imagen “kid” recoloreada con 32 clusters (Izda.) y 64 clusters (Dcha.)**

Es evidente que a mayor número de *clusters*, mayor calidad en la imagen resultante, pero al pasar de 32 a 64 *clusters* el tiempo de cálculo se eleva muchísimo, por lo que hemos optado por una solución de compromiso entre calidad y coste computacional, seleccionando 32 *clusters*.

#### INDICE DE FUZZYFICACION

El recoloreado de las imágenes se ha ensayado con valores de índices de “fuzzyficación”: 1.1, 2 y 3.

Recordamos que un valor de 1 indica que no hay solapamiento entre *clusters*, mientras que con un valor de 3 el solapamiento es considerable.

Esto se puede apreciar en el recoloreado de la imagen “cherry”. En la Figura C.5, se han utilizado para el recoloreado en protanopía los parámetros  $\alpha = 0.45, \beta = 0.15$ ; variando el índice Fuzzy.



**Figura C.5. Detalle imagen “cherry” recoloreada. (De Izda. a Drcha.). Índice fuzzy 1.1-2-3**

El protánope percibirá las cerezas del modo que se muestra en la Figura C.6:



**Figura C.6. Percepción del protánope. (De Izda. a Drcha.). Índice fuzzy 1.1-2-3**

La diferencia entre utilizar un índice entre 1.1 y 2 es prácticamente imperceptible. En cambio, el aumento hasta un valor igual a 3, nos permite apreciar que el hecho de que los *clústeres* tengan en común muchos puntos, genera centroides más similares. Esto disminuirá la gama de tonalidades (se aprecia en el recoloreado de las cerezas). Por este motivo, después de ensayar estos tres valores en la totalidad de imágenes de prueba y láminas, seleccionamos el valor 1.1.

No obstante, se podría haber seleccionado cualquier otro valor entre 1.1 y 2.

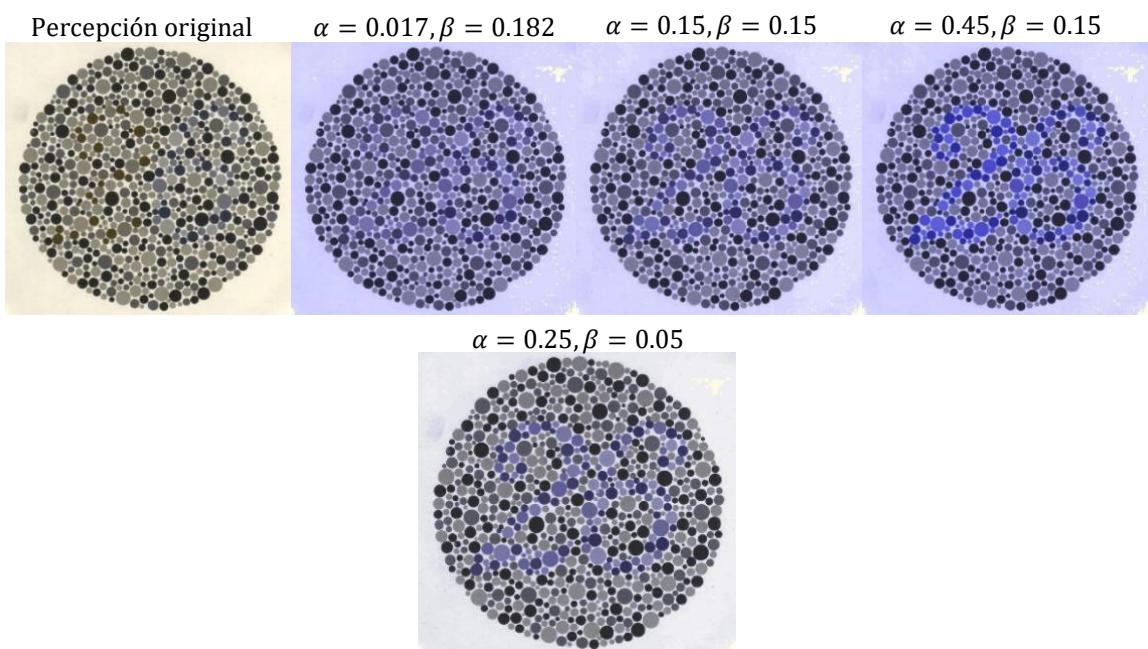
### **PARÁMETROS $\alpha$ Y $\beta$ .**

La selección de este par de parámetros dependerá del tipo de defecto de visión, ya que son los que realmente influyen en el recoloreado.

### **PROTANOPÍA**

En primer lugar, se prueban valores con las láminas de Ishihara.

Presentamos la percepción del protánope de la lámina de prueba, después de recoloreada. Debe ser capaz de visualizar el nº 26.



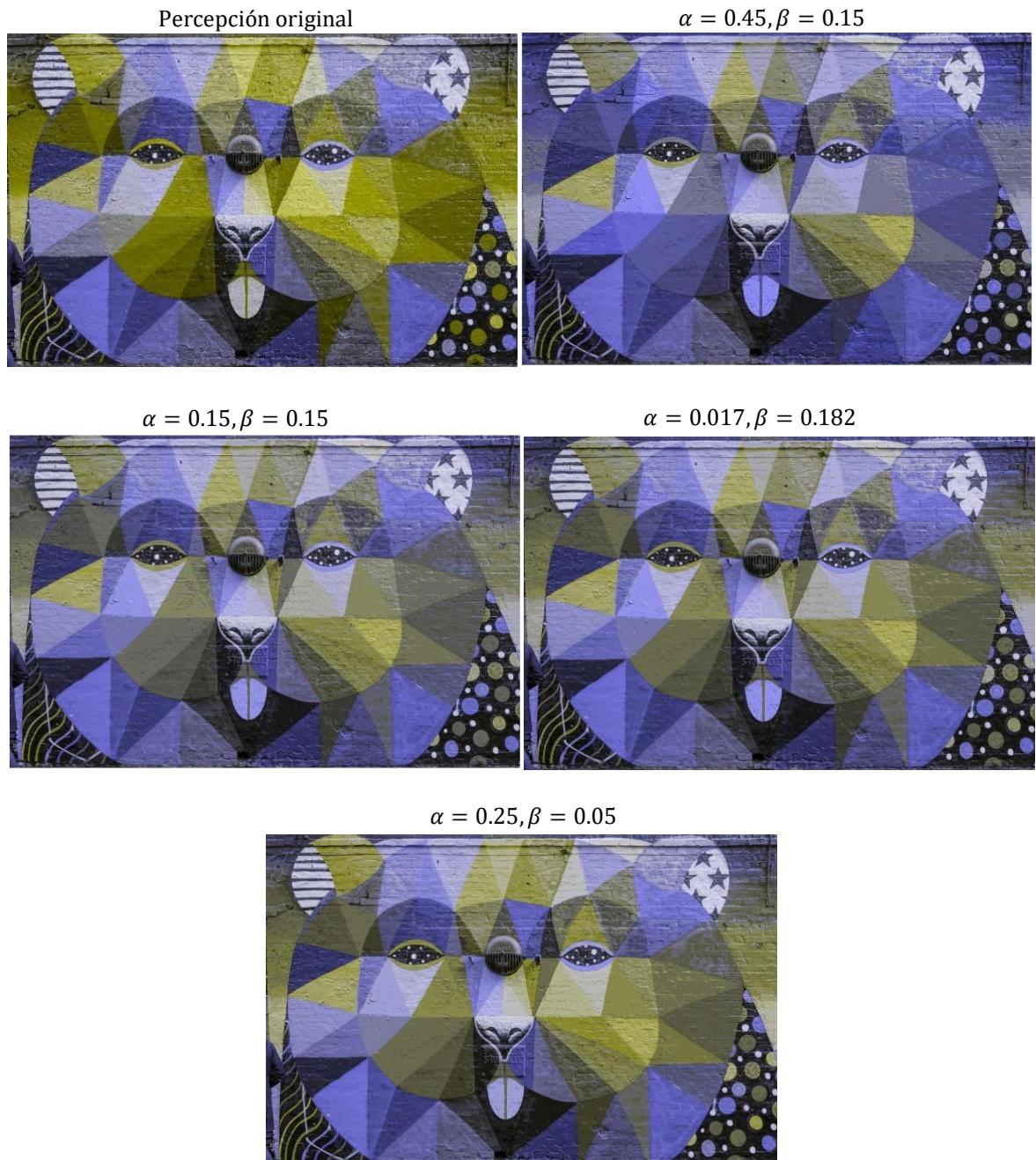
**Figura C.7. Percepción del protánope de la lámina de Ishihara con diferentes parámetros.**

Podríamos decir que el mejor recoloreado es el correspondiente a  $\alpha = 0.45, \beta = 0.15$ ; ya que es el que de forma más nítida permite visualizar el número 26.

Utilizar este recoloreado tan intenso tiene el inconveniente de trasladar la gama de colores que percibe el protánope hacia tonos demasiado azules.

Los parámetros que mejor lo consiguen son  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$ ; que dan color fundamentalmente a las componentes que no percibe bien y modifica muy poco al resto.

Se han ensayado los diferentes parámetros con todas las imágenes. Se puede apreciar lo comentado, en la imagen “*texturas*”.

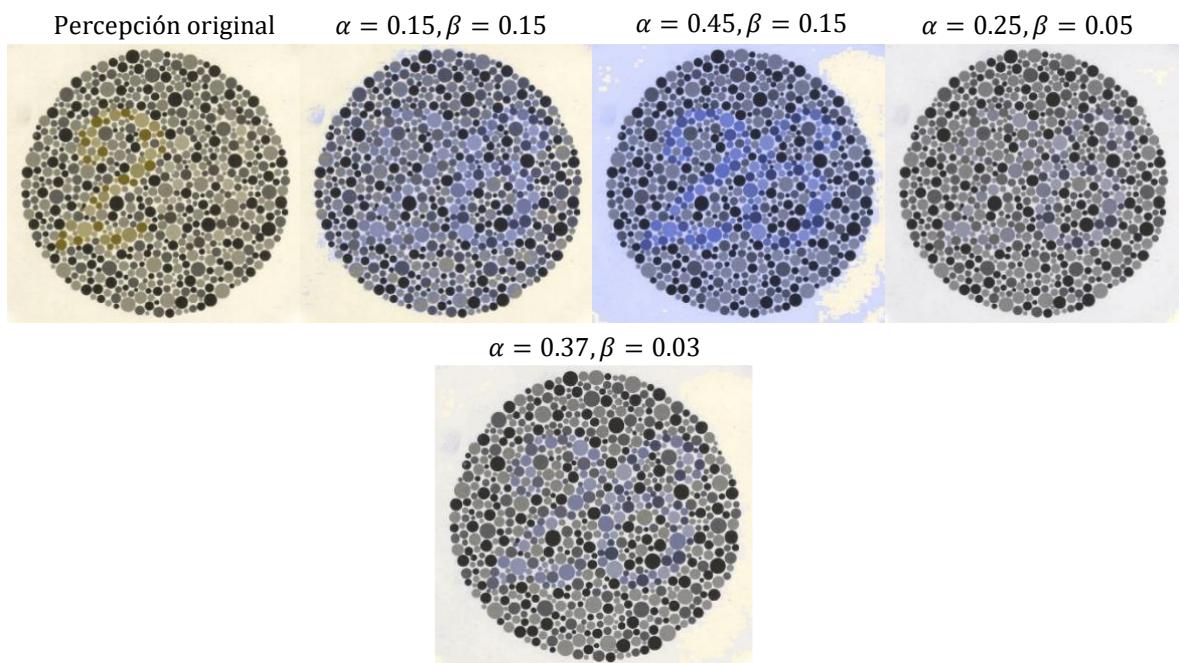


**Figura C.8. Percepción del protánope de la imagen “*texturas*” después del recoloreado con diferentes parámetros**

Por este motivo, se selecciona para protanopía  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$

## DEUTERANOPÍA

En este caso, descartamos utilizar  $\alpha = 0.017, \beta = 0.182$ . Jeong no contempla el algoritmo para este defecto. Además, el porcentaje de variación del ángulo que genera (18,2% -19,9%) está incluido dentro de los otros casos que ensayamos. Probamos con los otros 3 pares de parámetros anteriores. En primer lugar, con la lámina de Ishihara, en la que debemos percibir el número 26.



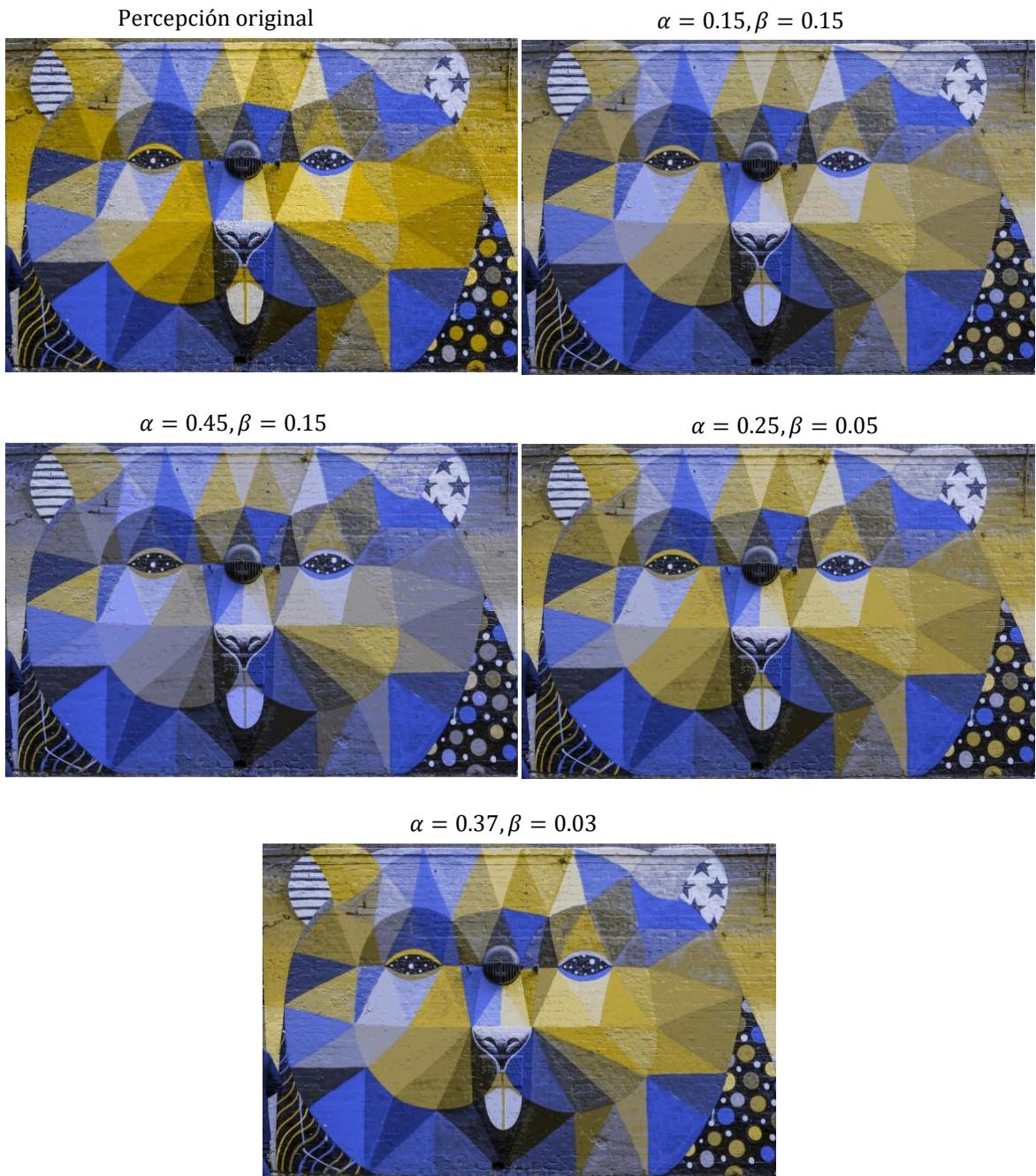
**Figura C.9. Percepción del deuterálope de la lámina de Ishihara con diferentes parámetros.**

En este caso, los parámetros  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$ , a duras penas permiten visualizar el nº 26. Ensayamos entonces con los parámetros  $\alpha = 0.37, \beta = 0.03$ , consiguiendo un resultado satisfactorio.

Ahora ensayamos con el resto de imágenes para comprobar que mejora y no desvirtúa la percepción inicial.

A continuación, se exponen algunos resultados que corroboran lo afirmado en el párrafo anterior.

La imagen más crítica, por presentar mayor mezcla y confusión de colores es la imagen "texturas". A continuación, se exponen los resultados:



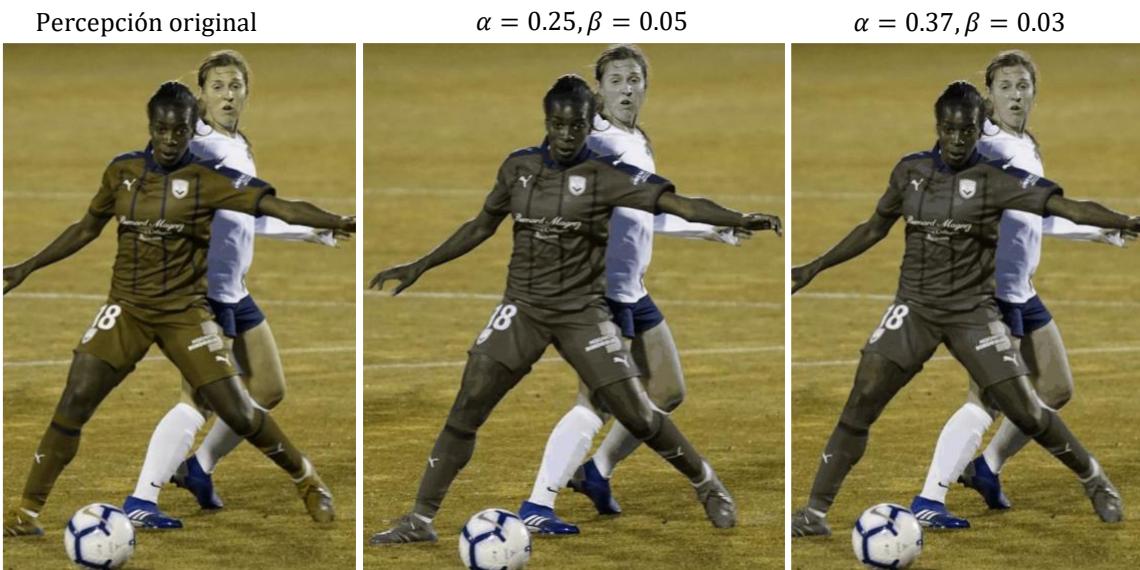
**Figura C.10. Percepción del deuteránope de la imagen “texturas” con diferentes parámetros**

En este caso la decisión está entre  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$  y  $\alpha = 0.37, \beta = 0.03$ . Veamos cómo influyen esos dos pares de parámetros en otras imágenes utilizadas.

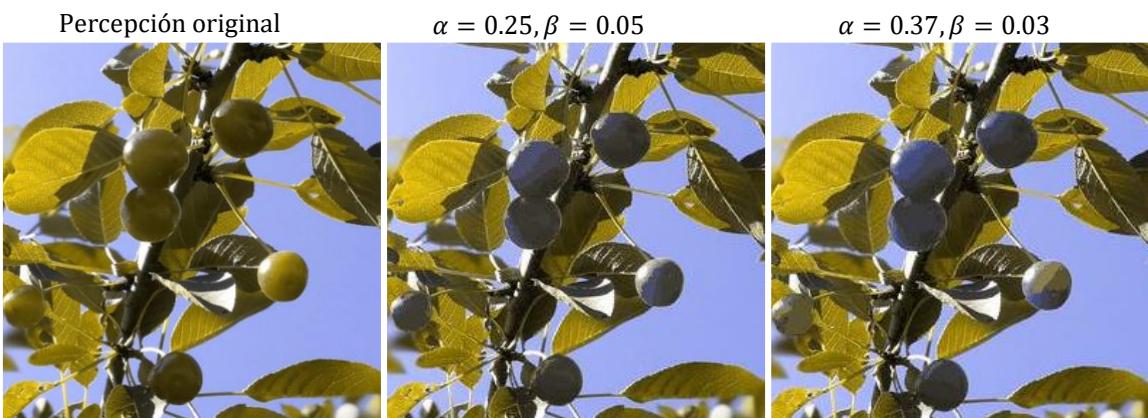
Se presentan los resultados con las imágenes “fútbol” y “cherry”.

De la imagen “fútbol”, se aporta un detalle ampliado, donde no se aprecia a simple vista diferencia alguna en el recoloreado, utilizando un par de parámetros o el otro.

De la imagen “cherry” se incluye el detalle ampliado del recoloreado de las cerezas. En esta imagen, la percepción con  $\alpha = 0.37, \beta = 0.03$  proporciona un poco más de intensidad de color a la percepción final de las cerezas.



**Figura C.11.** Percepción de deuteránope de la imagen “fútbol” con diferentes parámetros.



**Figura C.12.** Percepción del deuteránope de la imagen “cherry” con diferentes parámetros.

Se consigue que los colores rojizos que el deuteránope percibe como verdes, los vea ahora con tonos azulados, diferenciándolos perfectamente.

Nos decantamos por utilizar  $\alpha = 0.37, \beta = 0.03$  ya que consigue un mejor resultado con Ishihara y con “cherry”, mientras que es prácticamente idéntico aplicado al resto de imágenes.

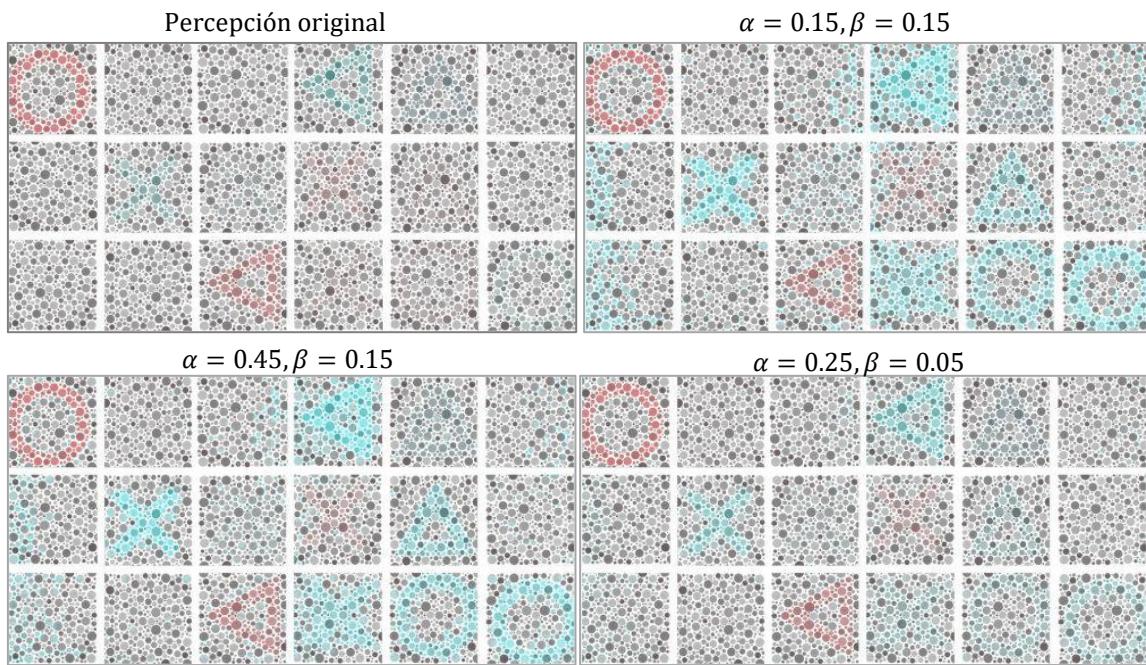
## TRITANOPÍA

Para este defecto se utilizan las láminas HRR. El recoloreado debe permitir la visualización de diferentes objetos en 6 láminas de un conjunto de 18, que inicialmente son transparentes al tritanope

En la Figura C.13, se aprecia que los 2 recoloreados más intensos, posibilitan la visión de los 6 objetos que inicialmente no percibía. Por el contrario, el recoloreado más suave dado por los parámetros  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$  permite intuir las formas levemente.

Se prueban estos parámetros con el resto de imágenes, presentándose aquellas que aportan información o diferencias en las que nos hemos basado para seleccionar unos parámetros u otros.

En la Figura C.14, se observa que la camiseta de la niña, que inicialmente la percibe de color blanco, se pasa a verla de color verdoso. Los parámetros  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$  son los que mantienen el tono blanco muy similar al inicial.

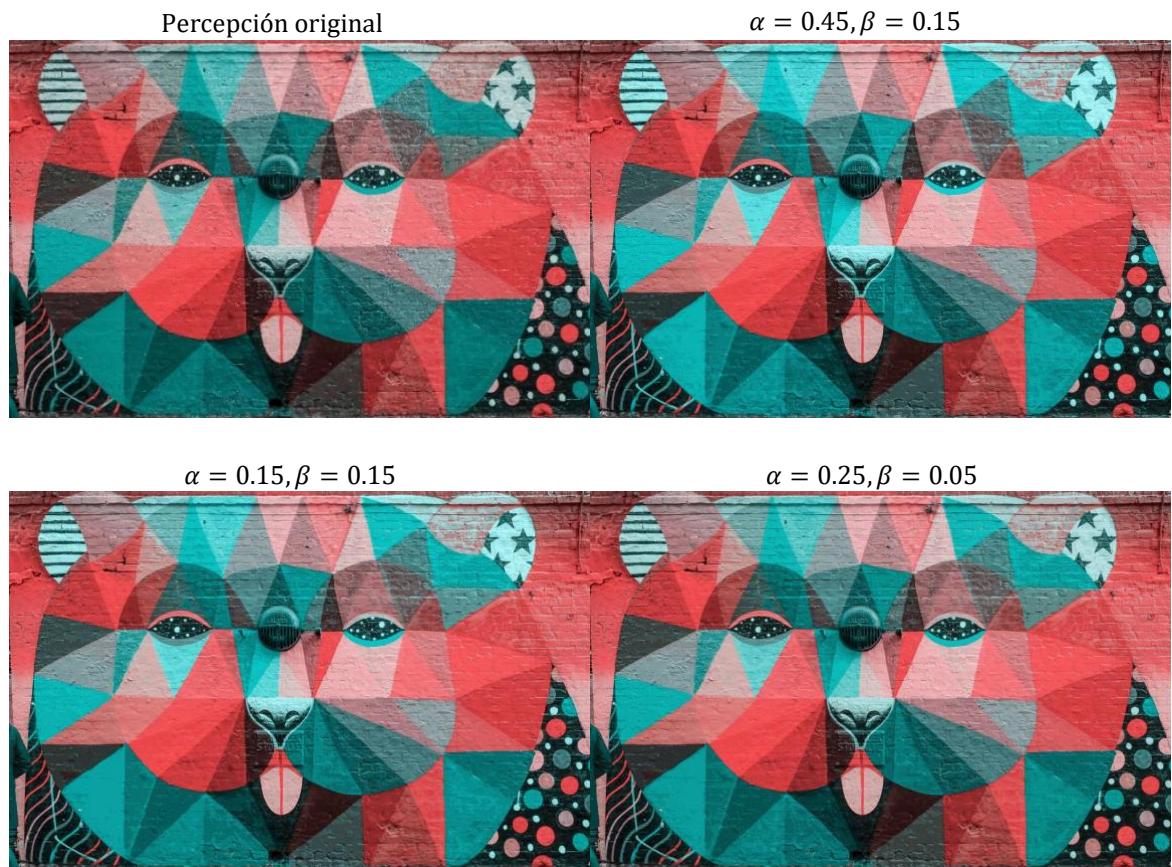


**Figura C.13.** Percepción del tritánope de las láminas HRR con diferentes parámetros.



**Figura C.14.** Percepción del tritánope de la imagen “kid” con diferentes parámetros.

Aplicados a la imagen “fútbol”, sucede lo mismo. La camiseta blanca de uno de los equipos se torna en un ligero verdoso, mayor cuanto más intenso es el recoloreado. Por último, en la Figura C.15, podemos ver cómo afecta a la imagen “texturas” la variación de parámetros.



**Figura C.15. Percepción del tritánope de la imagen “texturas” con diferentes parámetros.**

En este caso no se aprecian diferencias entre utilizar  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$  o bien  $\alpha = 0.15, \beta = 0.15$ .

Por lo tanto, preferimos seleccionar  $\alpha = 0.25, \beta = 0.05$  porque respeta mejor la reproducción cromática en las imágenes de prueba (mantiene el color blanco) aun cuando en las láminas HRR no consiga reproducir con claridad los símbolos.



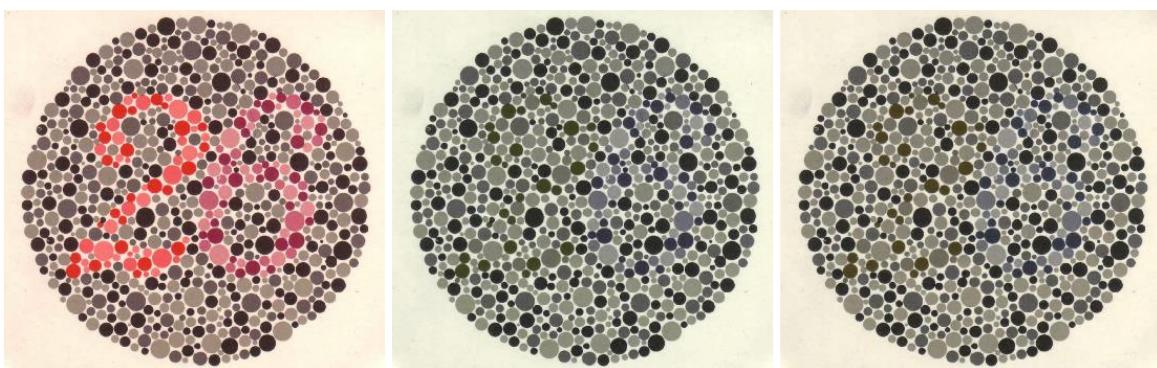
## D. RESULTADOS DEL ALGORITMO DE SIMULACIÓN

### SIMULACIÓN DE PROTANOPÍA

#### *Láminas Ishihara*

Para detectar los defectos de protanopía y deuteranopía, Ishihara tiene solamente 2 láminas. Son las láminas nº 16 y nº 17 de la referencia [1]. El resto de las láminas están pensadas para detectar anomalías tricromáticas, asociadas siempre al defecto rojo-verde. Se ha utilizado un recorte de la lámina nº 16 de la citada referencia, para comprobar la validez de las diferentes simulaciones.

La lámina indicada (Figura D.16) contiene en su interior el número 26. El protánope debe ver solamente el número 6.



**Figura D.16. (De Izda. a Dcha.) Lámina Ishihara original [1]. Simulación de Melillo. Simulación de Machado**

Con dificultad, se puede apreciar un 6. Esto puede deberse a que la imagen utilizada no posee la calidad adecuada.

#### *Imagen de prueba nº 1*

Se utiliza la imagen que denominamos “fútbol” [28], donde predomina el color rojo y verde.



**Figura D.17. Imagen original “fútbol” [28]**



**Figura D.18. Simulación imagen “fútbol”. (Izda.) Melillo. (Dcha.) Machado.**

Se aprecia diferente tonalidad en el color verde de la hierba. El resto es prácticamente igual.

#### ***Imagen de prueba nº 2***

Se utiliza una imagen con una amplia gama cromática, a la que denominamos “*texturas*” [29]



**Figura D.19. Imagen Original “texturas” [29]**



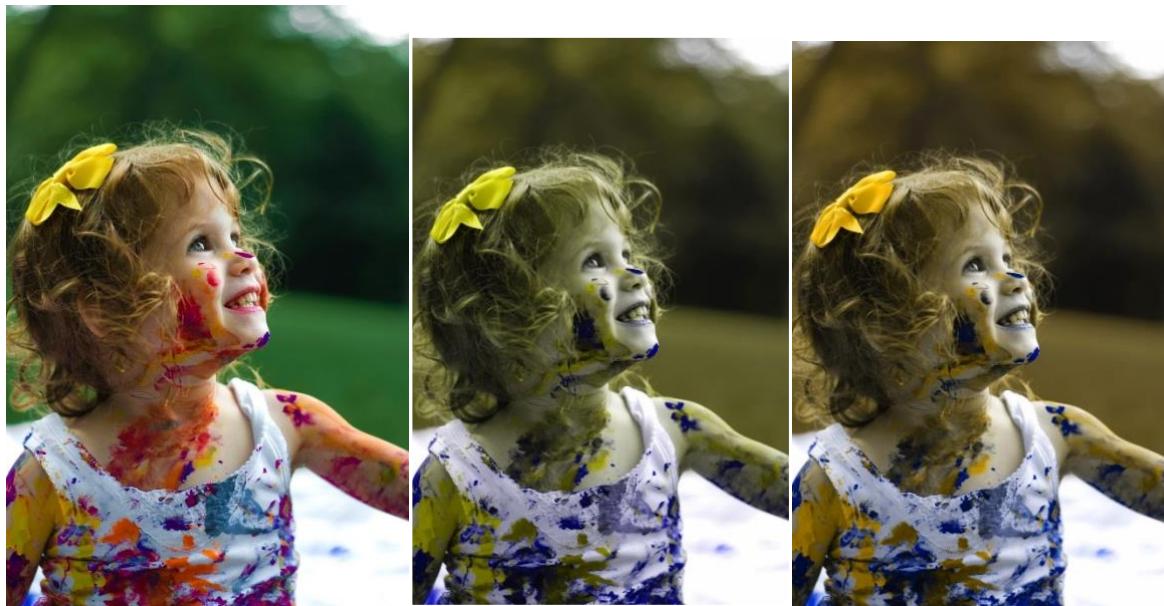
**Figura D.20. Simulación imagen “texturas”. (Izda.) Melillo. (Dcha.) Machado.**

Se aprecian diferentes tonalidades. Así, el azul es ligeramente más intenso en la simulación de Machado. Los tonos verdosos en la simulación de Melillo, se convierten en tonos

ligeramente ocres en la de Machado. No obstante, la visión de conjunto para un tricromático es muy parecida.

#### ***Imagen de prueba nº 3***

Se prueba con rostro humano, sobre un fondo verde. También contiene una gran variedad de colores. A esta imagen la denominamos “*kid*” [30].



**Figura D.21. (De Izda. a Dcha.) Imagen “*kid*” original [30]. Simulación Melillo. Simulación Machado.**

Destaca la diferente tonalidad que adquiere el lazo amarillo. Con Melillo adquiere un tono amarillo-verdoso y con Machado resulta un amarillo “encendido”.

#### ***Imagen “cherry”***

Realizamos la simulación de esta imagen ya que se utiliza como sustitución de la imagen “*fruits*” de Jeong, por ser de similares características y disponer de ella con mejor calidad.



**Figura D.22. Imagen original “*cherry*” [27]**



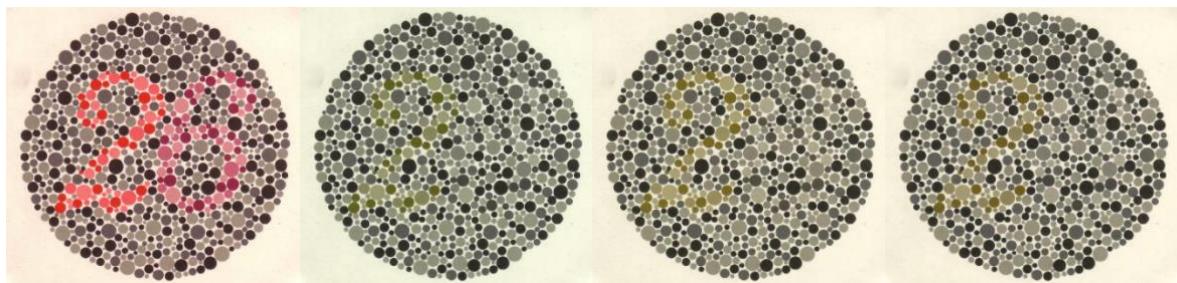
**Figura D.23. Simulación imagen “cherry”. (Izda.) Melillo. (Dcha.) Machado.**

La simulación de Melillo se diferencia de la Machado en la tonalidad del color verde de las hojas. Los tonos azules aparentemente son iguales.

## **SIMULACIÓN DE DEUTERANOPÍA**

### **Láminas de Ishihara**

Como ya se ha indicado, la lámina contiene el número 26. El deuteránope debe ver solamente el nº 2.



**Figura D.24. (De Izda. a Dcha.) Lámina Ishihara Original [1]. Simulación de Viénot. Simulación de Melillo. Simulación de Machado**

Aunque con cierta dificultad, se aprecia el nº 2. Esto puede deberse a que la imagen original utilizada no posee la calidad adecuada.

### **Imagen de prueba nº1.**



**Figura D.25. Simulación imagen “fútbol”. (De Izda. a Dcha.) Viénot, Melillo y Machado**

Se puede apreciar diferente tonalidad en el verde del césped. En conjunto, son muy parecidas.

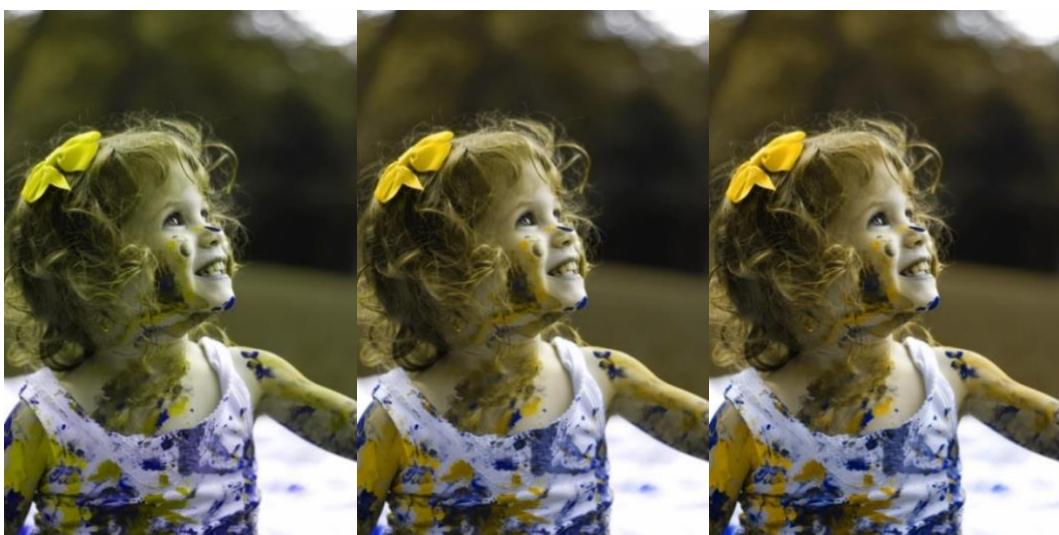
*Imagen de prueba nº 2.*



**Figura D.26. Simulación imagen “texturas”.** (De Izda. a Dcha.) Viénot, Melillo y Machado

Los tonos verdosos en la simulación de Viénot, parecen un poco más ocres en las otras dos simulaciones. Quizás, la simulación de Machado presenta unos tonos ligeramente más saturados.

*Imagen de prueba nº 3*



**Figura D.27. Simulación imagen “kid”.** (De Izda. a Dcha.) Viénot, Melillo y Machado.

Las diferencias son muy sutiles, apareciendo los tonos ligeramente más saturados en la simulación de Machado.

*Imagen “cherry”*



**Figura D.28. Simulación imagen “cherry”.** (Izda.) Melillo. (Dcha.) Machado.

No se aprecian diferencias entre ambas simulaciones.

## SIMULACIÓN DE TRITANOPÍA

Como las láminas de Ishihara solo son adecuadas para el defecto rojo-verde, utilizaremos en este caso, las láminas HRR (Hardy Rand and Rittler) en su 4a edición. En el artículo “*Comparison of the Richmond HRR 4th edition and Farnsworth–Munsell 100 Hue Test for quantitative assessment of tritan color deficiencies*” [31] se indica que estas láminas constituyen una alternativa efectiva para la evaluación de la tritanopía.

Del conjunto de 18 láminas que se muestran en la , seis no contienen ningún símbolo, seis contienen símbolos que desaparecerán a la vista del tritánope y otros seis que puede verlos debilitados. (Se indican los símbolos en las láminas que el tritánope dejará de percibir).

### Láminas HRR

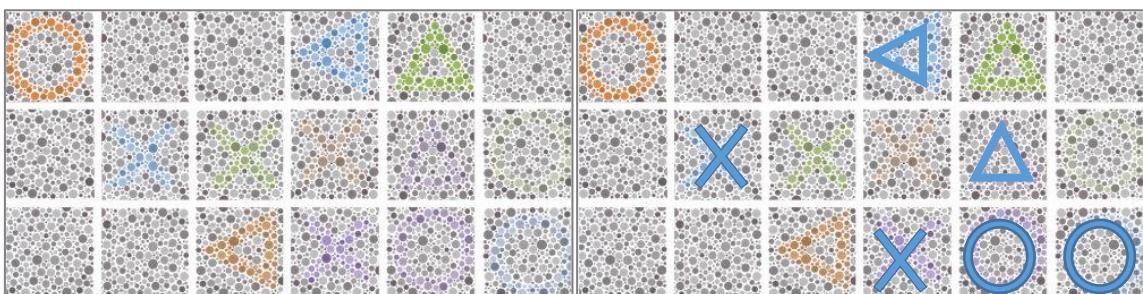


Figura D.29. (Izda.) Láminas HRR [31]. (Dcha.) Símbolos que el tritánope no debe percibir.

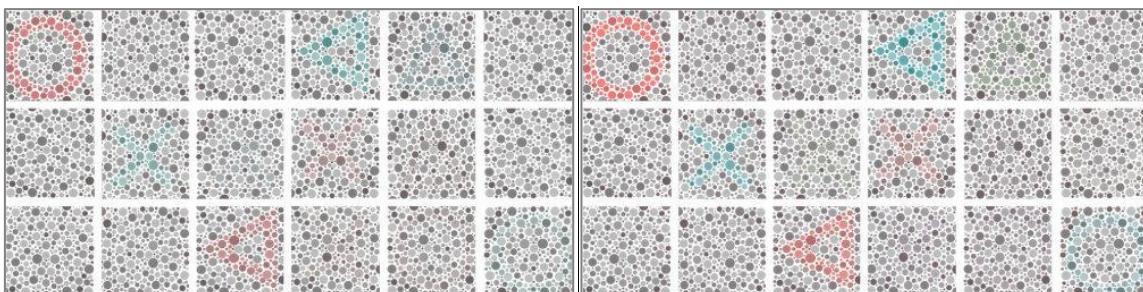


Figura D.30. Percepción de las láminas HRR según Melillo (Izda.) y según Machado (Dcha.)

No se ha podido disponer de una imagen de calidad. La simulación (Figura D.30) se ha efectuado a partir de un recorte de la imagen que aparece en el artículo [31]. Apenas se aprecian diferencias en las dos simulaciones (el tono de color es ligeramente más intenso en la simulación de Machado), comprobándose que la mayor parte de los símbolos desaparecen de la visión para una persona con el defecto de tritanopía, como se esperaba.

### *Imagen de prueba nº1*



**Figura D.31. Simulación imagen “fútbol”. Melillo (Izda.). Machado (Dcha.)**

La simulación de Machado proporciona al césped un tono algo más natural. En la imagen de Melillo parece un poco azulado. Hay diferencia significativa entre ellas.

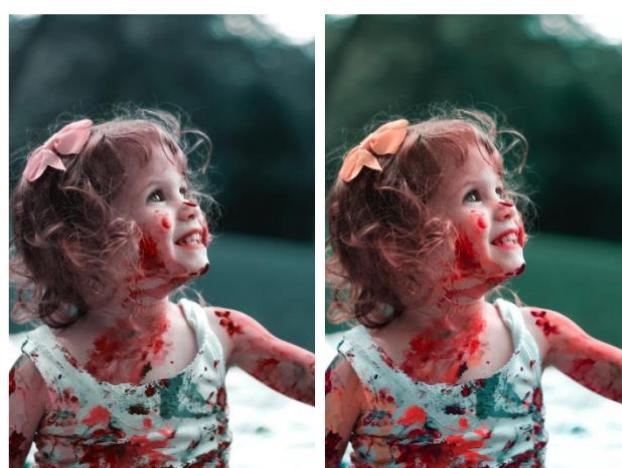
### *Imagen de prueba nº2*



**Figura D.32. Simulación imagen “texturas”. Melillo (Izda.). Machado (Dcha.)**

Los resultados son prácticamente iguales. La simulación de Machado presenta los tonos ligeramente más saturados.

### *Imagen de prueba nº 3*



**Figura D.33. Simulación imagen “kid”. Melillo (Izda.). Machado (Dcha.)**

El fondo en la simulación de Melillo es algo más plateado y el lazo (amarillo) presenta un ligero tono rojizo. La simulación de Machado se aproxima a la imagen original en estos dos detalles. El resto es muy similar.

Para la implementación del recoloreado en los diferentes algoritmos, nos hemos decidido por unificar, y utilizar la simulación de Melillo frente a la de Machado, para poder comparar resultados de los dos algoritmos de recoloreado, puesto que, el que utiliza transformaciones lineales, se basa en este autor.

#### ***Imagen “cherry”***



**Figura D.34. Simulación imagen “cherry”. (Izda.) Melillo. (Dcha.) Machado.**

Las diferencias de color entre ambas simulaciones son acusadas, al igual que se ha visto en otras imágenes, para este defecto.

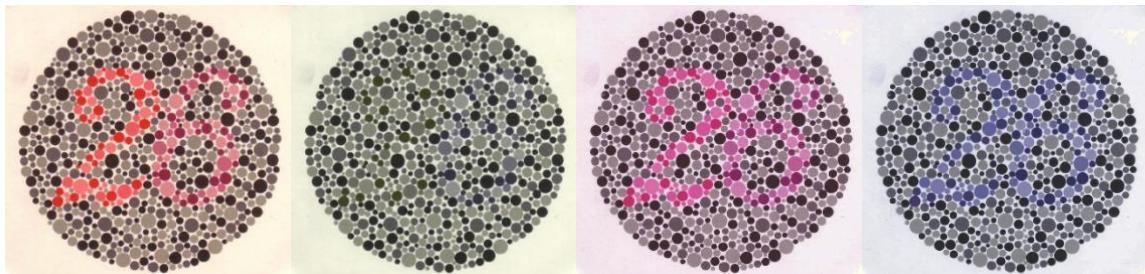
Se puede decir que para tritanopía, los resultados de la simulación de Melillo y Machado son los más diferentes entre sí.

## E. RESULTADOS DEL ALGORITMO DE RECOLOREADO MEDIANTE CLUSTERS FUZZY C-MEANS

### PROTANOPÍA.

#### *Láminas de Ishihara*

Recordamos, que el protánope solamente debe ver el número 6, y que si el recoloreado propuesto es efectivo será capaz leer el número 26.



**Figura E.35.** (De Izda. a Dcha.) Lámina Ishihara original [1]. Simulación lámina original. Lámina recoloreada. Simulación de la lámina recoloreada.

El algoritmo de recoloreado que hemos implementado es efectivo. El protánope puede leer perfectamente el número 26.

#### *Imagen de prueba nº 1*



**Figura E.36.** (Izda.) Imagen original “fútbol” [28] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

El recoloreado mejora la percepción. El equipamiento de color rojo lo percibe de color verde. Con el recoloreado pasa a percibirlo con cierta componente azul oscuro que contrasta con el verde del césped.

#### *Imagen de prueba nº 2.*



**Figura E.37. (Izda.) Imagen original “texturas” [29] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.**

En este caso, el recoloreado modifica muy sutilmente la percepción final. Refuerza ligeramente la percepción de tonos azules y algunos tonos verdosos los verá como grisáceos.

#### *Imagen de prueba nº3.*



**Figura E.38. (De Izda. a Dcha.) Imagen “kid” original [30]. Simulación imagen original. Imagen recoloreada. Simulación de la imagen recoloreada.**

El recoloreado hace que los tonos rojizos del fondo se tornen en tonos más verdosos, parecidos a los de la imagen original. Se aprecia también el efecto de hacer *clusters*, en la frente y en el cuello se pierde definición.

### *Imagen “cherry”*



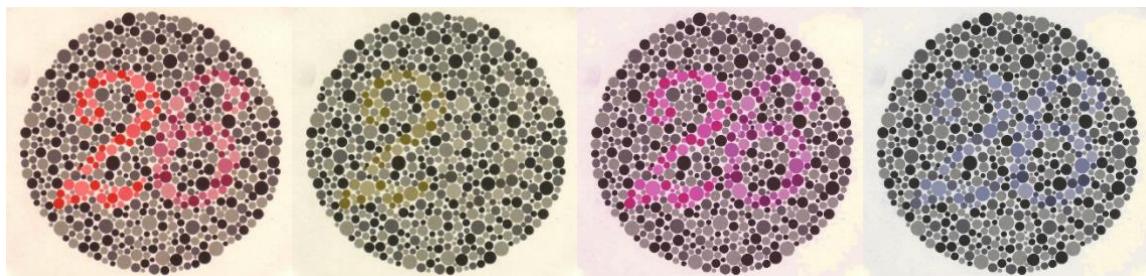
**Figura E.39.** (Izda.) Imagen original “cherry” [27] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

Se aprecia como el recoloreado consigue su objetivo. Las cerezas son percibidas con tonos verdosos y no se diferencian bien de las hojas en algunos casos. Ahora adquieren tonos azulados, diferenciándose perfectamente del fondo de la imagen.

## **DEUTERANOPÍA**

### *Láminas de Ishihara*

El deuteránope solamente debe ver el número 2. Si el recoloreado propuesto es efectivo será capaz leer el número 26.



**Figura E.40.** (De Izda. a Dcha.) Lámina Ishihara original [1]. Simulación lámina original. Lámina recoloreada. Simulación de la lámina recoloreada.

El recoloreado tiene éxito, se reconoce el número 26.

### *Imagen de prueba nº1*



**Figura E.41.** (Izda.) Imagen original “fútbol” [28] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

El equipamiento de color rojo lo percibe como en verde oliva. Después de aplicar el recoloreado la tonalidad parece un gris verdoso.

### *Imagen de prueba nº 2*



**Figura E.42.** (Izda.) Imagen original “texturas” [29] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

Al igual que en protanopía, el recoloreado produce leves modificaciones en la percepción final. Algunos tonos verdosos los percibirá más grisáceos después de colorear.

#### *Imagen de prueba nº 3*



**Figura E.43. (De Izda. a Dcha.) Imagen “kid” original [30]. Simulación imagen original. Imagen recoloreada. Simulación de la imagen recoloreada.**

Se puede apreciar como la percepción generalizada del rostro con aspecto verdoso desaparece, adquiriendo un tono más grisáceo. El efecto de los *clusters* hace que se pierda definición en la frente y cuello.

#### *Imagen “cherry”*

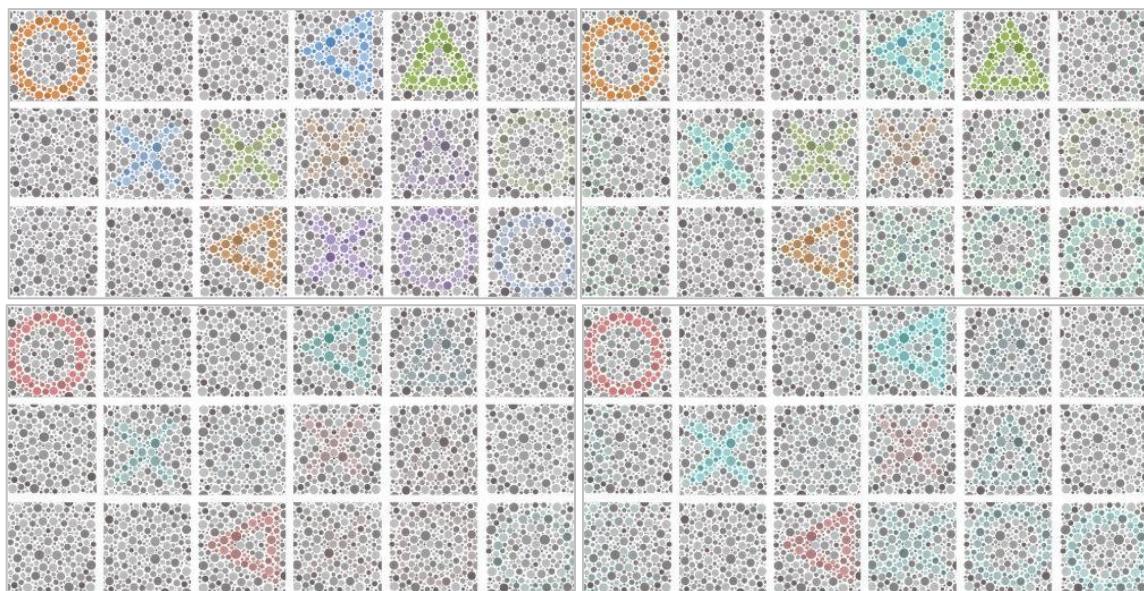


**Figura E.44. (Izda.) Imagen original “cherry” [27] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.**

El recoloreado consigue que las cerezas adquieran tonos azulados, diferenciándose bien del resto de elementos de la imagen.

## TRITANOPÍA

### Láminas HRR



**Figura E.45.** (Izda.) Láminas HRR originales [31] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

En la percepción del recoloreado, se pueden apreciar, aunque con cierta dificultad, los 6 símbolos que inicialmente no percibía. El recoloreado propuesto tiene éxito.

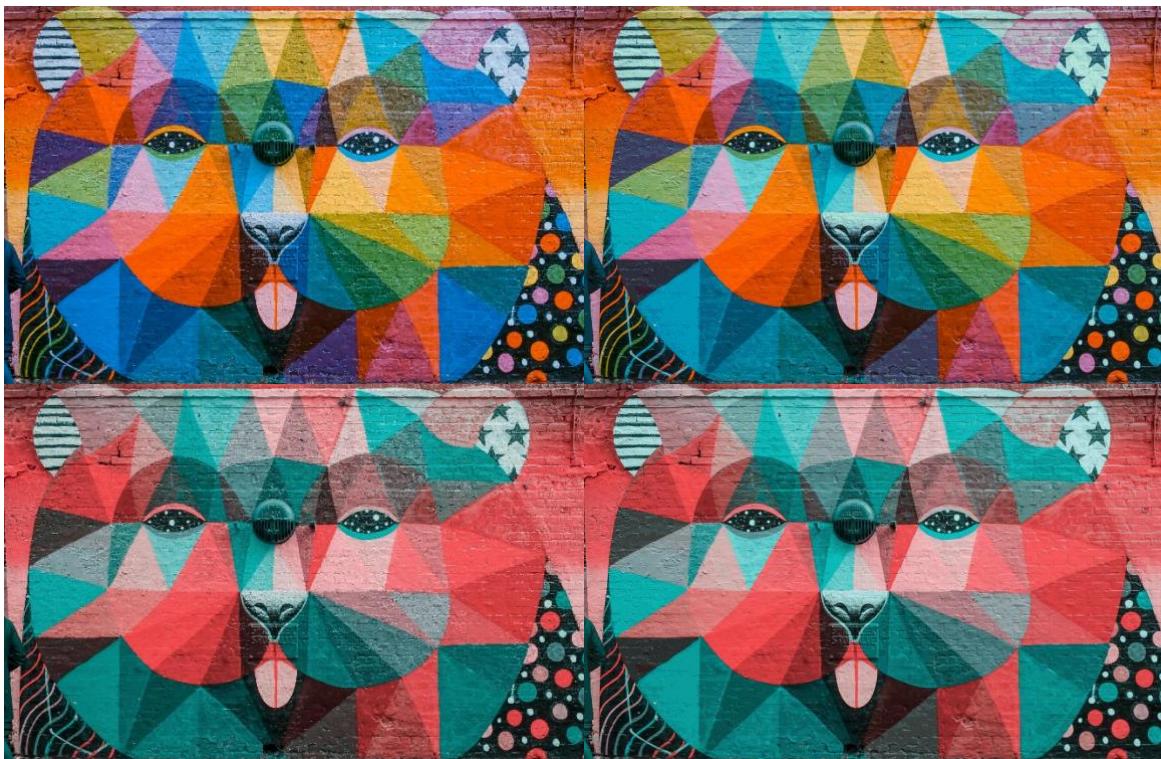
### Imagen de prueba nº1



**Figura E.46.** (Izda.) Imagen original “fútbol” [28] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

Salvo en la camiseta, que adquiere un leve tono verde, no se aprecian diferencias después de colorear la imagen.

**Imagen de prueba nº 2.**



**Figura E.47. (Izda.)** Imagen original “texturas” [29] y debajo su simulación. **(Dcha.)** Imagen recoloreada y debajo su simulación.

Las diferencias son casi imperceptibles para un tricromático.

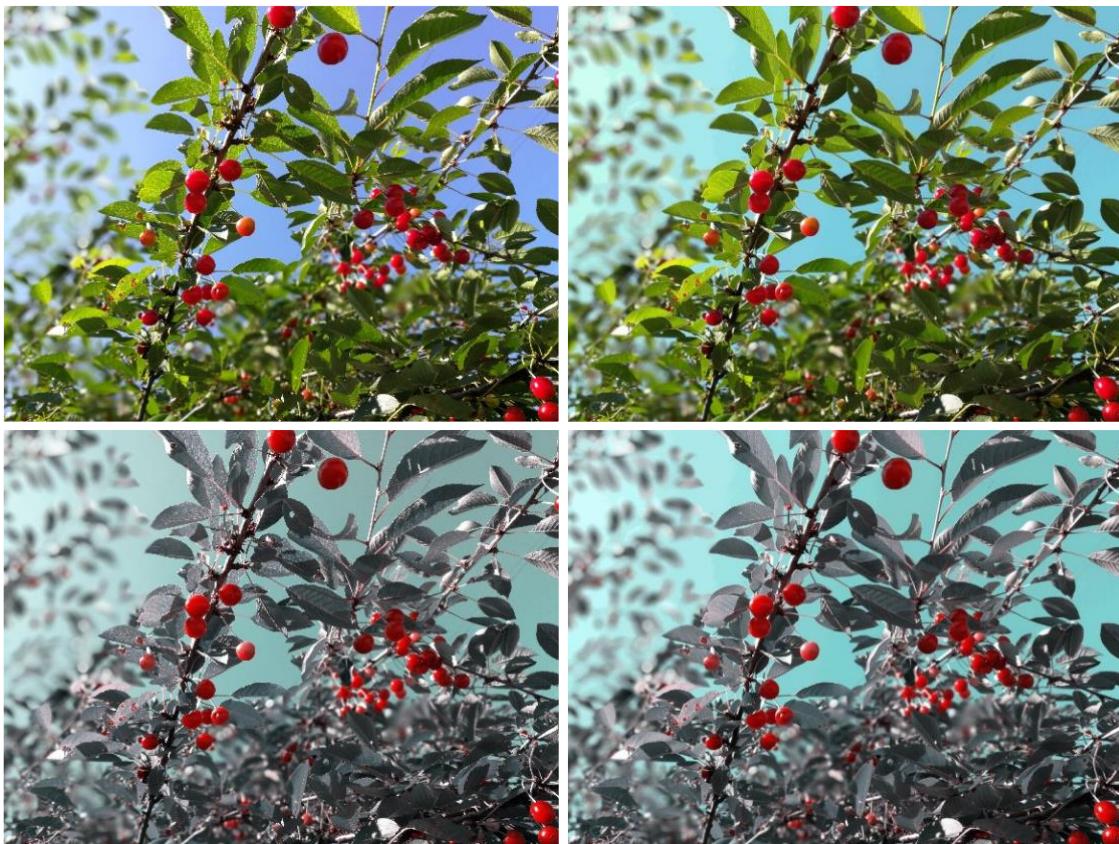
**Imagen de prueba nº 3**



**Figura E.48. (De Izda. a Dcha.)** Imagen “kid” original [30]. Simulación imagen original. Imagen recoloreada. Simulación de la imagen recoloreada.

De nuevo, las diferencias son casi imperceptibles para un tricromático.

*Imagen “cherry”*



**Figura E.49.** (Izda.) Imagen original “cherry” [27] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

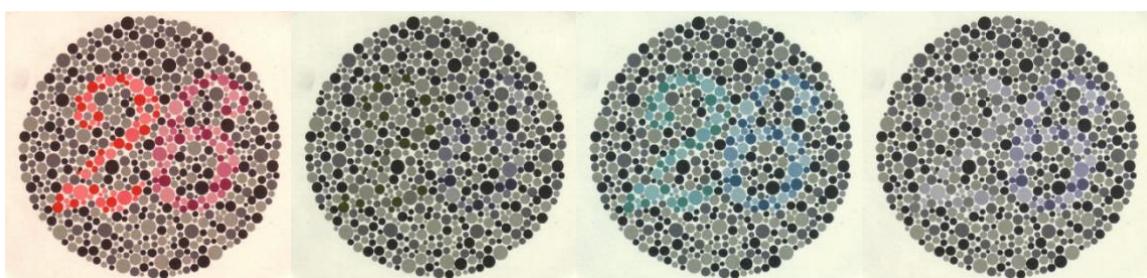
Aparentemente, el recoloreado consigue una leve mejora en la percepción. Mejora el contraste entre el cielo y las hojas, aunque la gama cromática varía muy poco.

## F. RESULTADOS DEL ALGORITMO DE RECOLOREADO MEDIANTE TRANSFORMACIONES LINEALES

### PROTANOPÍA

#### *Láminas de Ishihara*

Si el recoloreado es efectivo, el protánope pasará de ver el nº 6 a poder distinguir el número 26.



**Figura F.50.** (De Izda. a Dcha.) Lámina Ishihara original [1]. Simulación lámina original. Lámina recoloreada. Simulación de la lámina recoloreada.

El recoloreado es satisfactorio. Se puede leer el número 26.

#### *Imagen de prueba nº1.*



**Figura F.51.** (Izda.) Imagen original “fútbol” [28] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

La vestimenta que inicialmente percibe de color verde oscuro, pasa a verla con un tono grisáceo.

**Imagen de prueba nº 2.**



**Figura F.52. (Izda.) Imagen original “texturas” [29] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.**

Después de colorear, se aprecian los tonos azules con mayor intensidad, mientras que en los tonos verdosos se aprecia el efecto contrario.

**Imagen de prueba nº 3.**



**Figura F.53. (De Izda. a Dcha.) Imagen “kid” original [30]. Simulación imagen original. Imagen recoloreada. Simulación de la imagen recoloreada.**

El coloreado de la imagen produce un rostro más pálido y la percepción menos intensa de las manchas azules.

### *Imagen “cherry”*

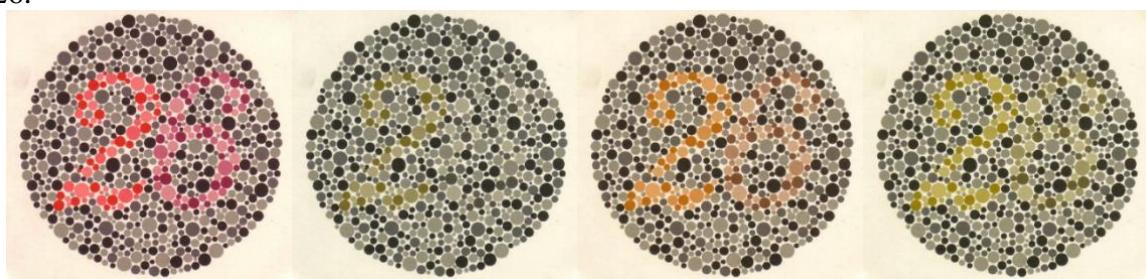


**Figura F.54.** (De Izda. a Dcha.) Imagen original “cherry” [27] y debajo su percepción por el protánope. Imagen recoloreada y debajo su percepción.

## **DEUTERANOPÍA**

### *Láminas de Ishihara*

Si el recoloreado es efectivo, el deuteránope pasará de ver el nº 2 a poder distinguir el número 26.



**Figura F.55.** (De Izda. a Dcha.) Lámina Ishihara original [1]. Simulación lámina original. Lámina recoloreada. Simulación de la lámina recoloreada.

El recoloreado es satisfactorio. Permite leer el nº 26.

*Imagen de prueba nº 1.*



**Figura F.56.** (Izda.) Imagen original “fútbol” [28] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

La vestimenta, vista de color verde oscuro ahora la ve de un verde más claro.

*Imagen de prueba nº 2*



**Figura F.57.** (Izda.) Imagen original “texturas” [29] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

Prácticamente no se aprecian diferencias. Quizás un tono ligeramente más intenso en la percepción de la imagen recoloreada.

*Imagen de prueba nº 3*



**Figura F.58. (De Izda. a Dcha.) Imagen “kid” original [30]. Simulación imagen original. Imagen recoloreada. Simulación de la imagen recoloreada.**

El recoloreado consigue que las manchas de pintura se perciban en conjunto con un tono verde más claro.

*Imagen “cherry”*

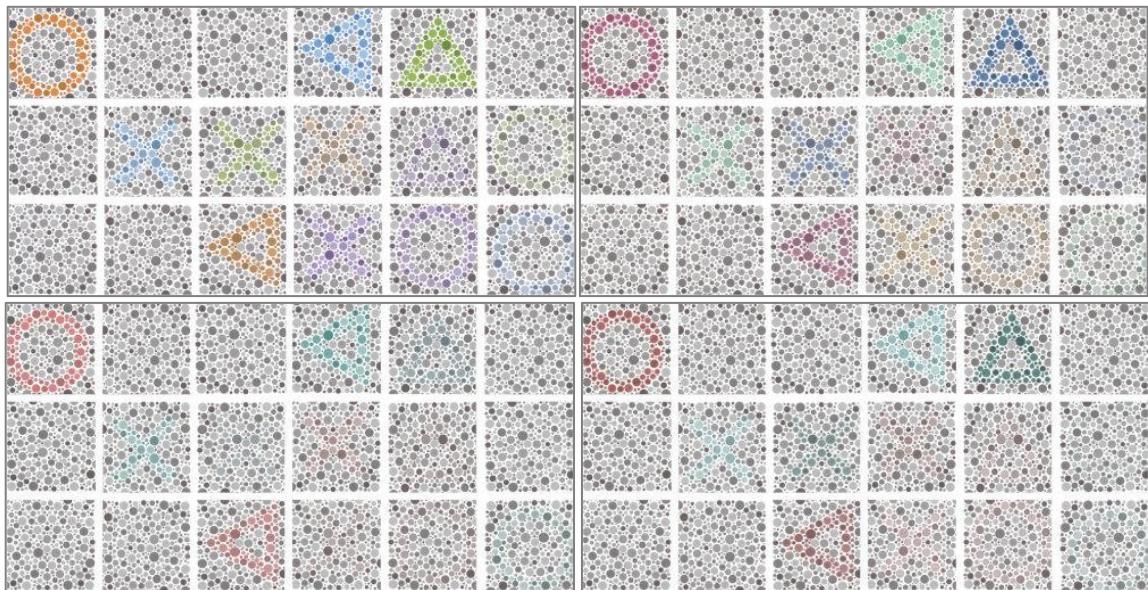


**Figura F.59. (De Izda. a Dcha.) Imagen original “cherry” [27] y debajo su percepción por el deutérano. Imagen recoloreada y debajo su percepción**

En este caso no se consigue el objetivo propuesto, ya que la percepción antes y después del recoloreado es muy parecida.

## TRITANOPÍA

### Láminas HRR



**Figura F.60.** (Izda.) Láminas HRR originales [31] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

El recoloreado propuesto por Melillo no es efectivo para que el tritánope consiga percibir los 6 símbolos, hecho que si se consigue con nuestro algoritmo (basado en Jeong).

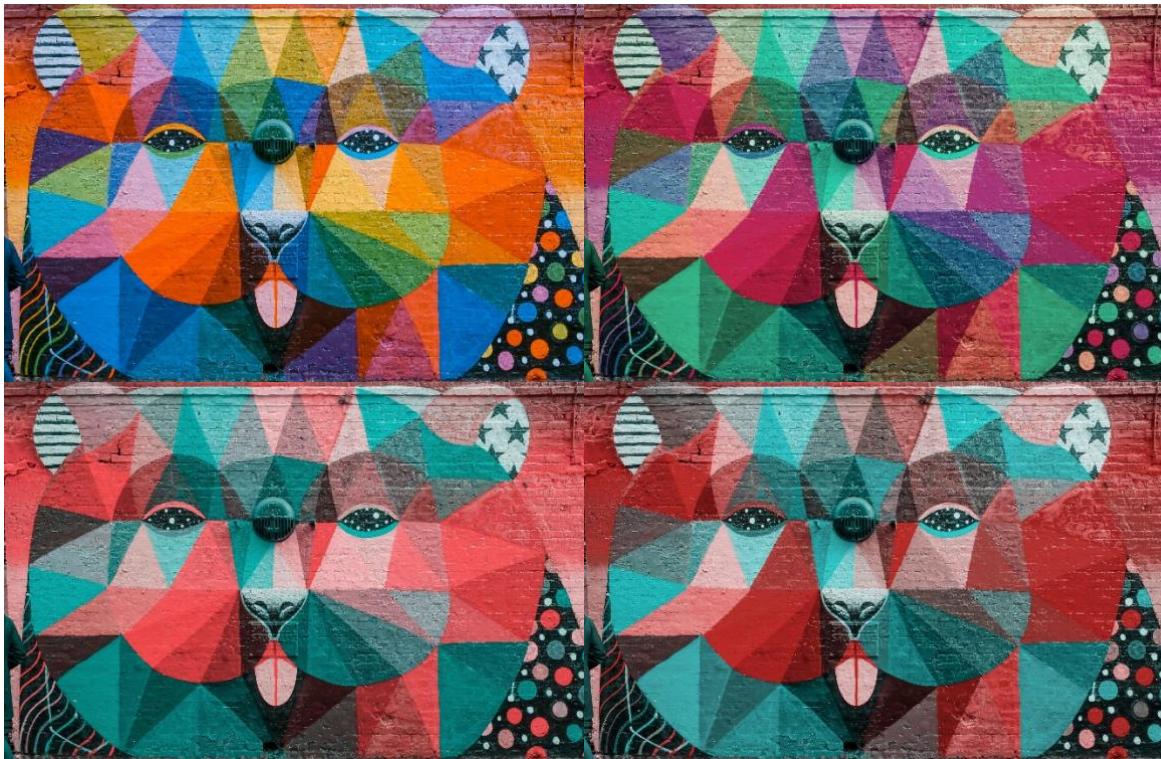
### Imagen de prueba nº 1



**Figura F.61.** (Izda.) Imagen original “fútbol” [28] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

La imagen recoloreada pierde naturalidad (el césped se colorea de azul). Este cambio brusco, si mejora la percepción del césped, que se aprecia con cierta componente verdosa.

#### *Imagen de prueba nº 2*



**Figura F.62.** (Izda.) Imagen original “*texturas*” [29] y debajo su simulación. (Dcha.) Imagen recoloreada y debajo su simulación.

El recoloreado consigue que la gama de rojizos se perciba ahora con tonos más saturados. Estos tonos se diferencian peor que en la imagen inicial.

#### *Imagen de prueba nº 3*



**Figura F.63.** (De Izda. a Dcha.) Imagen “*kid*” original [30]. Simulación imagen original. Imagen recoloreada. Simulación de la imagen recoloreada.

El recoloreado produce una percepción de tonos más pardos. El lazo pierde colorido y las manchas de pintura no se diferencian bien. Parecen empastadas.

*Imagen “Cherry”*



**Figura F.64. (De Izda. a Dcha.) Imagen original “cherry” [27] y debajo su percepción por el tritánope. Imagen recoloreada y debajo su percepción**

En este caso, se consigue el objetivo. Tanto las hojas como el cielo se perciben de forma más natural que antes de colorear.

## G.COMPARATIVA DE AMBOS RECOLOREADOS

A continuación se representa la “imagen diferencia”, entre la percepción original y la percepción recoloreada, con los dos algoritmos implementados, para el conjunto de imágenes utilizadas y sus correspondientes defectos.

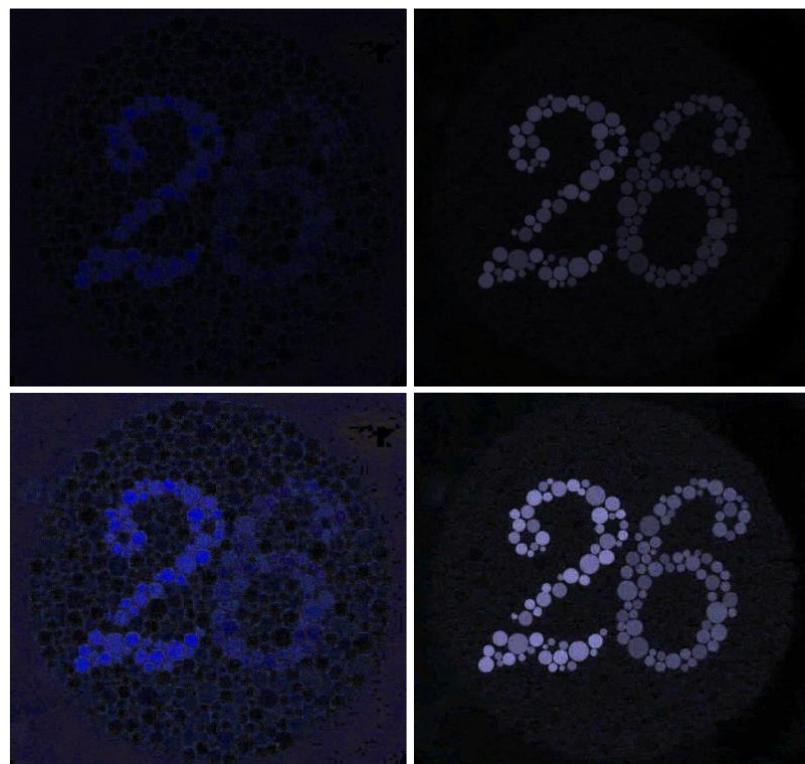
Al presentarlas de forma conjunta, por pares, se obtiene una idea más fidedigna sobre la aportación que el recoloreado introduce en la visión de estos sujetos. Es decir, se puede apreciar en qué píxeles incide cada uno de ellos y con qué intensidad.

Las componentes superiores de las figuras indican el valor absoluto RGB de la diferencia de percepciones. Cómo ese valor suele ser muy pequeño, se han multiplicado las tres componentes RGB por un mismo coeficiente para poder apreciar donde se aplica el recoloreado con mayor intensidad. Las dos componentes inferiores de las figuras están afectadas por el citado coeficiente:

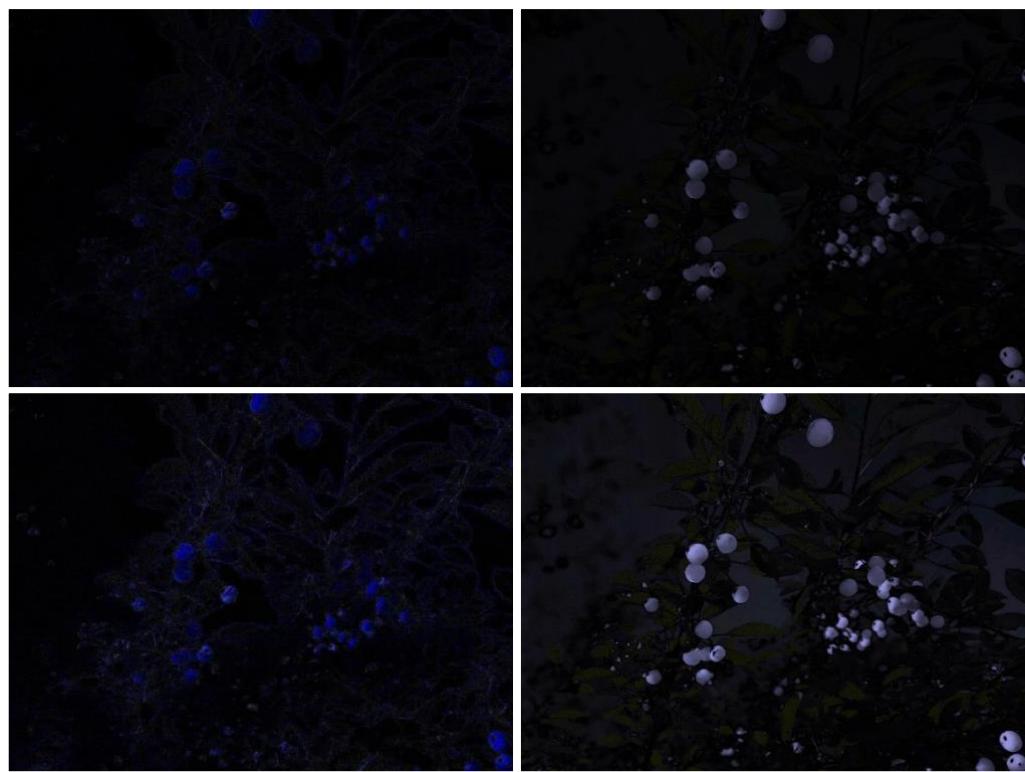
$$coef = \frac{255}{\text{valor máx. } R, G, B \mid \text{img. diferencia} \mid}$$

### PROTANOPÍA

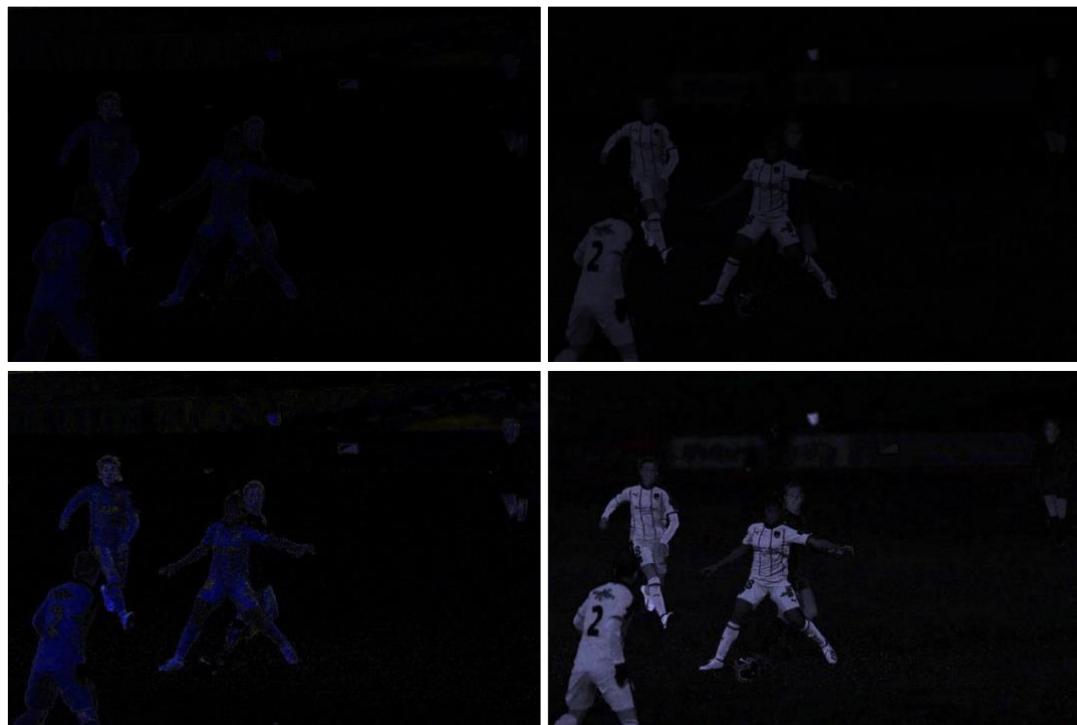
Se muestran los resultados para la lámina de Ishihara, imagen “cherry” y las tres imágenes de prueba. Las láminas superiores muestran la intensidad real que aporta el recoloreado a la visión del protánope, mientras que las láminas inferiores están afectadas por el coeficiente multiplicador para apreciar mejor sobre qué píxeles actúa.



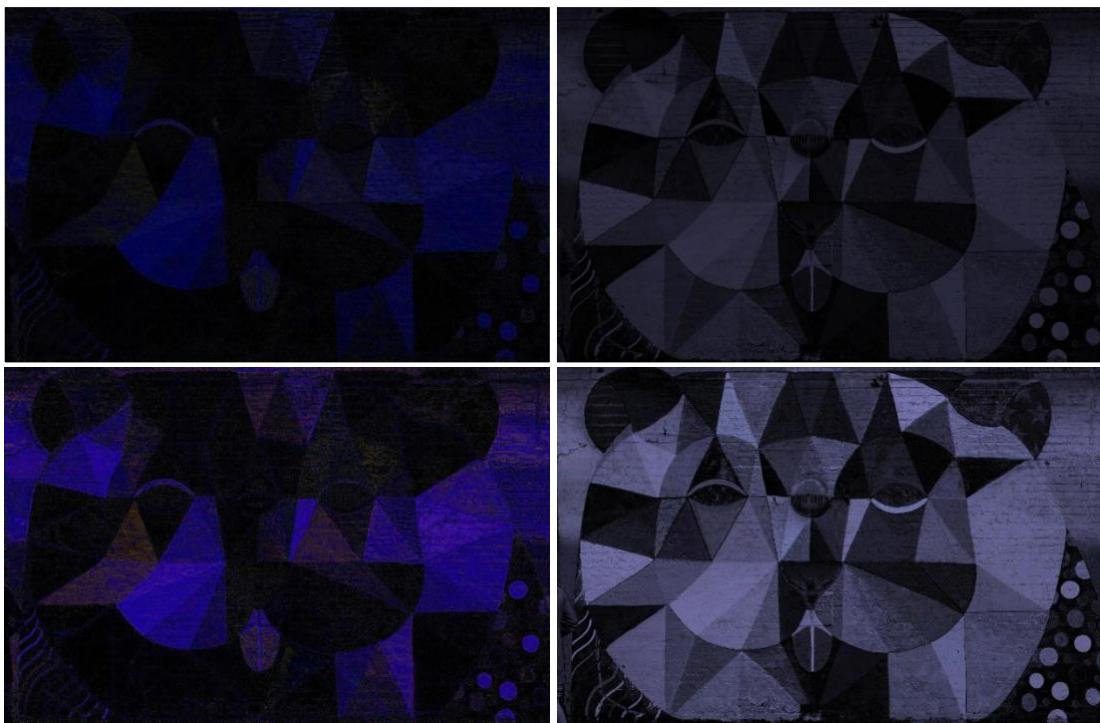
**Figura G.65.** Aportación del recoloreado a la visión del protánope para lámina de Ishihara.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)



**Figura G.66. Aportación del recoloreado a la visión del protánope para la imagen “cherry”.**  
**Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)**



**Figura G.67. Aportación del recoloreado a la visión del protánope para la imagen “fútbol”.**  
**Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)**



**Figura G.68.** Aportación del recoloreado a la visión del protánope para la imagen “*texturas*”.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)



**Figura G.69.** Aportación del recoloreado a la visión del protánope para la imagen “*kid*”.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)

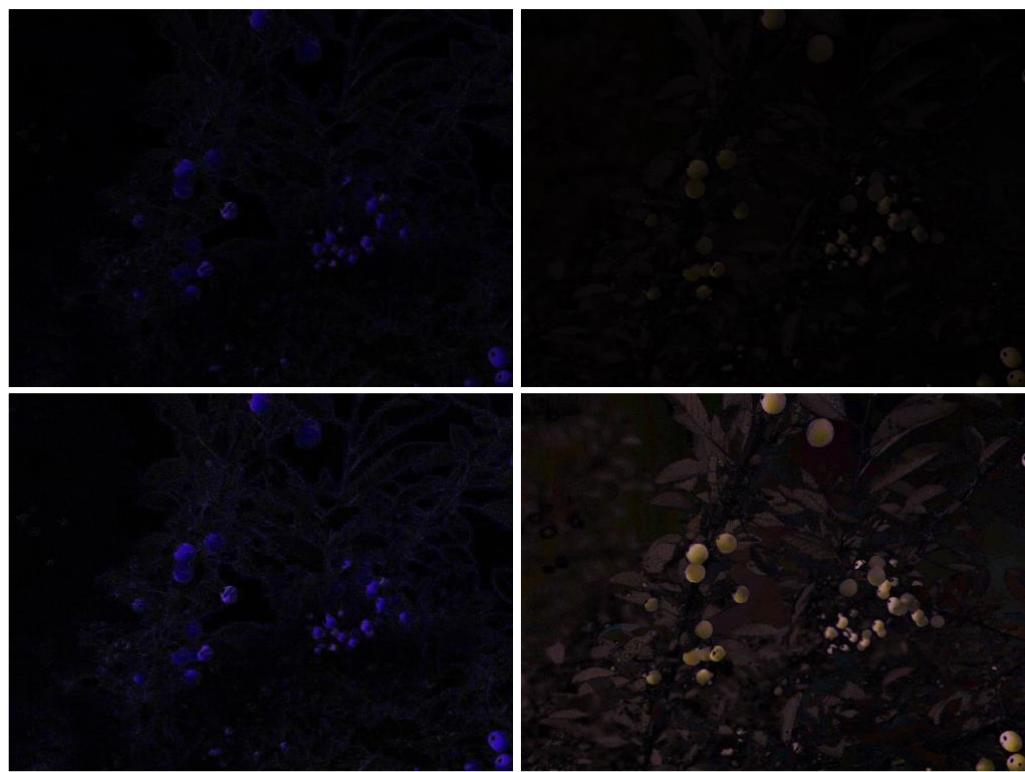
En las figuras de G.65 a G.69 se puede apreciar que el recoloreado de Melillo actúa, en mayor o menor medida, sobre todos los píxeles de la imagen, ya que la transformación lineal que define su recoloreado se aplica a la diferencia de percepciones; mientras que Jeong solamente recolorea aquellos que indica la función diferencia de color utilizada  $\varphi(X_k^o, X_k^d, \Psi_1)$ , en la que se extraen los tonos rojizos y se desplazan hacia tonos azules. En general, el recoloreado de Melillo es más intenso que el de Jeong.

### **DEUTERANOPÍA.**

Se muestran los resultados, para este defecto, utilizando las mismas imágenes que en el caso anterior. Se recuerda que las imágenes superiores muestran la intensidad real que aporta el recoloreado a la visión del deuteránope, mientras que las inferiores están afectadas por el coeficiente multiplicador para apreciar mejor sobre qué píxeles actúa.



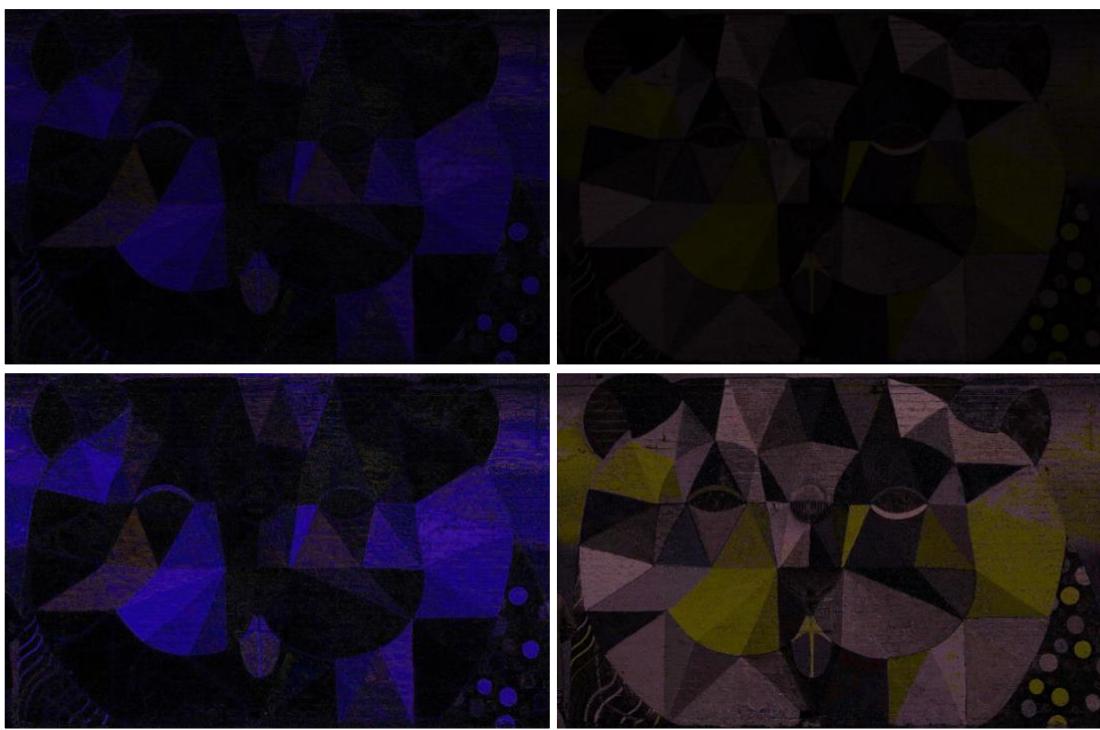
**Figura G.70. Aportación del recoloreado a la visión del deuteránope para lámina de Ishihara.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)**



**Figura G.71.** Aportación del recoloreado a la visión del deuteránope para la imagen “*cherry*”. Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)



**Figura G.72.** Aportación del recoloreado a la visión del deuteránope para la imagen “*fútbol*”. Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)



**Figura G.73.** Aportación del recoloreado a la visión del deuteránope para la imagen “*texturas*”. Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)

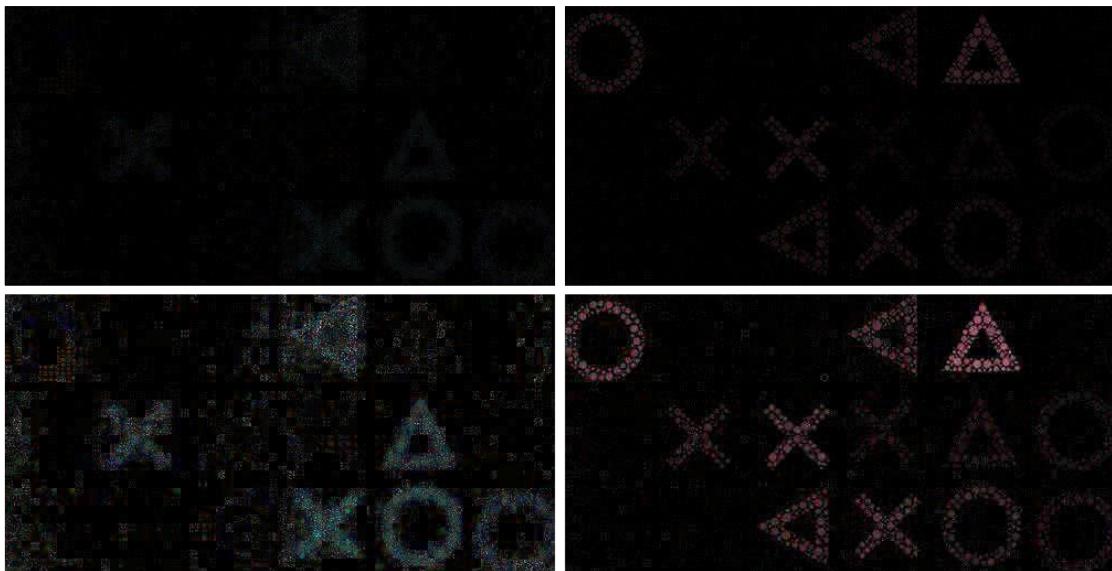


**Figura G.74.** Aportación del recoloreado a la visión del deuteránope para la imagen “*texturas*”. Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)

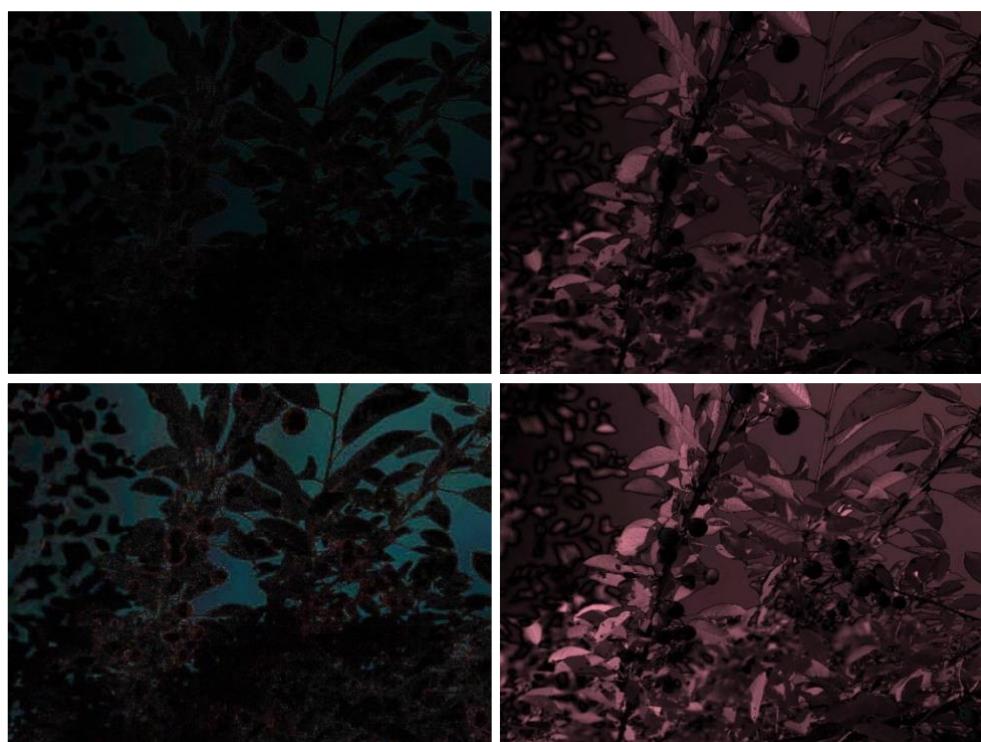
De las figuras de G.70 a G.74 se desprende que para deuteranopía el algoritmo que hemos propuesto, basado en Jeong, aporta un recoloreado algo más intenso que Melillo, por lo que se supone permitirá diferenciar mejor aquellos colores que no se visualizan correctamente.

## TRITANOPÍA

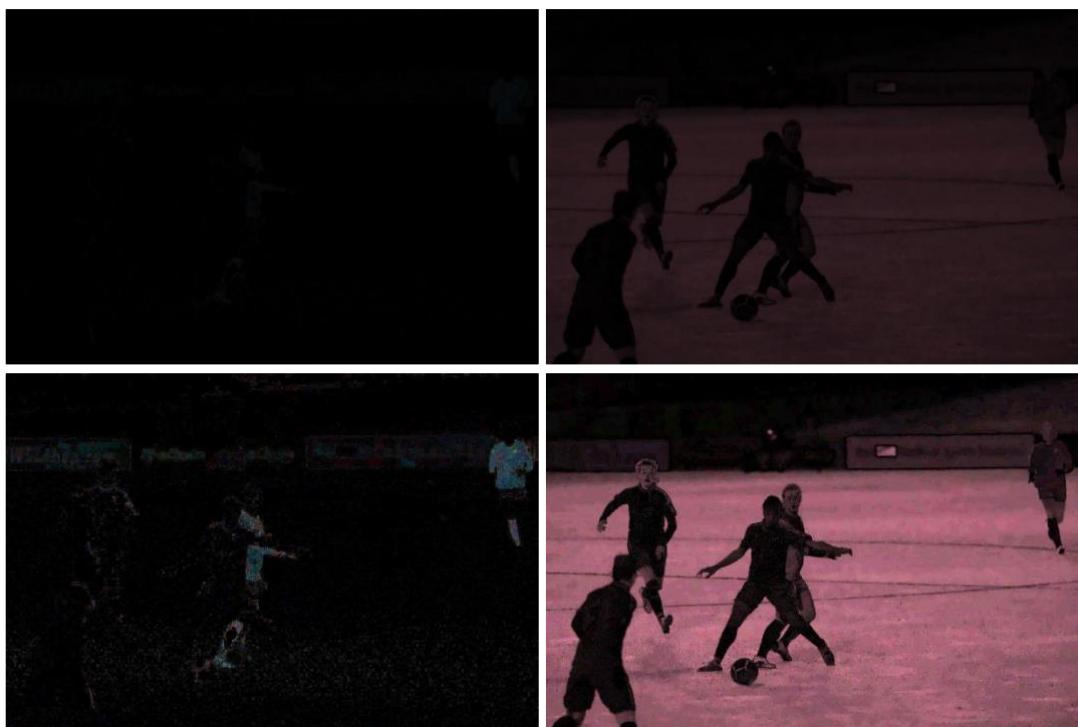
Para este defecto, se muestran los resultados utilizando las láminas HRR, imagen “*cherry*” y las tres imágenes de prueba.



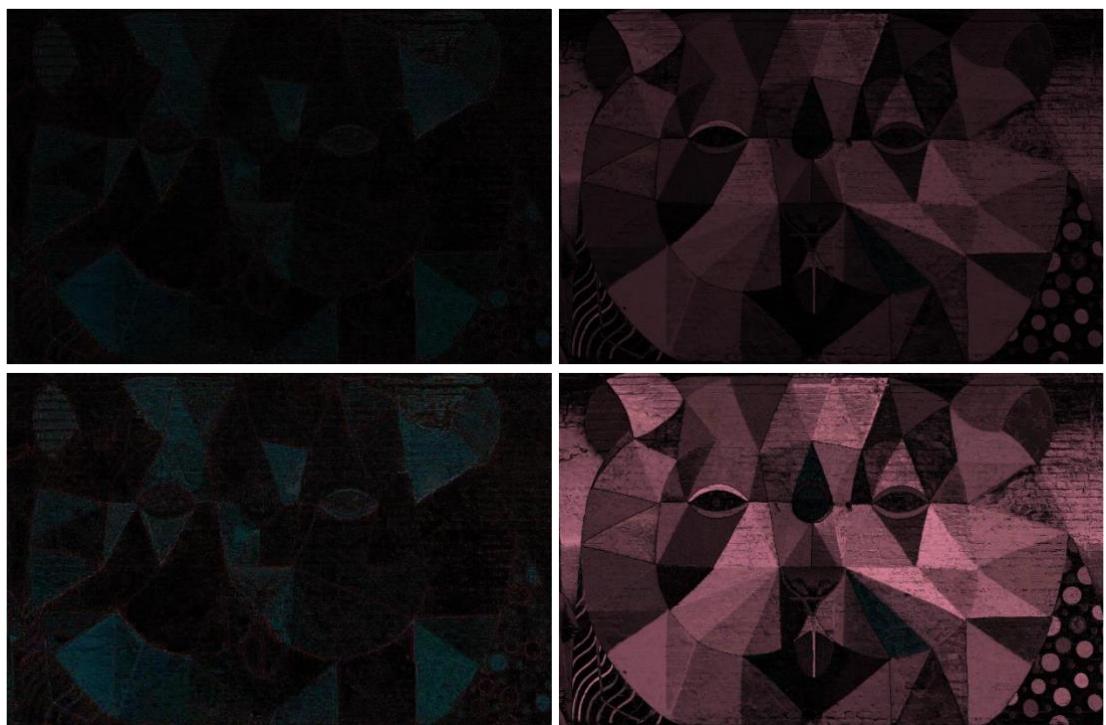
**Figura G.75. Aportación del recoloreado a la visión del tritánope para las láminas HRR.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)**



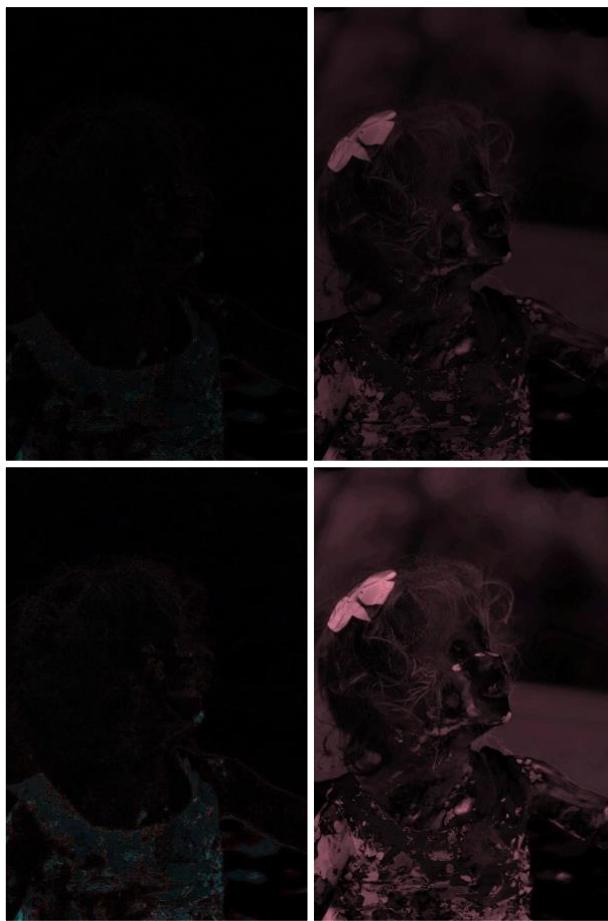
**Figura G.76. Aportación del recoloreado a la visión del tritánope para la imagen “*cherry*”.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)**



**Figura G.77.** Aportación del recoloreado a la visión del tritánope para la imagen “fútbol”.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)



**Figura G.78.** Aportación del recoloreado a la visión del tritánope para la imagen “texturas”.  
Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)



**Figura G.79. Aportación del recoloreado a la visión del tritánope para la imagen “*kid*”.**  
**Jeong (Izda.) Melillo (Dcha.)**

Según se desprende de las figuras G.75 a G.79, el recoloreado para tritanopía de Jeong funciona bien con las láminas HRR, ya que diferencia correctamente los 6 símbolos ocultos, pero es mínimo en el resto de las imágenes. En cambio, el recoloreado de Melillo parece excesivo, actuando sobre todos los colores.



# Referencias

---

- [1] S. Ishihara, «*The Series of Plates Designed as a Test for Colour-Blindness*». 24 plates edition. Kanehara Shuppan Co., Ltd. 1974
- [2] D.M. Hunt, K.S. Dulai, J.K. Bowmaker, J.D. Mollon, «*The Chemistry of John Dalton's Color Blindness*». Science. Vol. 267. February 1995.
- [3] Alan E H Emery, «*John Dalton (1766-1844)*». From the Medical School, University of Edinburgh. Journal of Medical Genetics, pp. 422-426. 1988
- [4] Daniel Malacara, «*Color vision and colorimetry : theory and applications*». 2nd ed. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2011
- [5] <https://webvision.med.utah.edu/book/part-ii-anatomy-and-physiology-of-the-retina/photoreceptors/>
- [6] <https://www.physics.utoronto.ca/~jharlow/cones.html>
- [7] P. Kumar, M. Bhattacharya, «*Colour Vision Deficiency Correction in Image Processing*». International Conference on Bioinformatics and Biomedicine. IEEE, 2013.
- [8] J.I. You, K-C Park, «*Image Processing With Color Compensation Using LCD Display for Color Vision Deficiency*». Journal of Display Technology. IEEE, 2016.
- [9] <https://adverum.com/>
- [10] <https://www.aao.org/salud-ocular/noticias/pronto-el-daltonismo-podria-ser-tratado-inyeccion>
- [11] <https://enchroma.com/>
- [12] <https://www.experimenta.es/noticias/industrial/enchroma-don-mcpherson-gafas-daltonicos/>
- [13] G.R. Kuhn, M.M. Oliveira, L.A.F. Fernandes, «*An efficient naturalness-preserving image-recoloring method for dichromats*». Journal Article. IEEE, 2008.
- [14] B. Sajadi, A. Majumder, M.M. Oliveira, R.G. Schneider, R. Raskar, «*Using Patterns to Encode Color Information for Dichromats*». Journal Article. IEEE, 2013.
- [15] <https://apps.apple.com/us/app/chromatic-glass/id388924058>
- [16] <https://www.google.com/glass/start/>
- [17] <https://www.microsoft.com/es-es/hololens>
- [18] T. Langlotz, J. Sutton, S. Zollmann, Y. Itoh, H. Regenbrecht, «*ChromaGlasses: Computational Glasses for Compensating Colour Blindness*». CHI 2018, Montreal, QC, Canada. April 21–26, 2018.
- [19] L. Zhang, Q. Xu, G. Zhu, J. Song, X. Zhang, P. Shen, W. Wei, S.A. Shah, M. Bennamoun, «*Improved colour-to-grey method using image segmentation and colour difference model for colour vision deficiency*». IET Image Process., 2018, Vol. 12 Iss. 3, pp. 314-319
- [20] S. Poret, R. D. Dony, S. Gregori. «*Image Processing for Colour Blindness Correction*». IEEE, 2009.
- [21] J. Jeong, H. Kim, T. Wang, Y. Yoon, S. Ko. «*An Efficient Re-coloring Method with Information Preserving for the Color-blind* ». IEEE, 2011.
- [22] P. Melillo, D. Riccio, L. Di Perna, G. Sanniti, M. De Nino, S. Rossi, F. Testa, F. Simonelli, M. Frucci. «*Wearable Improved Vision System for Color Vision Deficiency Correction*». IEEE, 2017.
- [23] [http://www.inf.ufrgs.br/~oliveira/pubs\\_files/CVD\\_Simulation/CVD\\_Simulation.html](http://www.inf.ufrgs.br/~oliveira/pubs_files/CVD_Simulation/CVD_Simulation.html)

- [24] F. Viénot, H. Brettel, J.D. Mollon. «*Digital Video Colourmaps for checking the Legibility of displays by dichromats*». COLOR research and application. Volume 24, Number 4, August 1999.
- [25] <https://rastergraphics.wordpress.com/2012/07/20/otro-tutorial-de-quaternions/>
- [26] [https://es.qwe.wiki/wiki/Quaternions\\_and\\_spatial\\_rotation?ddexp4attempt=1](https://es.qwe.wiki/wiki/Quaternions_and_spatial_rotation?ddexp4attempt=1)
- [27] [https://unsplash.com/photos/\\_aun3WpH3BY](https://unsplash.com/photos/_aun3WpH3BY)
- [28] <https://unsplash.com/photos/sD0uo5SMrHY>
- [29] <https://unsplash.com/photos/0WAJhFK7Q9o>
- [30] <https://unsplash.com/photos/JfolIjRnveY>
- [31] K.G. Foote, M. Neitz, J. Neitz. «*Comparison of the Richmond HRR 4th edition and Farnsworth–Munsell 100 Hue Test for quantitative assessment of tritan color deficiencies*». J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis. 2014.
- [32] <http://www.blueconemonochromacy.org/es/molecular-genetics/>
- [33] «*Cómo entender la genética: una guía para pacientes y profesionales médicos en la región de Nueva York y el Atlántico Medio*». The Resource Repository, 2009.  
[http://www.resourcerepository.org/documents/1247/understandinggenetics:anewyork\\_midatlanticguideforpatientsandhealthprofessionals/](http://www.resourcerepository.org/documents/1247/understandinggenetics:anewyork_midatlanticguideforpatientsandhealthprofessionals/) (última comprobación Noviembre 2019).
- [34] <https://www.vissum.com/el-daltonismo-afecta-mas-a-hombres-que-a-mujeres/>