

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**



Análisis y caracterización colorimétrica de zumos de  
naranja por espectrofotometría de reflexión y transmisión

Tesis para optar el grado académico de Magíster en Física  
Aplicada que presenta:

*Mabel Erlinda Tesillo Quispe*

**Asesor:**

*Miguel Augusto Asmad Vergara*

Co-asesor:

*Juan Manuel Bujdud Pérez*

**Lima, 2022**

## RESUMEN

El color es considerado uno de los aspectos más importantes en la evaluación de la calidad de los productos alimentarios y su evaluación es de crucial importancia en una de las bebidas más consumidas como es el jugo de naranja, donde es importante evaluar el color y su aceptabilidad ante procesos que involucran su conservación y procesamiento.

En este trabajo evaluamos el color del jugo de diferentes variedades de naranjas denominadas: *Tangelo*, *Valencia* y *Huando*, todas ellas se consumen en diferentes mercados de Lima-Perú. El color puede evaluarse por apariencia visual o análisis instrumental, en nuestro caso; hemos utilizado diferentes tipos de espectrómetros para medir el color. Se han obtenido varios parámetros como los espectros de transmitancia y reflectancia en el rango visible de la luz y las variables colorimétricas CIE L\*a\*b\* y CIE L\*c\*h.

En resumen, los resultados muestran que el valor numérico del color del jugo de naranja está asociado a la selección del instrumento, es decir: la geometría óptica, tipo de iluminación y preparación de la muestra. Los hallazgos más consistentes en relación con la escala visual fueron obtenidos con el espectrofotómetro Konica Minolta modelo CM-5. Además, Se encontró que es posible diferenciar los jugos frescos de los jugos industrializados mediante la determinación de las correspondientes diferencias de color ( $\Delta E$ ) en la escala CIELAB alrededor del umbral de 3 unidades.

También, este estudio ha mostrado que los espectrómetros convencionales en configuración óptica 0/0 (0° de ángulo de iluminación / 0° de ángulo de observación) diseñado para obtener medidas del factor de transmitancia de una muestra líquida, son una alternativa viable para obtener valores colorimétricos para muestras líquidas transparentes, Sin embargo, se debe tener especial cuidado con muestras translúcidas, ya que debido a su naturaleza dispersiva, se pueden obtener colores con poca luminosidad y croma.

## ABSTRACT

Color is considered one of the most important aspects in the evaluation of the quality of food products and its evaluation is of crucial importance in one of the most consumed beverages such as orange juice, where it is important to evaluate the color and its acceptability. before processes that involve its conservation and processing.

In this work we evaluate the color of the juice of different varieties of oranges called: Tangelo, Valencia and Huando, all of them are consumed in different markets in Lima-Peru. Color can be evaluated by visual appearance or instrumental analysis, in our case; we have used different types of spectrometers to measure color. Several parameters have been obtained, such as transmittance and reflectance spectra in the visible range of light and the CIE L \* a \* b \* and CIE L \* c \* h colorimetric variables.

In summary, the results show that the numerical value of the orange juice color is associated with the selection of the instrument, that is, optical geometry, type of illumination and sample preparation. The most consistent findings in relation to the visual scale were obtained with the Konica Minolta model CM-5 spectrophotometer. It was found that it is possible to differentiate fresh juices from industrialized juices by determining the corresponding color differences ( $\Delta E$ ) on the CIELAB scale around the threshold of 3 units.

Also, this study has shown that conventional spectrometers in 0/0 optical configuration ( $0^\circ$  of illumination angle /  $0^\circ$  of observation angle) designed to obtain measurements of the transmittance factor of a liquid sample, are a viable alternative to obtain Colorimetric values for transparent liquid samples, however, special care must be taken with translucent samples, since due to their dispersive nature, colors with low luminosity and chroma can be obtained.

*DEDICATORIA*

*A mis padres Eugenia y Roberto, por su cariño y apoyo incondicional en mis aciertos y caídas. A mi tía Juana, a quien quiero como a una madre. A Maribel mi querida hermana y en memoria de mis queridos tíos Víctor y Bárbara*



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quisiera agradecer a mi asesor Miguel Asmad que me ha apoyado y guiado en todo mi trabajo de investigación y me ha compartido su experiencia científica y amistad; también a mi asesor de prácticas de espectrocolorimetría, Juan Manuel Bujdud, del Centro de Investigaciones en Óptica de la sede Aguascalientes en México, por sus valiosas orientaciones en la práctica y teoría del estudio del color, su paciencia, comprensión y soporte constante.

A los profesores de la Maestría en Física Aplicada, por sus valiosísimas enseñanzas y en especial al profesor Guillermo Baldwin por las facilidades brindadas en el uso del Laboratorio de Óptica de la PUCP y por brindarme la orientación y formación académica durante mis estudios.

Al personal y autoridades del Centro de Investigaciones en óptica, A.C. sede Aguascalientes por su buen trato y por darme la oportunidad de hacer la estancia de investigación en espectrocolorimetría.

A María Luisa Cerón, jefa del Laboratorio de Análisis de Suelos de la UNMSM, por permitirme hacer mediciones con los equipos. Al personal encargado del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la UNALM por ayudarme con las mediciones a mis muestras.

A mis compañeros de la Maestría de Física Aplicada de la PUCP Franco Gonzáles y Rubén Sánchez, por su apoyo en el manejo de los equipos del Laboratorio de óptica.

Finalmente, a mis muy apreciadas amistades de la UNMSM Carolina, Nériida, Mirian, María Luisa, Fanny y Antonio.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>20</b>
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	22
1.2.1	<i>OBJETIVO GENERAL .....</i>	<i>22</i>
1.2.2	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</i>	<i>22</i>
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1	TÉRMINOS Y CONCEPTOS BÁSICOS DEL COLOR.....	23
2.2	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	30
2.3	LA NARANJA Y SUS VARIEDADES EN EL PERÚ.....	39
2.4	COLORIMETRÍA CIE .....	41
2.4.1	<i>INTRODUCCIÓN .....</i>	<i>41</i>
2.4.2	<i>TEORÍA TRICROMÁTICA .....</i>	<i>42</i>
2.4.3	<i>DERIVACIÓN DE LOS OBSERVADORES ESTÁNDAR .....</i>	<i>47</i>
2.4.4	<i>CÁLCULO DE VALORES TRIESTÍMULOS PARA OBJETOS.....</i>	<i>55</i>
2.4.5	<i>SISTEMAS DE COLOR CIE.....</i>	<i>60</i>
2.4.5.1	<i>ESPACIOS DE COLOR.....</i>	<i>60</i>
2.4.5.2	<i>ESPACIO DE COLOR CIELAB .....</i>	<i>63</i>
2.4.5.3	<i>DIFERENCIA DE COLOR EN EL ESPACIO DE COLOR CIELAB .....</i>	<i>68</i>
2.4.6	<i>ILUMINANTES PATRONES CIE .....</i>	<i>75</i>
2.5	MEDICIÓN ESPECTRAL DEL COLOR .....	78
2.5.1	<i>GEOMETRÍAS PARA MEDIDA DEL COLOR POR REFLECTANCIA.....</i>	<i>80</i>
2.5.2	<i>GEOMETRÍAS ESTÁNDAR CIE PARA MEDIR EL COLOR POR TRANSMITANCIA.....</i>	<i>82</i>
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>84</b>
3.1	LUGAR DE EJECUCIÓN .....	84
3.2	APARATOS E INSTRUMENTACIÓN .....	84

3.3.	PROCEDIMIENTO ANALÍTICO .....	90
3.3.1	MEDICIÓN DEL COLOR POR TRANSMITANCIA, UTILIZANDO EL ESPECTROFOTÓMETRO THERMO SPECTRONIC .....	91
3.3.2	MEDICIÓN DEL COLOR POR TRANSMITANCIA, UTILIZANDO EL ESPECTROFOTÓMETRO CM-5 DE KONICA MINOLTA .....	95
3.3.3	MEDICIÓN DEL COLOR POR REFLECTANCIA, UTILIZANDO EL ESPECTROFOTOMETRO CM 700d DE KONICA MINOLTA.....	97
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>99</b>
4.1	RESULTADOS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO THERMO SPECTRONIC. ....	99
4.1.1	<i>Discusión de resultados obtenidos con el equipo Thermo Spectronic.....</i>	<i>106</i>
4.2	RESULTADOS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO KONICA MINOLTA CM-700d.....	108
4.2.1	<i>Discusión de resultados obtenidos con el equipo Konica Minolta CM-700d.....</i>	<i>114</i>
4.3	RESULTADOS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO KONICA MINOLTA, MODELO CM-5.....	116
4.3.1	<i>Discusión de resultados obtenidos con el equipo CM 5.....</i>	<i>121</i>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>126</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>129</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>137</b>
7.1	ANEXO A. TABLA DE VALORES DEL OBSERVADOR DE 2° CIE 1931. OBTENIDO DE COLORIMETRY, C. I. E. (2004).	137
7.2	ANEXO B. TABLA DE VALORES DEL OBSERVADOR ESTÁNDAR DE 10°, CIE 1964. OBTENIDO DE COLORIMETRY, C. I. E. (2004).	140
7.3	ANEXO C. TABLA DE VALORES DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE POTENCIA DE LOS ILUMINANTES CIE, OBTENIDO DE COLORIMETRY, C. I. E. (2004).	143
7.4	ANEXO D. VALORES TRIESTÍMULO Y COORDENADAS DE CROMATICIDAD DE LOS ILUMINANTES CIE, PARA LOS OBSERVADORES COLORIMÉTRICOS ESTÁNDAR CIE 1931 Y CIE 1964. OBTENIDO DE COLORIMETRY, C. I. E. (2004).	145
7.5	ANEXO E. ENSAYO: OPORTUNIDADES DE SERVICIOS E INVESTIGACIÓN EN MEDICIONES COLORIMÉTRICAS .....	147

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los sistemas de mezcla de colores y los sistemas de apariencia del color, traducido de (Ohta y Robertson, 2006, p.49).....	30
Tabla 2. Especificaciones técnicas del sistema óptico del espectrofotómetro Konica Minolta CM 5 .....	86
Tabla 3. Especificaciones técnicas del sistema óptico del espectrofotómetro Konica Minolta CM 700d .....	88
Tabla 4. Especificaciones técnicas del sistema óptico del espectrofotómetro Thermo Spectronic modelo: Helios Gamma.....	90
Tabla 5. Hoja de cálculo para la obtención de los valores de color en las escalas $L^*a^*b^*$ y $L^*c^*h^*$ .....	93
Tabla 6. Valores cuantitativos de la escala de color $L^*a^*b^*$ y $L^*c^*h^*$ obtenidos con el espectrofotómetro Helios Gamma .....	101
Tabla 7. Tabla de resultados de color de muestras de zumo con el espectrofotómetro CM 700d .....	109
Tabla 8. Tabla de resultados de medidas de color en la escala $L^*a^*b^*$ y $L^*c^*h^*$ .....	117
Tabla 9. Tonos de color en orden decreciente obtenido con el equipo CM 5 .....	119
Tabla 10. Valores de croma y ejemplificación visual en el sistema Munsell.....	120
Tabla 11. Tabla de comparación entre los equipos para el croma ( $Cab^*$ ) .....	124
Tabla 12. Tabla de comparación entre los equipos para el tono $h^{\circ}_{ab}$ .....	124
Tabla 13. Tabla de coeficiente de correlación de Pearson del croma ( $Cab^*$ ) entre los equipos.....	124
Tabla 14. Tabla de coeficiente de correlación de Pearson del tono $h^{\circ}_{ab}$ entre los equipos. ....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Un rayo de luz incidente en un material translúcido. La luz no reflejada o transmitida es absorbida. Adaptado de: “principles of color technology. John Wiley & Sons” por R. Berns, 2019, p.115 .....	24
Figura 2. El color resulta de la interacción de una fuente de luz, un objeto y el ojo y cerebro o sistema visual.....	25
Figura 3. (a) Ejemplificación del árbol de color Munsell, (b) Formato de presentación del sistema NCS. obtenido de: "Presentaciones de Ciencia del Color" por Marchante Rodríguez, Verónica, et al. (2010) (c) Espacio de color CIE XYZ, muestra del diagrama de cromaticidad xy, (d) Espacio de color CIELAB, que se obtiene a partir de los valores triestímulo X, Y y Z, obtenido de “Precise color communication” Konica Minolta (2007). .....	29
Figura 4. En alimentos translúcidos, la difusión de la luz incidente resulta en pérdida de medición, usando un área larga de apertura, consigue que este atrape la luz para ser medida. Adaptado de “ <i>Colour measurement of foods by color reflectance</i> ”, por P. Joshi, 2002, p.92. ....	31
Figura 5. Esquema de la medición de una muestra translúcida por transreflectancia, con la geometría 45°/0°.....	33
Figura 6. Valores de color de diferentes productos en el sistema CIELAB, calculado con los iluminantes D65(▪), A(●), Y 83(▲), tomado de: “Color in food” por: D. MacDougall, 2010, p. 338 .....	36
Figura 7. Porcentaje de reflectancia del zumo de naranja, tomado de: “Color in food” por: D. MacDougall, 2010, p. 337 .....	36

Figura 8. Espectro de reflectancia de jugo de naranja concentrado y diluido a una longitud de camino de 4 cm, tomado de: “Color in food” por: D. MacDougall, 2010, p. 331.....	37
Figura 9. Resultado de mezcla de luz amarilla y azul, tomado de: “ <i>principles of color technology. John Wiley &amp; Sons</i> ” por R. Berns, 2019, p.52. ....	43
Figura 10. Ejemplo de un colorímetro visual, tomado de: “ <i>principles of color technology. John Wiley &amp; Sons</i> ” por R. Berns, 2019, p.52.....	44
Figura 11. Experimento básico de igualación de color. ....	46
Figura 12. Observadores estándar de 2° y 10°. ....	47
Figura 13. Funciones de igualación de color $r_\lambda$ , $g_\lambda$ y $b_\lambda$ del observador estándar de la CIE 1931.....	49
Figura 14. Funciones de igualación de color $x_\lambda$ , $y_\lambda$ y $z_\lambda$ , del observador estándar de 2° de la CIE 1931 y en líneas punteadas las FIC $x_{10\lambda}$ , $y_{10\lambda}$ y $z_{10\lambda}$ del observador estándar de 10° de la CIE 1964.....	54
Figura 15. Diagrama de cromaticidad xy del sistema de especificación de color XYZ (círculos densos) y diagrama de cromaticidad $x_{10}$ e $y_{10}$ del sistema de especificación de color a $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ (círculos abiertos) (Ohta & Robertson, 2006, p.76) .....	60
Figura 16. Gamut de todos los colores posibles para diferentes valores de luminancia en el plano $a^*b^*$ , tomado de:” Color vision and colorimetry: theory and applications.”, D. Malacara, 2001, p. 118. ....	64
Figura 17. Espacio de color óptimo CIELAB compuesto por planos de luminosidad constante $L^*$ espaciados en $\Delta L= 5$ unidades. La red indicada en cada plano representa líneas de constante $a^*$ o $b^*$ con espacios entre líneas de 20 unidades.....	65
Figura 18. CIE 1976 $a^*b^*$ proyección a una iluminación constante $L^*=50$ . El tono CIELAB es medido en grados empezando con $hab=0^\circ$ en la dirección $+a^*$ e	

incrementándose en contra de las manecillas del reloj. El croma CIELAB es medido como la longitud de la línea de un punto neutral ( $a^*=b^*=0$ ) al punto de muestra, tomado de: “*principles of color technology. John Wiley & Sons*” por R. Berns, 2019, p.76..... 66

Figura 19.Reducción en profundidad, claridad, croma e intensidad del color naranja, obtenido de: “*principles of color technology. John Wiley & Sons*” por R. Berns, 2019, p.78. .... 67

Figura 20. Representación de aceptabilidad visual. .... 69

Figura 21. Sensibilidad a las diferencias de color en el espacio CIELAB. Traducido de <<https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html>> ..... 72

Figura 22. Sensibilidad a las diferencias de color en la dirección del tono. Traducido de <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html> ..... 73

Figura 23. Sensibilidad a las diferencias de color en la zona de los azules. Traducido de <<https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html>> ..... 74

Figura 24. Diferencias de color  $\Delta E^*_{ab}$  del espacio CIELAB está representada por un círculo perfecto, la diferencia del índice de cromaticidad  $\Delta a^*b^*$ , es representado por un cuadrado. Traducido de <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html> ..... 74

Figura 25. Distribución espectral de los iluminantes estándar CIE A, B, C y D<sub>65</sub>..... 77

Figura 26. Distribución espectral del iluminante estándar CIE D<sub>65</sub>, y los iluminantes suplementarios D<sub>50</sub>, D<sub>55</sub> y D<sub>75</sub> ..... 77

Figura 27. Arreglo óptico común para espectrofotómetros, adaptado de: ” Color vision and colorimetry: theory and applications.”, D. Malacara, 2001, p.159..... 79

Figura 28. Geometrías de medición por reflectancia 0°/45° y 45°/0°, obtenido de (Bujdud J, 1999) <https://biblioteca.cio.mx/tesis/06999.pdf>..... 81

Figura 29. (a) geometría bidireccional anular, (b) geometría de esfera integradora, donde la componente especular puede o no ser incluida o excluida, (c) geometría 45/0 a dos ángulos azimutales, fuente: “Principles of color technology. John Wiley & Sons” por R. Berns, 2000, p.84.....	81
Figura 30. Geometrías de medición por reflectancia 0/d y d/0, obtenido de (Bujdud J, 1999) <a href="https://biblioteca.cio.mx/tesis/06999.pdf">https://biblioteca.cio.mx/tesis/06999.pdf</a> .....	82
Figura 31. Geometría d/0 (iluminación difusa/0° de observación) y geometría 0/d (0° de iluminación/ observación difusa, adaptado de “Precise Color Communication” Konica Minolta (2007), <a href="http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf">http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf</a> .....	83
Figura 32. Geometrías 0/0 (0° de iluminación/ 0° de observación), adaptado de “Precise Color Communication” Konica Minolta (2007), <a href="http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf">http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf</a> .....	83
Figura 33. (a) Espectrofotómetro Thermo Spectronic Helios Gamma, (b) Espectrofotómetro Konica Minolta CM 700d y (c) Espectrofotómetro Konica Minolta CM 5.....	85
Figura 34. Arreglo experimental con el espectrofotómetro Thermo Spectronic, modelo: Helios gama. ....	91
Figura 35. Diagrama de cálculo de valores CIELAB, CIELCH y $\Delta E$ . ....	92
Figura 36. En la figura de la izquierda se muestra el compartimento donde se inserta la cubeta usada para la medición del color con el equipo CM 5. ....	96

Figura 37. (a) Esquema del diagrama de flujo, mostrando la medición, obtenido de: <a href="https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cm-5_instruction_spa.pdf">https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cm-5_instruction_spa.pdf</a> , (b) Diagrama aproximado de la geometría d/0 (iluminación difusa/0° de observación) .....	97
Figura 38. Vista de la muestra de zumo colocada sobre el espectrofotómetro CM 700d y un esquema aproximado de su configuración óptica d/8° (iluminación difusa/8° de observación).....	98
Figura 39. Fotografía de las muestras de jugos envasados, Tangelo y naranja de jugo (Valencia) .....	100
Figura 40. Muestras analizadas: (a)Naranja de jugo (Valencia), (b) Tangelo sin pepa (importado) y (c) Huando nacional .....	100
Figura 41. Resultados de valores de claridad L* en la escala de color CIELAB.....	102
Figura 42. Resultados de valores a* y b* en la escala de color CIELAB. ....	103
Figura 43. Valores de croma según variedad del zumo de naranjas frescas e industriales (Vitta, Ecofresh y Londa). ....	104
Figura 44. Tono de color de zumos de naranja según variedad y zumos industriales: Vitta, Ecofresh y Londa.....	104
Figura 45. Espectros de transmitancia de los zumos de naranjas Huando, Valencia, Tangelo selva, Tangelo sin pepa, y jugos envasados, medidos con el espectrofotómetro Thermo Spectronic. ....	105
Figura 46. Fotografías de las naranjas Valencia, Tangelo, Huando y sus respectivos zumos.....	108
Figura 47: Valores promedio de L* de las variedades de zumo de naranja frescas e industriales.....	110

Figura 48. Diagrama a*b* rojo-amarillo de las variedades de zumo de naranja.....	111
Figura 49. Valores de croma según variedad de zumo de naranjas frescas (Huando, Valencia, e industriales (Aquarius, Ecofresh, Frumas y Watts).....	112
Figura 50. Tono de color de zumos de naranja según variedad y zumos industriales: Ecofresh, Watts, Frumas y Aquarius.....	112
Figura 51. Gráfica de porcentaje de reflectancia versus longitud de onda.....	114
Figura 52. (a) Naranja del grupo blancas (naranja de jugo) y Navel o umbilicadas (Huando) y naranja Tangelo (b) Cubetas conteniendo las muestras de jugos de naranja	117
Figura 53. Distribución de valores L* de las muestras de zumo de naranja. ....	118
Figura 54. Distribución del color de las muestras en el plano a*b*.....	118
Figura 55. Tono de color de zumos de naranja según variedad Huando, Tangelo y naranja de jugo o jugo(ref) y zumo industrial Cifrut.....	119
Figura 56. Valores de croma según variedad de zumo de naranjas frescas e industrial Cifrut.....	120
Figura 57. Valores de porcentaje de transmitancia de las muestras de zumo de naranja. ....	121
Figura 58. Resultados del tono de color en los zumos frescos de la variedad: Huando, Valencia y Tangelo, según equipo.....	125
Figura 59. Resultados del croma de color en los zumos frescos de la variedad: Huando, Valencia y Tangelo, según equipo.....	125

## **PRESENTACIÓN EN EVENTOS**

Título: Analysis of the colorimetric characterization of orange juices by spectrophotometry, publicado en el libro de resúmenes: 7th IUPAP International Conference on Women in Physics, 2021, pág. 105, virtual meeting. (Artículo extenso sometido a revisión)

Título: Teoría Tricromática del color, publicado en: III Encuentro de Física, 2019, pág.6, Perú, Lima.

<http://grupo-de-investigacion-ceanum.blogspot.com/p/libro-de-resumenes-2019.html>

<https://drive.google.com/file/d/11inXEEbiWj5yVgRUFPLy2tywKr-Edy90/view>

Título: Fundamentos básicos para la medición del color por espectrofotometría, publicado en: Libro de Resúmenes: II Encuentro de Física, 2018, pág. 9, Perú, Lima.

<http://grupo-de-investigacion-ceanum.blogspot.com/p/libro-de-resumenes.html>

<https://drive.google.com/file/d/1066-IDOzpH42OEJKhUAWqIxOPliBccJ6/view>

Título: Evaluación de medidas colorimétricas en zumos de naranja, publicado en: Libro de Resúmenes: XXVI Simposio Peruano de Física, 2017, pág. 54, XXVI Simposio Peruano de Física, Perú, Huacho.

Título: Medición del color, 'Publicado en: Libro de Resúmenes: I Encuentro de Física y Minicursos, 2017, pág.10, Perú, Lima.

Título: La ciencia de la colorimetría y sus aplicaciones en la industria de alimentos, Publicado en: Libro de resúmenes XXIV Simposio peruano de Física, 2015, Pág. 47, Perú, Lima.

## INTRODUCCIÓN

En el Perú la industria de los cítricos cada año aumenta alrededor del 5%, según Procitrus (Asociación de Productores de Cítricos del Perú), se esperaba que las exportaciones peruanas de cítricos para el 2020 superasen las 200 000 mil toneladas. También el boletín OCEX (s.f.) de Beijing ha identificado una interesante oportunidad comercial para los jugos concentrados de fruta peruana, esto porque el consumidor chino valora el origen natural y seguro de las bebidas y alimentos que consume.

Sin duda la naranja es uno de los cítricos más consumidos en forma de jugo natural y dentro de los parámetros que definen calidad del producto, el color es un indicador primario de la preferencia del consumidor. La determinación numérica del color ayuda al control de calidad e influye indirectamente en la percepción de la madurez y frescura del producto.

El tema de colorimetría me fue propuesto por el director de la Maestría en Física Aplicada Guillermo Baldwin, ya que esa línea no se había desarrollado dentro del programa de la Maestría. Me interesé en el tema tras revisar sus múltiples aplicaciones y se consiguió posteriormente hacer una pasantía de investigación en el Centro de Investigaciones en Óptica con sede en Aguascalientes (México), en agosto del 2015, bajo la tutela del M.C. Juan Manuel Bujdud, de quien recibí capacitación en colorimetría y manejo de equipos, además de hacer exploración de sus aplicaciones.

La medición del color o también llamada colorimetría es un método no destructivo y puede ser realizado por inspección visual e instrumentos tales como los colorímetros triestímulo, espectrofotómetros o visión por computador (Wu & Sun, 2013). Se eligió

hacer uso de los espectrofotómetros porque se contaba con uno en el Laboratorio de Óptica de la PUCP, posteriormente se buscó otros en la UNMSM y UNALM.

La *Commission Internationale de l'Eclairage* o Comisión Internacional de Iluminación (CIE) desarrolló la colorimetría triestímulo y representa uno de los principales recursos para desarrollar los problemas de análisis objetivo del color en alimentos y bebidas (Fernández-Vázquez et al., 2014). Muchos de los espacios instrumentales de color son estandarizados por la CIE bajo una serie de condiciones estándar (iluminantes, observadores y metodología espectral). El espacio de color  $L^*a^*b^*$  es uno de los más usados debido a su distribución uniforme de colores y porque la distancia euclidiana entre dos colores diferentes corresponde cercanamente a la diferencia de color percibida por un observador (León et al, 2006).

Este trabajo tiene como objetivo general el análisis y la caracterización del color de zumos de naranjas por espectrofotometría, para ello se revisó la literatura respecto al uso del espectrofotómetro como medidor de color, se encontró medidas que usamos como referencias de valores colorimétricos en (Conesa et al, 2015), (Fernández-Vázquez et al, 2014), (Schwab et al, 2013) (Fernández-Vázquez et al, 2010), (Pérez-López et al, 2006), (Hunterlab, 2008). Observamos que los autores utilizan diversas técnicas instrumentales, debido a la complejidad que se presenta en la medida del color en alimentos translúcidos como el zumo de naranja; además, utilizan equipos que no tenemos disponibles en los laboratorios como los radiómetros, espectrocolorímetros con geometría óptica ( $45^\circ/0^\circ$ ) ( $45^\circ$  de iluminación y  $0^\circ$  de observación) y otras marcas comerciales incluso descontinuadas.

En esta investigación se han planteado cómo obtener los valores colorimétricos del zumo de naranjas siguiendo las recomendaciones de la colorimetría CIE, con un espectrofotómetro convencional (que sólo está diseñado para entregar los datos de transmitancia espectral), a estos datos base se sumaran los datos espectrales del iluminante D65 y las del observador CIE 1964, para luego calcular los valores triestímulos X, Y y Z, para luego evaluarla en otros espacios de color como el CIELAB y CIELCH.

Otro aspecto que aborda este trabajo es explorar la utilidad de las coordenadas CIELAB para diferenciar los zumos frescos de la naranja Tangelo y Huando y zumos comerciales respecto de la naranja valencia, para ello se calcularán los valores de diferencia de color ( $\Delta E$ ) que se obtendrán de los valores de la escala de color CIELAB, tomando de referencias los umbrales hallados por (Fernández-Vázquez, 2013) y (Mokrzycki, 2011)

Este estudio podría contribuir al conocimiento de medición de color de muestras translúcidas porque damos alcance de estudios previos y del marco teórico relevante para analizar los resultados que encontramos en las mediciones espectrofotométricas.

Los temas principales abordados en este trabajo han sido organizados como sigue:

En el Capítulo 1, se presenta el planteamiento del problema, donde se enuncian las preguntas y los objetivos de la investigación.

En el Capítulo 2, se detalla el marco teórico comenzando con la definición de conceptos y términos básicos del color, luego se reportan los antecedentes de la investigación, donde se citan los autores de artículos científicos en la medición del color del zumo de naranja o similares para poder discutirlos en nuestros resultados. Se hace un resumen sobre las variedades de naranja en estudio, luego se abordan las bases teóricas de la medición del

color bajo el estándar CIE, que abarca la derivación de los observadores estándar, el cálculo de los valores triestímulos, los sistemas de color CIE, diferencias de color en el sistema CIELAB, iluminantes y patrones CIE, la medición espectral del color y las diferentes geometrías de medida del color por reflectancia y transmitancia.

En el Capítulo 3, se describe la metodología de la investigación que incluye los materiales: zumos de naranjas frescas y comerciales de las naranjas perteneciente al grupo de naranja blancas y Navel, la instrumentación: espectrofotómetro modelos Helios Gamma, CM 700d y CM 5, de la marca Thermo Spectronic y los dos últimos de la marca Konica Minolta y los procedimientos realizados para la medición del color del zumo de naranja. Para equipos que no incluyen un software de análisis de color requiere contar con los datos espectrales del iluminante D65, la transmitancia/reflectancia del objeto y las funciones de coincidencia de color (observador de décimo grado CIE) para poder hallar los valores triestímulos X, Y y Z.

En el Capítulo 4, se presentan los resultados del trabajo de investigación y la discusión de los resultados para cada equipo usado, mostrándose la tabla de datos de las medidas de color expresadas en la escala CIELAB y CIELCH, además de los valores de las diferencias de color y las gráficas del factor de transmitancia/ reflectancia espectral de los zumos de naranja frescos y comerciales. En el Capítulo 5, se muestran las conclusiones obtenidas de los resultados de la investigación y en el Capítulo 6, se presentan las referencias bibliográficas en orden alfabético.

Por último, en los anexos *a* y *b* se muestran la tabla de valores del observador estándar de 2° y 10°, en el anexo *c*, la tabla de valores de distribución espectral de potencia de los iluminantes CIE, en el anexo *d*, los valores triestímulos y las coordenadas de

cromaticidad de los iluminantes CIE, para los observadores colorimétricos estándar CIE 1931 y CIE 1964 y en el anexo e: el ensayo titulado: Oportunidades de servicios e investigación en mediciones colorimétricas.



# 1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El zumo de naranja es una de las bebidas que más se consumen en todo el mundo y se calcula que 20 millones de toneladas de naranja se procesan en zumo cada año. Según (Agrodataperú, 2018) las exportaciones de cítricos crecieron 300% en el 2016. La importancia del color en el zumo de naranja es resaltada por (Fernández-Vázquez et al, 2013 que dice: “Es el primer atributo que perciben y valoran los consumidores” y la determinación numérica del color ayuda al control de calidad y puede reducir la variabilidad causada por el análisis subjetivo.

En la literatura científica consultada en: (Fernández-Vázquez et al, 2014), (Schwab et al, 2013) (Fernández-Vázquez et al, 2010), (Pérez-López et al, 2006), (Hunterlab, 2008) (Caivano, 2012), para la medición instrumental del color de zumos de naranja hacen referencia al uso de equipos tales como espectrofotómetros con geometría óptica ( $45^\circ / 0^\circ$ ) ( $45^\circ$  de iluminación y  $0^\circ$  de observación), espectroradiómetros y colorímetros, equipos que no tenemos disponibles en nuestros laboratorios locales. Por ello primero propusimos utilizar un espectrofotómetro convencional de configuración  $0^\circ/0^\circ$  (que sólo están diseñados para medir la transmitancia espectral) como una opción de medidor de color de una muestra líquida translúcida, por lo que una pregunta válida es saber ¿cómo este equipo no especializado para medición de color se podría adecuar para tal fin? Además, planteamos analizar estos resultados con otros dos espectrocolorímetros para comprender cuáles de los resultados se corresponden más con el color percibido. Aparte, examinamos la diferencia de color con los parámetros CIELAB.

En el Perú, la falta de programas de estudio en el área de colorimetría hace que se produzcan pocas publicaciones científicas relacionadas al estudio del color, esto se comprobó revisando el portal Alicia que es el repositorio de tesis a nivel nacional, algunas de las tesis encontradas en él no describían especificaciones básicas como: el tipo de geometría de iluminación, el observador estándar y la clase de iluminante utilizado y están identificados en Negueruela (2012) dentro de cuatro grupos de problemas: los métodos oficiales de medida del color de ciertos alimentos, algunos autores no conocen el significado de las coordenadas de color, usan instrumentos de medición que no son adecuados y alimentos que no tienen colores homogéneos.

Por ello, resaltamos la importancia de examinar las metodologías para caracterizar colorimétricamente los zumos de naranja, por una serie de razones: una de ellas es que en el campo de la colorimetría se necesita aclarar las interpretaciones de las medidas colorimétricas en muestras de tipo translúcidas por los métodos espectrofotométricos, además esta investigación sería de utilidad para los profesionales de la industria alimentaria y áreas afines porque son ellos los encargados de evaluar el color como uno de los indicadores de frescura y madurez de un producto.

El propósito central de esta tesis será realizar un análisis de la caracterización colorimétrica de zumos de naranja de diferentes variedades que se expenden en los mercados locales de la ciudad de Lima, mediante la técnica instrumental de espectrofotometría, disponibles en los laboratorios de la PUCP, UNMSM y UNALM. Además, esta investigación busca responder a las siguientes cuestiones:

¿Cuáles son las medidas del color de los zumos de naranja que se consumen en Lima?

¿Es posible diferenciar los zumos de naranja según su variedad utilizando los valores CIELAB?

¿Cómo se podría utilizar un espectrofotómetro como medidor de color de muestras translúcidas?

¿Qué metodologías se deben seguir para medir el color del zumo de naranjas por espectrofotometría?

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Análisis y caracterización del color de zumos de naranja consumidas en la región Lima mediante espectrofotometría.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Obtener las medidas colorimétricas en muestras de zumos de naranja consumidas en Lima metropolitana.
- b. Demostrar el uso de un espectrofotómetro para la cuantificación del color en muestras de zumos de naranja.
- c. Examinar metodologías para la caracterización colorimétrica de zumo de naranja (factible de aplicar a otras muestras translúcidas)
- d. Explorar la utilidad de los valores colorimétricos del espacio CIELAB para diferenciar los zumos de naranja según su variedad expendidos en mercados locales de Lima.
- e. Crear una base de datos espectrocolorimétrica de los diferentes zumos de naranja expendidos en diferentes mercados locales de Lima

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 TÉRMINOS Y CONCEPTOS BÁSICOS DEL COLOR.

Meléndez-Martínez, Vicario y Heredia, (2005) señalan que “El color es una respuesta de percepción mental al espectro visible de luz (distribución de la potencia luminosa en función de la longitud de onda) reflejada o emitida por un objeto. Dicha señal de respuesta interactúa en el ojo con la retina y luego es transmitida al cerebro por el nervio óptico, lo que hace que los humanos asignen colores a esta señal. Por tanto, el color no es una propiedad intrínseca del objeto, ya que, si se cambia la fuente de luz, el color del objeto también cambia”.

Wu & Sun (2013) describen a la percepción del color como un fenómeno muy complicado que varía con la composición del objeto, las características del ojo humano, el cerebro que los percibe, los ángulos de iluminación y visión y el entorno de la iluminación.

Cuando la luz incide sobre un objeto, una o más cosas pertinentes al color pueden suceder: una reflexión especular y difusa, transmisión regular y difusa, y absorción, mostrado en la Figura 1 . Los materiales que solo reflejan o absorben la luz son opacos. Cuando la luz se transmite a través del material sin cambiar su dirección, es transparente. Los materiales translúcidos reflejan y transmiten la luz incidente. La distribución geométrica de la luz reflejada y transmitida depende tanto de la dispersión superficial como interna. (Berns ,2019, p.114)

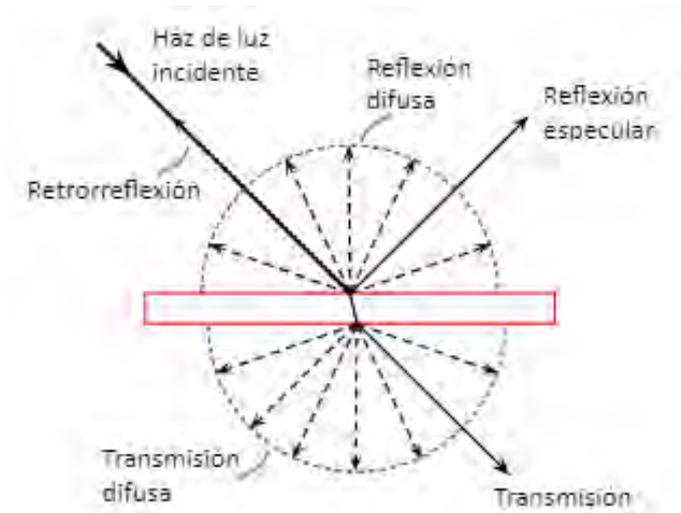


Figura 1. Un rayo de luz incidente en un material translúcido. La luz no reflejada o transmitida es absorbida. Adaptado de: “principles of color technology. John Wiley & Sons” por R. Berns, 2019, p.115

Entender la interacción entre la luz incidente y el material, es el primer paso para definir el color.

Berns, menciona que, para describir el color, debemos hablar de acciones físicas, como producir un estímulo en forma de luz, tanto directa como indirectamente al interactuar con un material, y de resultados subjetivos, como recibir e interpretar este estímulo en el ojo y el cerebro o sistema visual. (p.2)

Marchante Rodríguez et al (2010) consideran como elementos condicionantes de color a los tres elementos principales que conforman la percepción del color: la fuente luminosa, el objeto y el observador, además según su interacción principal de la luz con el objeto los llama como color reflejado, color transmitido y color auto luminoso, este último refiere al color percibido directamente de una fuente luminosa, esto se observa en la Figura 2.



Figura 2. El color resulta de la interacción de una fuente de luz, un objeto y el ojo y cerebro o sistema visual.

Para definir los tres elementos necesarios para la medición del color, la fuente luminosa, el objeto y el observador se tratará con mayor detalle en la sección 2.4.

Por otro lado, Wyszecki (1978) divide los conceptos colorimétricos en dos categorías: conceptos psicológicos y conceptos psicofísicos. Los conceptos psicológicos del color refieren a la percepción del color, que habilitan al observador individual para describir su percepción del color. Los conceptos psicofísicos del color refieren a la igualación del color de un campo fotométrico con otro y al juzgamiento de similitudes y grados de diferencia entre estos dos campos.

Wyszecki define al color bajo **los conceptos psicológicos** como un aspecto de la percepción visual por el cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos de visión del mismo tamaño, forma y estructura, tal que pueden ser causadas por diferencias en la composición espectral de la radiación concerniente a la observación. En

ese sentido el término de color es frecuentemente usado con el adjetivo *percibido* para distinguirlo del mismo término usado en el sentido psicofísico. (p. 9-2)

A continuación, daremos algunas definiciones y terminologías relacionadas al color:

**Estímulo de color**, Flujo radiante capaz de producir una percepción del color

**Tono (matiz)**, “atributo de la percepción del color mediante el cual se juzga que un color es rojo, naranja, amarillo, verde, azul, violeta, o intermedio entre pares adyacentes de estos colores, considerados en un anillo cerrado (rojo y morado son un par adyacente)”. (ASTM E-284-13b, p.13)

**Croma**, (1) “atributo de color utilizado para indicar el grado de divergencia del color a un color neutro de la misma claridad” (ASTM E-284-13b, p.5)

(2)  $C^*$ , (en el sistema CIE 1976  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  o  $L^*$ ,  $u^*$ ,  $v^*$ ), la cantidad  $C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$  o  $C_{uv}^* = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}}$  (1989b).

(3) “atributo de una percepción visual, producida por el un objeto color, que permite juzgar la cantidad de color cromático puro presente, independientemente de la cantidad de color acromático. (1995)” (ASTM E-284-13b, p.5)

**Claridad/Luminosidad**, es el “brillo de un área juzgada relativa al brillo de un área similarmente iluminada que parece ser blanco o altamente transmisible”. (CIE, 2020, p.46)

Es un atributo de la sensación visual que permite el juzgamiento del grado del cual un estímulo cromático difiere de un estímulo acromático del mismo brillo.

En (ASTM E-284-13b, p.14) definen a la claridad/luminosidad (lightness) de dos formas:

(1) el atributo de percepción del color por el cual se juzga que un cuerpo no auto luminoso refleja más o menos luz.

(2) el atributo por el cual se juzga que un color percibido es equivalente a uno de una serie de grises que van del negro al blanco.

**Temperatura correlacionada del color (TCC):** Temperatura usualmente expresada en kelvin, de un radiador de cuerpo negro que se parece más al color de una fuente de luz.

(Berns, 2019, p.149)

### **Índice de reproducción cromática (CRI).**

(1) Medida del grado en que la cromaticidad calculada de una muestra de color de prueba CIE iluminada por un iluminante de prueba se ajusta a la de la misma muestra iluminada por un iluminante de referencia. (ASTM E-284-13b, p.6)

(2) En las fuentes de luz para iluminación o con fines colorimétricos, el CRI es una medida de cuán fielmente se pueden percibir los colores cuando se iluminan con una fuente de luz en relación con una fuente de luz ideal, como un cuerpo negro o la luz del día es muy importante.

**Conceptos psicofísicos,** el color es la especificación de un estímulo de color (radiación visible entrante al ojo y produciendo una sensación de color cromático o acromático) en términos de valores definidos como los valores triestímulo. (CIE, 2020, P.61).

Ohta y Robertson (2006, p. 48) definen la especificación de color como un medio de expresar el color cuantitativamente y los valores cuantitativos se denominan valores de especificación de color. Un sistema de especificación de color, que comprende una serie de definiciones, se denomina sistema de color. Los sistemas de color incluyen sistemas de apariencia de color y sistemas de mezcla de colores. Los sistemas de apariencia del color

se basan en la percepción del color, pero se definen y/o ilustran en términos de estándares de materiales y su apariencia en condiciones específicas. Los sistemas de apariencia del color son subjetivos, porque se basan en una impresión psicológica, llamada percepción del color.

Por otro lado, los sistemas de mezcla de colores se basan en las cantidades de luz de color mezclada necesarias para obtener una coincidencia de color con un color de prueba en un experimento de mezcla de colores. Los sistemas de apariencia de color y los sistemas de mezcla de colores se comparan en la Tabla 1. Respecto a los sistemas de mezcla de colores Berns (2019) hace referencia de ellos como sistemas de igualación de color, base para la colorimetría CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage* o Comisión Internacional sobre Iluminación)

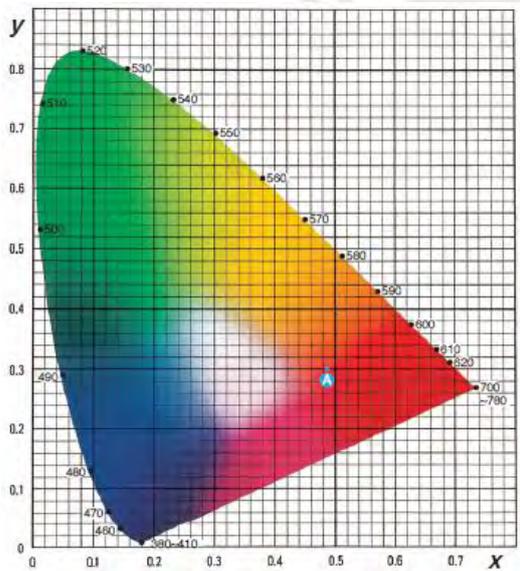
La Figura 3 (a) y (b) muestra algunas de las ejemplificaciones de sistemas de apariencia de color denominados Munsell y NCS, la Figura 3 (c) y (d), muestra los sistemas basados en la igualación de color conocidos como el espacio CIE XYZ con el diagrama cromático y el espacio CIELAB obtenidos a partir de los valores triestímulos X, Y y Z, estos se tratan con más amplitud en la sección 2.4.5



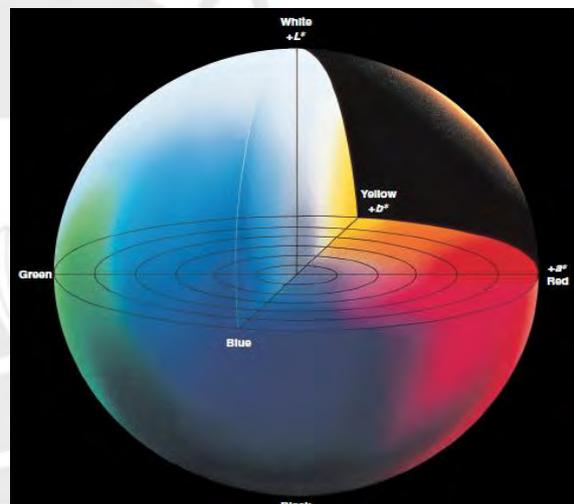
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3. (a) Ejemplificación del árbol de color Munsell, (b) Formato de presentación del sistema NCS. obtenido de: "Presentaciones de Ciencia del Color" por Marchante Rodríguez, Verónica, et al. (2010) (c) Espacio de color CIE XYZ, muestra del diagrama de cromaticidad xy, (d) Espacio de color CIELAB, que se obtiene a partir de los valores triestímulo X, Y y Z, obtenido de "Precise color communication" Konica Minolta (2007).

Tabla 1. Comparación entre los sistemas de mezcla de colores y los sistemas de apariencia del color, traducido de (Ohta y Robertson, 2006, p.49)

	Sistemas de mezcla de colores	Sistemas de apariencia de color
Categoría Bases Principios	Color psicofísico Sensación del color Luz de mezcla de colores	Color percibido Percepción del color Apariencia del color de materiales estándar
Objeto de expresión Ejemplo típico Especificación de valores	Color de la luz CIE Valores colorimétricos (valores triestímulo)	Color del objeto Munsell Apariencia de color Valores (tono, luminosidad y croma)
Procesos para la expresión del color	Conversión del color Función de estímulo en valores psicofísicos usando funciones de igualación de color	Igualación visual del color con materiales estándar o conversiones de valores colorimétricos

## 2.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

P. Joshi (2002) escribió *Colour measurement of foods by color reflectance* en el capítulo 5 del libro titulado *Colour in food*, que es sorprendente la poca información que se da en gran parte de la literatura disponible sobre medición de color, en relación con los siguientes aspectos:

- La elección de la geometría de visualización y el tipo de iluminación (que es asociado con la selección del instrumento)
- La calibración del instrumento, incluida la definición de los estándares de calibración.
- La selección de las variables del instrumento como son las áreas de apertura e iluminación.
- La selección, preparación y presentación de las muestras.

- La definición de otros detalles relevantes del procedimiento de prueba, como la temperatura.

De éstos, rescatamos las recomendaciones sobre la selección, preparación y presentación de las muestras, donde las muestras en términos ópticos pueden dividirse en cuatro principales clasificaciones 1. Objetos opacos, 2. Objetos metálicos, 3. Objetos transparentes y 4. Objetos translúcidos, Este último es de nuestro interés ya que el zumo de naranja entraría en la clasificación de translúcido (material entre transparente y opaco) donde parte de la luz que cae sobre un objeto translúcido puede pasar a través de él en la dirección de la luz, pero el resto se difunde dentro de él y emerge en diferentes direcciones. Como consecuencia, el tamaño de la abertura de medición puede influir en gran medida en la cantidad de luz recogida, como se observa en la Figura 4.

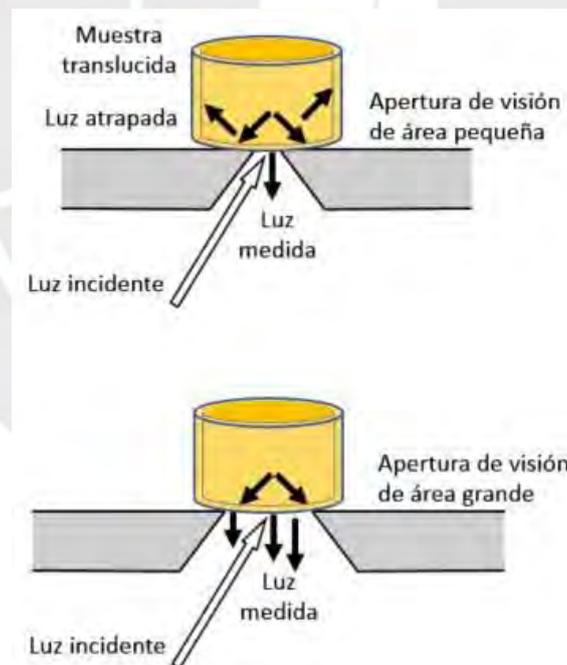


Figura 4. En alimentos translúcidos, la difusión de la luz incidente resulta en pérdida de medición, usando un área larga de apertura, consigue que este atrape la luz para ser medida. Adaptado de “*Colour measurement of foods by color reflectance*”, por P. Joshi, 2002, p.92.

Pérez-López *et al* (2006), en su trabajo de investigación titulado “Changes in orange juice color by addition of mandarin juice” utiliza el equipo ColorFlex de la marca Hunterlab con el iluminante D65 y observador de  $10^{\circ(1)}$ , cuyas medidas del color están en la escala CIELAB y CIELCH (esta nomenclatura para designar el color será revisada en el inciso 2.4.5.2). El equipo que usan mide el color por reflexión, usa una geometría  $45^{\circ}/0^{\circ 2}$  e indican esta calibrado con las escalas visuales de colores para zumo de naranja de USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), por ello usan recipientes tubulares para colocar las muestras.

Leggett (2008, p.11) menciona para la medición del color de bebidas que pueden contener pulpas que pueden causar dispersión significativa, recomienda usar una celda de 10 mm de espesor en transmisión con un instrumento de esfera, con buen tamaño de apertura de campo sobre la muestra en un promedio de 2 a 4 lecturas, con el incremento de contenido de sólidos. En el caso de muestras translúcidas, recomienda medirlas en una celda delgada de 2 mm de espesor con un instrumento de transmisión, o hacer la celda de mayor espesor y medir en reflectancia. Alternativamente, el uso de una celda respaldada con una placa blanca puede permitir mediciones de color por transreflectancia (ver Figura 5). En tales casos, la longitud efectiva de la ruta es el doble que la de la celda, ya que la luz iluminante viaja a través de la muestra, se refleja desde la placa blanca o el respaldo del espejo, y luego atraviesa nuevamente la muestra antes de ser medida. Para visualizar la transreflectancia la mostramos en la Figura 5 con la geometría ( $45^{\circ}/0^{\circ}$ ).

---

<sup>1</sup> Información del iluminante D65 y el observador de  $10^{\circ}$  se definen en las secciones 2.4.6 y 2.4.3 de esta tesis.

<sup>2</sup> La geometría  $45^{\circ}/0^{\circ}$  y otras geometrías ópticas que son referidas en esta sección, están explicadas en la sección 2.5.1

Legget también menciona que la geometría de visualización también debe especificarse como parte de las condiciones instrumentales. En general, se acepta que, con las muestras de alimentos, la mayoría de las aplicaciones se pueden cubrir sin mucho compromiso utilizando las geometrías  $0^\circ/45^\circ$ ,  $45^\circ/0^\circ$  (fuente/detector) y de esfera difusora;  $45^\circ/0^\circ$  es la geometría preferida cuando se examina el color reflejado de muestras translúcidas, también es satisfactorio para muestras opacas, siempre que las muestras que se comparen sean de igual textura o brillo.

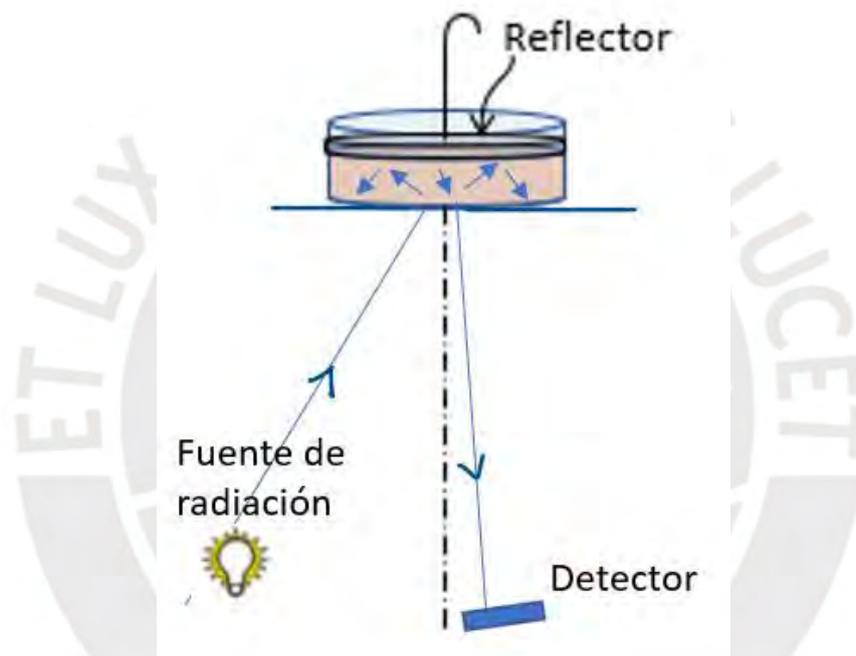


Figura 5. Esquema de la medición de una muestra translúcida por transreflectancia, con la geometría  $45^\circ/0^\circ$ .

(HunterLab, 2008) en una nota aplicativa titulada *Measuring Translucent Liquids Using the Ring and Disk Set*, indica que usaron accesorios de disco y anillo que pueden ser usados para la medición de líquidos translúcidos en instrumentos de la marca Hunter Lab de configuración óptica  $45^\circ/0^\circ$  y los instrumentos tales como: ColorFlex 45/0, ColorQuest 45/0, D25A, LabScan, or MiniScan 45/0 LAV. Donde se usan un anillo y disco como accesorios, para el control de las características del líquido y sus extra-

interacciones con la luz (difusión y transmisión) que son asociadas con muestras de líquidos translúcidas, haciendo que éstas muestras se parezcan más a las opacas.

También fueron usados un disco blanco cerámico colocado en el tope del líquido, para crear un entorno blanco, que cuando la luz atravesase el líquido luego éste regrese al detector. Con el disco blanco la muestra de zumo aparece más iluminada y saturada, lo antes descrito lo mostramos en la Figura 5, mientras que al usarse una cubierta opaca no se observaron cambios significativos en los valores del tono y saturación del color del zumo de naranja.

Aunque para este trabajo no contamos con el instrumental en configuración  $45^{\circ}/0^{\circ}$ , tendremos de referencia los valores colorimétricos encontrados, en el reporte no se esclarece a que variedad de naranja corresponde esos valores.

Por otro lado, MacDougall (2010, p.57) reporta la medida del color de diferentes alimentos, entre ellos el zumo de naranja. En la Figura 7, se muestra el espectro de reflectancia promedio del zumo de naranja, y en la Figura 6 se muestra la ubicación de las muestras en la escala CIELAB de diversos alimentos entre ellos el zumo de naranja. Los tripletes de puntos para cada muestra indican que con el iluminante D65 se obtiene valores  $b^*$  más bajos, que es más azul como se esperaría, y con los iluminantes A y 83 son más amarillos con A más rojo que con 83 con valores  $a^*$  más altos. Estos resultados son paralelos a la observación visual de los productos visto bajo tungsteno, luz diurna artificial (D65) y lámparas Philips 83. Este estudio demuestra claramente que la interpretación de CIELAB debe estar relacionada con las condiciones de iluminación en la práctica, entonces D65 no debería ser el único iluminante utilizado para calcular el color de los alimentos.

Macdougall también aclara que, aunque D65 es el espectro del iluminante de referencia más utilizado para calcular los valores de color en la escala CIELAB, los más importantes para relacionar la medición del color de los alimentos con el color visual en la práctica son A y 83. A es el espectro de emisión de la iluminación de tungsteno y 83 es del tipo de iluminación fluorescente 'tri-banda', similar al F11<sup>3</sup>. Sin embargo, con el 83, el fósforo rojo aumenta en 25 por ciento sobre el de F11 y el fósforo verde se reduce en aproximadamente 12 por ciento, lo que le da a la lámpara una apariencia cálida (3000 K) similar a la del tungsteno, pero con una reducción considerable de utilización de energía. El 83 ahora se usa comúnmente para exhibir alimentos en los supermercados debido a su atractivo, reproducción agradable y realista del color y baja emisión de calor.

En las conclusiones el autor indica que es importante darse cuenta de la amplia variabilidad en la naturaleza de los alimentos y productos alimenticios, tanto por su estructura como por su pigmentación, puede limitar cualquier técnica de medición del color aplicable solo a ese alimento en particular (p.57). Esto se debe a que es poco probable que el nivel numérico de los datos coincida con la experiencia visual de los atlas de colores de referencia equivalentes. En algunos casos, esta discrepancia puede ser grande y debe reconocerse como una propiedad intrínseca del alimento. Estas diferencias pueden surgir de la diferencia de la experiencia visual del producto cuando se ve en condiciones normales de iluminación en contraposición a las limitaciones de sus propiedades ópticas cuando se presenta al instrumento de medición de color particular. Esto es particularmente cierto en el caso de alimentos translúcidos. Es probable que los

---

<sup>3</sup> F11 es un tipo de iluminante perteneciente a la serie F para lámparas fluorescentes

valores de claridad, tono y croma medidos sean bastante diferentes de los de los materiales opacos de colores similares. (p.59)



Figura 6. Valores de color de diferentes productos en el sistema CIELAB, calculado con los iluminantes D65(■), A(●), Y 83(▲), tomado de: “Color in food” por: D. MacDougall, 2010, p. 338

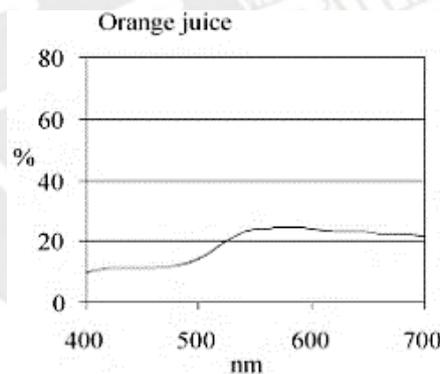


Figura 7. Porcentaje de reflectancia del zumo de naranja, tomado de: “Color in food” por: D. MacDougall, 2010, p. 337

MacDougall, en estudio particular del jugo de naranja, indica que al tener elementos de suspensión translúcida dificulta su medición y la interpretación de los datos entregados por el instrumento debido a la forma en que la luz incidente se dispersa en la muestra.

Los resultados consideran que 4 cm es prácticamente equivalente a un grosor infinito, en la Figura 8, se muestra el espectro de reflectancia de jugo de naranja hasta de una cuádruple concentración en botellas delgadas de poliestireno.

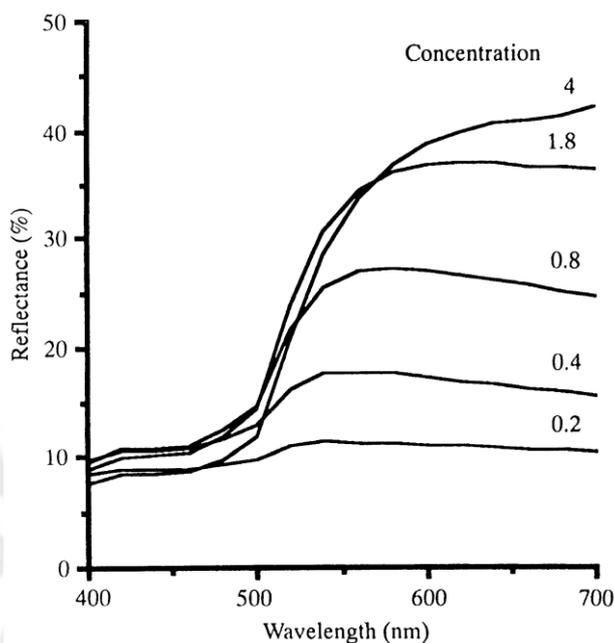


Figura 8. Espectro de reflectancia de jugo de naranja concentrado y diluido a una longitud de camino de 4 cm, tomado de: “Color in food” por: D. MacDougall, 2010, p. 331

Fernández-Vázquez. R *et al* (2010) en su metodología menciona que: “utilizaron 41 muestras de zumos de naranja comerciales, 15 de ellas procedentes de zumo a base de concentrado (ZC) y 26 procedentes de naranjas exprimidas (ZE). En este último grupo, 11 muestras eran de conservación a temperatura ambiente (ZEA) y 15 muestras de conservación en refrigeración (ZER)”.

El color de los zumos de naranja lo midieron con “un espectroradiómetro CAS 140 B (Instrument System, Munich, Alemania) equipado con una sonda Top 100 (Instrument System, Munich, Alemania) y un zoom Tamron mod. SP23 (Commack, Estados Unidos) con un iluminante D65, y observador 10° como referencia”. El mismo método e instrumental fue aplicado en su tesis doctoral: el color de los zumos cítricos, implicancias

sensoriales y desarrollo Metodológico (Fernández-Vázquez, 2013), el equipo indicado no es por la técnica que planteamos en este trabajo, pero consideramos ponerlo de referencia ya que también el interés es hacer la caracterización colorimétrica del zumo de naranja.

Schvab *et al.* (2013), en su artículo de investigación titulada “Parámetros de Calidad de jugos de naranja Enterrerianas” sólo mencionan que utilizaron un colorímetro triestímulo para medir el color del zumo de naranjas de diferentes variedades. En este trabajo de tesis no usamos colorímetros triestímulo, pero consideramos tener esos valores como referenciales.

También Conesa, Manera, Zapata, Baños, & Andujar (2015) en su trabajo de investigación mencionan acerca de “La clasificación del zumo de naranja por parte de la USDA en base a seis patrones de distinto color que relacionan color con grados Brix y va del más claro (OJ6) al más oscuro (OJ1), que sirven para comparaciones de color directa”. Donde usaron un colorímetro triestímulo CR-300 de Minolta (hoy discontinuado) y calibrado con el estándar (OJ4), utilizaron frutos de naranja de distintas variedades: Salustiana, Navelina, Newhall, Washington Navel, Navelate, Cara-Cara, Sanguinelli y Tarocco) procedentes de una finca colombiana, las medidas del color lo realizaron por reflexión, con el iluminante C que es atípico de usar y no mencionan el tipo de observador estándar que usan.

El autor hace uso del índice de color en el espacio HunterLab como:  $IC = \frac{1000L}{ab}$ , donde L, a y b son los parámetros HunterLab. El índice IC es frecuentemente usado para determinar la fecha de cosecha o decidir si los frutos cítricos debieran someterse o no a un tratamiento de desverdeado. Consideramos esta referencia porque además muestra los

valores de croma y tono de color de diferentes variedades de naranja, para tenerlo de referencia con fines de compararlo con nuestros resultados.

### **2.3 LA NARANJA Y SUS VARIEDADES EN EL PERÚ.**

De las Casas Cáceres, A. et al (2013, p.1) menciona que “según el diccionario de la Real Academia Española, la naranja es el fruto del naranjo, tiene forma globosa, mide entre seis a ocho centímetros de diámetro, presenta una corteza rugosa de color entre rojo y amarillo, la pulpa está dividida en gajos, comestible, jugosa, y de sabor agridulce. Esta fruta pertenece al género Citrus de la familia de las Rutáceas, la cual consta de unas 20 especies”.

El autor añade que las naranjas se clasifican en cuatro grandes grupos: Navel, Blancas, Sanguíneas y Sucreñas. (p.2)

Grupo Navel. “Son de gran tamaño, con un ombligo opuesto al pedúnculo, son fáciles de pelar y sin pepitas; como fruta fresca son de excelente calidad, pero no son adecuadas para preparar zumos, por el sabor amargo que adquiere el zumo y el poco jugo que se obtiene; además, se adaptan bien a climas subtropicales. Las más importantes son: Bahianinha, Lane Laten, Leng, Navel, Navelate, Navelina, Newhall, Ricalate, y Washington o Bahía”. (p.2)

Grupo Blancas. “Son de forma esféricas, achatadas o elipsoidales, de tamaño medio a grande y sin ombligo; presentan unas gamas de colores que van desde amarillo hasta naranja intenso, se utilizan mayormente para hacer zumo, en cambio como fruta fresca el exceso de semillas en algunas variedades puede resultar un inconveniente. Las más importantes son: Ambersweet, Hamlin, Pera, Salustiana, Jaffa o Shamout, y Valencia Late”. (p.2)

Grupo Sanguíneas. “Son muy similares a las variedades blancas, pero se diferencian en que sintetizan pigmentos rojos (antocianinas) en la pulpa y a veces en la piel. Esta coloración rojiza solo se produce si se dan bajas temperaturas nocturnas. El zumo de las naranjas sanguinas tiene un sabor especial que recuerda al de las cerezas o frambuesas. Las más importantes son: Doble Fina, Maltaise, Moro, Sanguinelli, y Sanguinello” (p.3)

Grupo Sucreñas. “Son variedades con menor acidez y ligeramente insípidas, por lo que a la fecha apenas se cultivan. Las más importantes son: Succari, Sucreña, Lima, y Vaniglia” (p.3)

Los autores señalan que:

El Perú produce, principalmente, las siguientes variedades de naranjas: Valencia, Washington Navel, Newhall, Navel Late, y Lane Late. Las más importantes para la exportación de naranjas como fruta son las Navel y dentro de ellas la variedad Washington Navel, y para consumo como zumo se encuentra la variedad Valencia, que es una naranja blanca. (p.3)

De las Casas Cáceres et al, también mencionan que:

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Riego - MINAG (2013), la producción nacional de naranjas en 2011 fue de 418,631 T, con un incremento del 6% con respecto al año anterior y una superficie cosechada de 27,027 Ha. Las principales zonas productoras de naranjas en el Perú se encuentran en los departamentos de Junín, Lima, San Martín, Puno, Ica, y Cusco. De estos departamentos, el principal productor es el departamento de Junín con más de la mitad de la producción nacional, donde en 2011 obtuvo el 52.3% de la producción de naranjas. (p.4).

## 2.4 COLORIMETRÍA CIE

### 2.4.1 INTRODUCCIÓN

Legget (2008, p.7) señala que el sistema CIE cuantifica el color, como una persona lo percibe. La percepción humana requiere de una fuente de luz, de un objeto que modifique la luz y de una persona que perciba el color del objeto, en el sistema CIE cada elemento de esta triada es representado con números.

MacDougall (2010, p.40) puntualiza que:

El sistema CIE de medición del color transforma el espectro de reflexión y transmisión en un espacio de color tridimensional utilizando la distribución espectral de potencia del iluminante y las funciones de igualación de color de los observadores estándar (CIE 1986). Los procedimientos matemáticos se dan en cualquier texto estándar sobre color, por ejemplo, Wright (1980), Judd y Wyszecki (1975), Hunt (2001) y Berns (2000), (2019). El sistema se basa en el principio tricromático<sup>4</sup>, pero, en lugar de utilizar primarios 'reales' rojos, verdes y azules con su necesidad de correspondencia negativa<sup>5</sup>, utilizan primarios positivos 'imaginarios' X, Y y Z. El primario Y, conocido como reflectancia luminosa o transmitancia, contiene todo el estímulo luminoso. Cada color se puede ubicar de manera única en el espacio de color CIE de 1931 por Y y sus coordenadas de cromaticidad  $x = X / (X + Y + Z)$  e  $y = Y / (X + Y + Z)$ , siempre que el iluminante y el observador estén definidos.

---

<sup>4</sup> Cualquier color puede ser igualado por la suma de tres colores primarios convenientemente elegidos enunciado por Newton (1672), reafirmado por Young (1802)

<sup>5</sup> Ver página 48: Determinación de las funciones de igualación de color  $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$  y  $\bar{z}_\lambda$ .

## 2.4.2 TEORÍA TRICROMÁTICA

En colorimetría, el principal objetivo es obtener la especificación del color en términos de los valores triestímulo, válidos para observadores con visión normal. Para esto las propiedades de igualación de color de un observador ideal son definidas por la especificación de dos grupos de tres funciones independientes de la longitud de onda que son identificadas como las funciones de igualación de color del observador ideal para dos diferentes rangos de campos de visión. (Wyszecki, 1978, p. 9-2)

Bujdud (1999, p.28) en su trabajo de tesis menciona que: “Las leyes experimentales de la igualación de color están resumidas en la generalización tricromática, la cual establece que, sobre una amplia gama de condiciones de observaciones, muchos colores son completamente igualados por medio de mezclas aditivas en cantidades adecuadas de tres colores primarios fijos y la selección de estos primarios no es arbitraria. La forma más fuerte de la generalización tricromática se basa en las leyes de Grassmann, las cuales declaran que la proporcionalidad y la aditividad se mantienen estrictamente sobre un intervalo considerable de condiciones de observación”.

El Comité Español del Color y la Sociedad española de óptica(s.f.) resume a las leyes de Grassmann como: “Las tres leyes empíricas que describen las propiedades de las igualaciones de color de las mezclas aditivas de estímulos de color:

1. Para especificar una igualación de color son necesarias y suficientes tres variables independientes.
2. En una mezcla aditiva de estímulos de color solo importan sus valores triestímulos y no sus composiciones espectrales
3. En una mezcla aditiva de estímulos de color, si uno o varios de los componentes de la mezcla se varía gradualmente.”

## Experimentos de igualación de color

Berns (2019, p.51) explica que una de las formas de simplificar en gran medida la especificación del color es reducir el problema a una igualación de colores. El color para ser reproducido debe coincidir con el color de una muestra vista e iluminado bajo un conjunto específico de condiciones. Si el estándar y su reproducción son ambos materiales, colocaríamos las muestras adyacentes entre sí bajo el conjunto especificado de condiciones. Si estamos comparando luces de colores con muestras materiales, por ejemplo, comparando una pantalla a color con una impresión en color, simplificamos aún más las condiciones de visualización para que la luz emitida por la pantalla coincida con la luz reflejada fuera del papel.

Los experimentos de igualación de colores con la luz se realizaron primero con Newton (1730) a principios de 1700. Encontró que combinando solo las longitudes de onda azul y amarilla podría reproducir luz blanca, como se muestra en la Figura 9.

Este experimento produjo una coincidencia metamérica: diferentes estímulos, uno con todas las longitudes de onda y el otro, sólo con las longitudes de onda del amarillo y azul, produjeron respuestas visuales idénticas. (p.52)

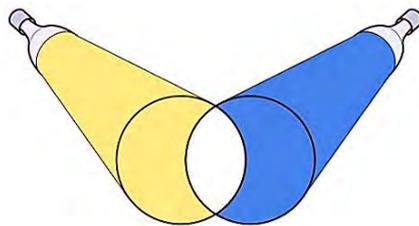


Figura 9. Resultado de mezcla de luz amarilla y azul, tomado de: “*principles of color technology*. John Wiley & Sons” por R. Berns, 2019, p.52.

Imagine que tenemos un dispositivo portátil que genera luz que varía en tono, claridad e intensidad cromática, como se muestra en la Figura 10. Mezclando luces rojas, verdes y azules produce una amplia gama de colores, es decir, un amplio *gamut* de colores.

Con ello se construyó refiere Berns un sistema visual de coincidencia de colores, un proceso a menudo llamado colorimetría visual. (p.52)

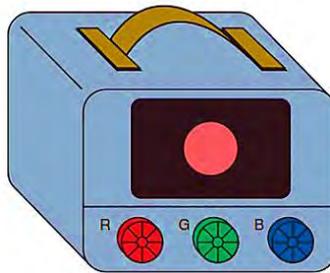


Figura 10. Ejemplo de un colorímetro visual, tomado de: “*principles of color technology. John Wiley & Sons*” por R. Berns, 2019, p.52.

Otro ejemplo que describe Berns es la primera producción del Libro de color Munsell de 1929 que se basó en el giro de un disco, con el cual un conjunto de papeles de colores y su porcentaje de cobertura del área se utilizó para especificar cada designación de Munsell (Berns y Billmeyer 1985). El disco se hace girar a una velocidad suficiente, para que solo se observe un solo color. Esto se conoce como disco de colorimetría.

Todos estos colorímetros visuales indica el autor, están basados sobre el principio del metamerismo. Como consecuencia, una igualación para una persona probablemente no seguirá siendo una igualación cuando sea visto por otra persona. Cuanto mayores sean las diferencias en propiedades espectrales entre la salida del colorímetro visual y el material fabricado, es más probable que surgirán problemas cuando varios observadores estén involucrados en el proceso de especificación. El uso de un colorímetro visual que no es diseñado para una aplicación específica a menudo resultará en metamerismo

significativo. Si pudiéramos reemplazar cualquier observador particular con un observador promedio, esta limitación sería reducida ligeramente, basado únicamente en los principios de las estadísticas. (p.52)

Si este observador promedio fuera estandarizado, el observador estándar, entonces todas las especificaciones serían consistentes, y no dependiente de las propiedades visuales de algún observador en particular. (p.52)

Este concepto, usando colorimetría visual con un observador estándar y un dispositivo estandarizado como método de especificación de color, data de la década de 1920 (Troland 1922). La Comisión Internacional de Iluminación (Comisión Internationale de l'Éclairage, o CIE) quería un método de especificar las luces de color rojo, verde y amarillo utilizadas en el ferrocarril y, poco después, en el control del tráfico (Holmes 1981). El concepto evolucionó rápidamente en un sistema basado en mediciones en el que los estímulos requieren especificaciones que se midieron primero espectralmente. La información espectral se utilizó para calcular los controles del dispositivo estandarizado tales que cuando el observador estándar viera el estímulo, ellos coincidían en color, y se producía una igualación colorimétrica. (p. 52)

La Figura 11 muestra el experimento básico para obtener una igualación de color. El estímulo de prueba (campo de luz de prueba) se proyecta en un lado de un campo bipartito, la mezcla aditiva de los tres estímulos coincidentes (es práctico usar luces monocromáticas rojas, verdes y azules) se proyecta en el otro lado del campo. Mediante el uso de atenuadores de luz ajustables, el flujo de luz de los tres estímulos coincidentes se ajusta para obtener una coincidencia de apariencia de color entre los dos campos. Cuando esta situación es alcanzada el estímulo de prueba se puede caracterizar por los

tres valores de luminancia de los estímulos coincidentes que llegan al ojo del observador.

(Schanda, 2007, p.27)

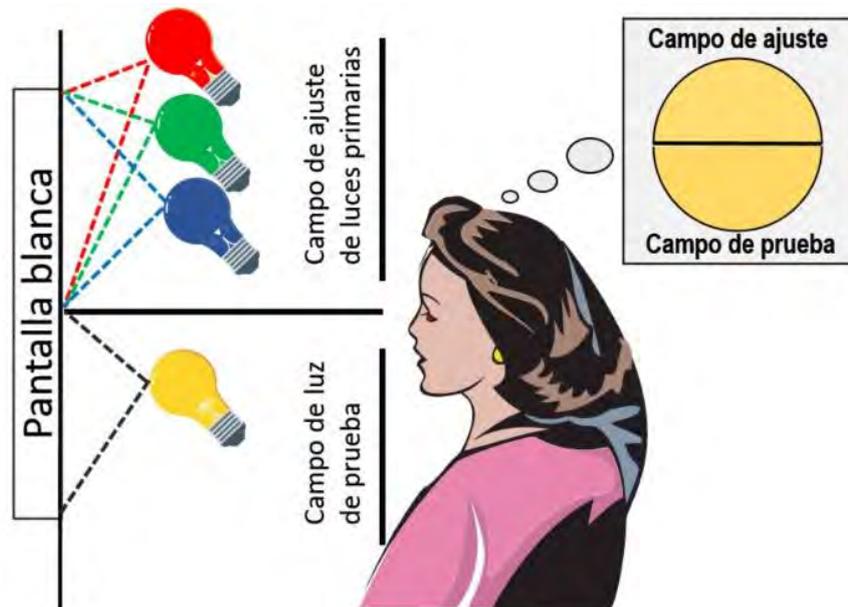


Figura 11. Experimento básico de igualación de color.

Este sistema fue estandarizado por primera vez por la CIE en 1931 (CIE 1931; Judd 1933; Wright 1981b; Fairman, Brill, y Hemmendinger 1997; Schanda 2007). Es el "corazón" de todos los sistemas modernos de medición de color. (Berns, 2019, p.53)

Berns menciona que MacAdam (1993) y Schanda (2007) han compilado un número de publicaciones históricas que forman el marco para colorimetría moderna Richter (1984) ha resumido las contribuciones de los "padres y madres fundadores" de la colorimetría. El informe técnico de la CIE, "Colorimetría", publicación de la CIE 15: 2018 describe las recomendaciones actuales (CIE 2018).

### 2.4.3 DERIVACIÓN DE LOS OBSERVADORES ESTÁNDAR

#### El observador estándar colorimétrico CIE 1931

(Malacara et al, 2001) señalan que la sensibilidad del ojo al color cambia de acuerdo con el ángulo de visión. La CIE originalmente definió el observador estándar en 1931, usando un campo de visión de  $2^\circ$ , llamado observador estándar de  $2^\circ$ .

En 1964 la CIE definió un observador estándar adicional, basado en un campo de visión de  $10^\circ$ . Para entender la diferencia entre ambos tipos de observadores, al compararse la distancia de visión de 50 cm para  $2^\circ$  y  $10^\circ$ , se tiene un campo de visión de  $\phi 1,7$  cm de un círculo para el observador estándar de  $2^\circ$ , mientras que para el observador estándar a  $10^\circ$  en la misma distancia el campo de visión es de  $\phi 8,8$  cm, como se observa en la siguiente Figura 12. (p. 69)

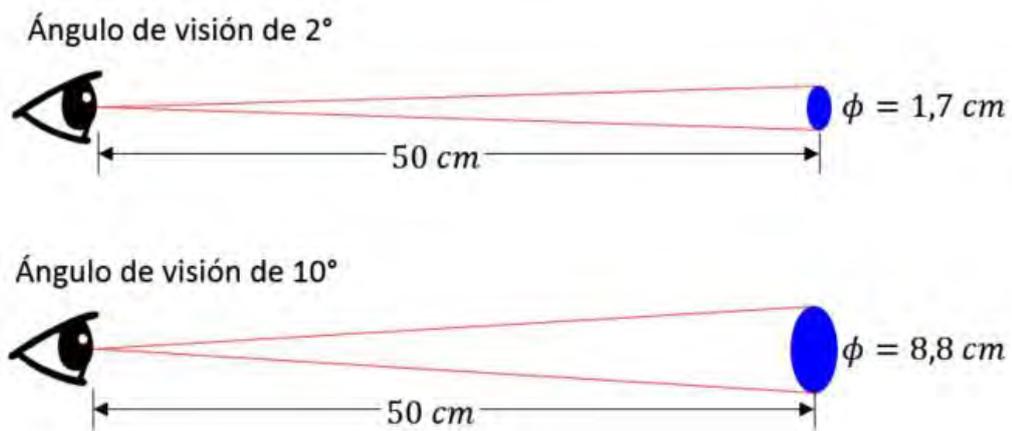


Figura 12. Observadores estándar de  $2^\circ$  y  $10^\circ$ .

Para poder repetir una igualación de color aditiva, las condiciones de observación tienen que ser estandarizadas. Para el observador colorimétrico estándar CIE 1931 se escogió un campo de  $2^\circ$  de observación rodeado de un entorno oscuro. (Schanda, 2007, p29)

### **Determinación de las funciones de igualación de color $\bar{r}(\lambda)$ , $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$**

Schanda (2007, p.29) señala que el observador colorimétrico estándar CIE 1931 se obtuvo de los resultados de dos investigaciones experimentales, realizadas por W. D. Wright y J. Guild. Las dos investigaciones utilizaron diferentes estímulos coincidentes (llamados también "primarios"), pero al transformar los resultados en un sistema común, hubo coincidencia de éstos, a pesar de que el número de observadores eran solo siete en el trabajo de Guild y solo diez en el de Wright.

Para poder definir un observador estándar, deben especificarse las composiciones espectrales y las luminancias de los primarios. Por ello se utilizaron longitudes de onda individuales: 700 nm para el rojo, 546.1 nm para el verde y 435.8 nm para el azul primario. La "unidad de la intensidad" de los primarios se definió indicando sus luminancias. El requisito para un espectro de equienergía, es que la suma de las cantidades unitarias de los tres primarios debería dar una coincidencia de color. Si 1 cd / m<sup>2</sup> de luz roja fue usada, entonces se necesitaron 4.5907 cd / m<sup>2</sup> de luz verde y 0.0601 cd / m<sup>2</sup> de luz azul para que coincidiera con el color de un espectro de luz blanca de equienergía. (p.29)

Bujdud (1999) aclara que “Los tres colores primarios se seleccionaron en base a un experimento que establece que el color de una mezcla de cantidades unitarias de los primarios iguale al color de un estímulo de igual energía, entendiendo por este, como una mezcla aditiva de todos los estímulos monocromáticos que constituyen un espectro continuo de 380 nm a 770 nm en donde cada estímulo monocromático tiene la misma radiancia”. (p.30)

Realizando coincidencias de color usando estos estímulos coincidentes, se obtienen las funciones de igualación de color representados en la Figura 13. Los lóbulos negativos en estas curvas se refieren al hecho de que en algunas partes del espectro se puede obtener una coincidencia solo si se agrega uno de los estímulos coincidentes al estímulo de prueba.

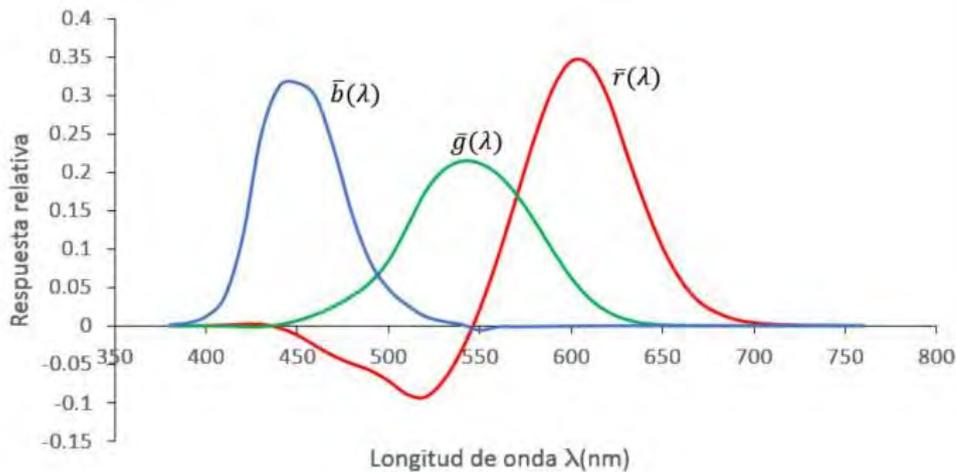


Figura 13. Funciones de igualación de color  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$  del observador estándar de la CIE 1931.

Según Schanda (2007, p.28) para obtener un sistema colorimétrico hay que definir los estímulos coincidentes, especificando tanto su composición espectral como las unidades en las que se miden sus cantidades. Si se hace esto, se puede describir una coincidencia de color de la siguiente forma:

$$[F] \equiv R[R] + G[G] + B[B]$$

Donde [F] es el estímulo desconocido; "≡" se lee como "igualación"; [R], [G], [B] son las unidades de los estímulos coincidentes y R, G, B representan las cantidades que se utilizarán, expresadas en las unidades adoptadas, de los estímulos coincidentes para alcanzar una coincidencia o igualación.

En Ohta y Robertson (2006, p.59) se considera un estímulo de prueba  $[F_\lambda]$  de una sola longitud de onda con una potencia radiante predeterminada (por ejemplo, 1 W). Tal estímulo es conocido como un estímulo monocromático o un estímulo espectral. Sin embargo, un estímulo monocromático en un sentido estricto no puede existir, y, en la práctica, debe haber un rango finito de longitudes de onda, aunque de limitado ancho como 1 nm. Cuando el estímulo de color  $[F_\lambda]$  coincide al mezclar los estímulos de color de referencia  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$ , la ecuación de color está escrito como:

$$[F_\lambda] = \bar{r}(\lambda)[R] + \bar{g}(\lambda)[G] + \bar{b}(\lambda)[B] \quad (1)$$

Donde  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$ , son conocidos como coeficientes de igualación de color.

Luego Ohta indica que al hacer coincidir una luz monocromática  $[F_{\lambda_1}]$  que tiene una longitud de onda  $\lambda_1$  y una potencia radiante  $f_1$ , y otra luz monocromática  $[F_{\lambda_2}]$  que tiene una longitud de onda  $\lambda_2$  y una potencia radiante  $f_2$ , se pueden obtener las siguientes ecuaciones de color.

$$\begin{aligned} f_1[F_{\lambda_1}] &= f_1(\bar{r}(\lambda_1)[R] + \bar{g}(\lambda_1)[G] + \bar{b}(\lambda_1)[B]) \\ f_2[F_{\lambda_2}] &= f_2(\bar{r}(\lambda_2)[R] + \bar{g}(\lambda_2)[G] + \bar{b}(\lambda_2)[B]) \end{aligned} \quad (2)$$

El color  $[F]$  obtenido al mezclar las dos luces monocromáticas arriba se puede expresar de acuerdo con las leyes de Grassmann sumando cada uno de los valores del lado izquierdo y cada uno de los valores del lado derecho para obtener. (p.60)

$$\begin{aligned} [F] &= f_1[F_{\lambda_1}] + f_2[F_{\lambda_2}] \\ &= f_1(\bar{r}(\lambda_1)[R] + \bar{g}(\lambda_1)[G] + \bar{b}(\lambda_1)[B]) + f_2(\bar{r}(\lambda_2)[R] + \bar{g}(\lambda_2)[G] + \bar{b}(\lambda_2)[B]) \\ &= [f_1(\bar{r}(\lambda_1) + f_2(\bar{r}(\lambda_2))][R] + [f_1\bar{g}(\lambda_1) + f_2\bar{g}(\lambda_2)][G] + [f_1\bar{b}(\lambda_1) + f_2\bar{b}(\lambda_2)][B] \end{aligned}$$

Por tanto, se puede ver que los valores triestímulo de  $[F]$  son

$$= [f_1\bar{r}(\lambda_1) + f_2\bar{r}(\lambda_2)][R] + [f_1\bar{g}(\lambda_1) + f_2\bar{g}(\lambda_2)][G] + [f_1\bar{b}(\lambda_1) + f_2\bar{b}(\lambda_2)][B]$$

En general un color [F] obtenido por la mezcla de  $n$  luces monocromáticas  $[F_{\lambda_1}], [F_{\lambda_2}], \dots, [F_{\lambda_n}]$ , con las potencias radiantes  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , respectivamente, puede expresarse por la ecuación de color como sigue:

$$[F] = [f_1\bar{r}(\lambda_1) + f_2\bar{r}(\lambda_2) + \dots + f_n\bar{r}(\lambda_n)][R] + [f_1\bar{g}(\lambda_1) + f_2\bar{g}(\lambda_2) + \dots + f_n\bar{g}(\lambda_n)][G] + [f_1\bar{b}(\lambda_1) + f_2\bar{b}(\lambda_2) + \dots + f_n\bar{b}(\lambda_n)][B]$$

Por tanto, los valores de triestímulo R, G y B del color [F] pueden ser obtenido como:

$$\begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^n f_i \bar{r}(\lambda_i) \\ G &= \sum_{i=1}^n f_i \bar{g}(\lambda_i) \\ B &= \sum_{i=1}^n f_i \bar{b}(\lambda_i) \end{aligned} \quad (3)$$

Como se describió anteriormente, una luz que tiene una distribución espectral  $P(\lambda)$  puede considerarse como un grupo de luces, cada una de las cuales tiene una banda estrecha de longitudes de onda de ancho  $\Delta\lambda$ . Además, una luz que tiene una potencia de  $P(\lambda)$  W/nm en una banda estrecha de longitud de onda  $\Delta\lambda$ , tiene potencia total  $P(\lambda) \Delta\lambda$  en esa banda de longitud de onda. Por lo tanto, los valores de triestímulo R, G y B se pueden obtener sustituyendo  $P(\lambda) \Delta\lambda$  por  $f_i$  en la ecuación (3) (p.61)

$$\begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{r}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ G &= \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{g}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ B &= \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{b}(\lambda_i) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

Cuando  $n \rightarrow \infty$ , las ecuaciones (4) se convierten en integrales

$$R = \int_{vis} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int_{vis} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

$$B = \int_{vis} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

### Derivación del sistema tricromático CIE XYZ del sistema CIE RGB

En Schanda (2007, p.30) indican que, en muchos cálculos colorimétricos, especialmente al momento de estandarizar el sistema tricromático, cuando no había computadoras disponibles, los lóbulos negativos en las funciones de igualación de color (FIC) hicieron los cálculos más difíciles, por lo tanto, en 1931, el CIE decidió transformar los primarios reales [R], [G], [B] a un conjunto de primarios imaginarios [X], [Y], [Z], donde las (FIC) no tienen lóbulos negativos. Otros requisitos fueron que los valores de triestímulo de un estímulo de equienergía deberían ser iguales ( $X = Y = Z$ ), que uno de los valores de triestímulo debería proporcionar cantidades fotométricas, y que el volumen del tetraedro establecido por los nuevos primarios [X], [Y] y [Z] debe ser lo más pequeño posible.

Schanda refiere que, según los requisitos anteriores, se obtiene la siguiente transformación de matriz entre los valores R; G; B y los nuevos valores de triestímulo X; Y; Z: (p. 30)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.768892 & 1.751748 & 1.130160 \\ 1.000000 & 4.590700 & 0.060100 \\ 0 & 0.056508 & 5.594292 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde el valor triestímulo Y puede ser obtenido de la ecuación (5) como:

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B \quad (6)$$

Esto confirma que el valor triestímulo Y es una cantidad fotométrica porque los coeficientes para R G y B (1.0000, 4.5907, 0.0601) están de acuerdo con las unidades luminosas para los estímulos de referencia [R], [G] y [B]. La ecuación (6) define el plano en el espacio de color RGB en el que se encuentran todos los colores de la misma luminancia Y. (Ohta y Robertson, 2006, p.70)

Por otro lado, Los FIC son los valores triestímulo de radiaciones monocromáticas, por lo tanto, las funciones  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  se pueden calcular a partir de las FIC  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$ , usando también la ecuación (5).

La Figura 14 muestra las FIC del observador colorimétrico estándar CIE 1931 denotados por  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  y el observador colorimétrico estándar CIE 1964 denotados por  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  y  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ .

En aplicaciones técnicas, el observador estándar CIE 1931 es a menudo escrito como observador estándar colorimétrico de 2° (un campo visual de 2° representa un diámetro de unos 17 mm a una distancia de visualización de 0,5 m.). La tabla de los valores del observador CIE 1931 (observador estándar de 2°) se pueden revisar en el Anexo a.

Wyszecki (1978) se refiere a  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$ , como los valores espectrales triestímulo, referente a un conjunto de estímulos de referencia (colores primarios), mientras que los valores triestímulo X, Y, Z, son no reales y son escogidos por razones de cómputo colorimétrico.

### **El observador estándar colorimétrico CIE 1964**

Schanda (2007, p.35) señala que el sistema tricromático CIE 1931 se recomienda solo para estímulos pequeños, de 1° a 4°. Sin embargo, también se necesita la descripción de estímulos más grandes, donde el estímulo cae sobre un área de la retina más grande que la cubierta por la mácula lútea, o donde vemos el estímulo parcialmente parafoveal. A tal efecto la CIE estandarizó un sistema colorimétrico de gran campo, basado en las observaciones visuales realizadas en un campo visual de 10°. Un campo visual de 10° representa un diámetro de aproximadamente 90 mm a una distancia de visualización de 0,5 m.

Schanda comenta que el comité W-1.3.1 de la CIE recomendó en 1959 la adopción de un observador colorimétrico de 10°, basado en los trabajos de Stiles y Burch y Speranskaya. En estas investigaciones se utilizaron diferentes conjuntos de estímulos primarios monocromáticos, Las FIC se obtuvieron directamente de las observaciones (p.35). La tabla de los valores del observador CIE 1964(observador estándar de 10°) se pueden revisar en el Anexo b.

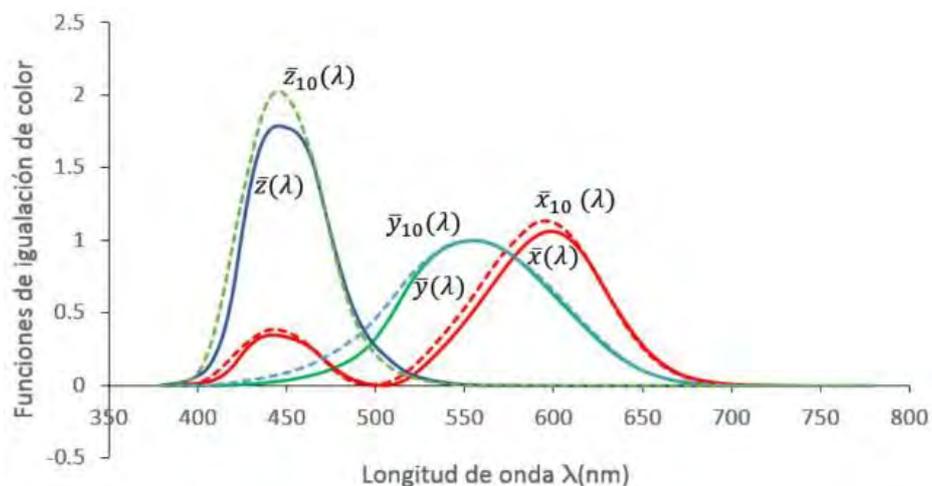


Figura 14. Funciones de igualación de color  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$ , del observador estándar de 2° de la CIE 1931 y en líneas punteadas las FIC  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  y  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  del observador estándar de 10° de la CIE 1964.

#### 2.4.4 CÁLCULO DE VALORES TRIESTÍMULOS PARA OBJETOS

(Ohta y Robertson, 2006, p74) indican que los valores triestímulo X, Y y Z de un estímulo de color  $\phi(\lambda)$  puede ser obtenido directamente usando las funciones de igualación de color  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$X = k \int_{vis} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

$$Y = k \int_{vis} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

$$Z = k \int_{vis} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

Donde, k es una constante, y la integral es tomada en la región visible (vis).

Para un objeto reflectante, el estímulo de color es  $\phi(\lambda)=R(\lambda)P(\lambda)$  y para el objeto transparente esto es:  $\phi(\lambda)=T(\lambda)P(\lambda)$ , donde  $P(\lambda)$  es la distribución espectral del iluminante de luz,  $R(\lambda)$  es la reflectancia espectral del objeto reflectante, y  $T(\lambda)$  es la transmitancia espectral. Por ejemplo, los valores de triestímulo X Y y Z de un objeto reflectante se pueden expresar como:

$$X = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

$$Y = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

$$Z = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

Donde, la constante k es:

$$k = \frac{100}{\int_{vis} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

La constante  $k$  se selecciona de tal manera que el valor triestímulo  $Y=100$  para un objeto perfectamente reflectante ( $R(\lambda) = 1$  para todo  $\lambda$ ). En general,  $R(\lambda) < 1$  para cualquier color de objeto real, y  $Y$  es por lo tanto menor que 100. El valor de triestímulo  $Y$  de un objeto reflectante/transmitante es llamado reflectancia/transmitancia luminosa, está aproximadamente correlacionada con la claridad del color del objeto (p.75).

Berns (2019) indica que los datos de la función de coincidencia de color CIE son un estándar ISO y definido de 360 a 830 nm en incrementos de 1 nm (ISO 2007a). La CIE ha determinado que una longitud de onda de muestreo de 380 a 780 nm con un incremento de 5 nm tiene precisión suficiente al aproximar la integración con suma.

Según (Schanda, 2007, p.32) de acuerdo con las recomendaciones de la CIE, las integraciones de las ecuaciones pueden ser llevadas a sumas numéricas a intervalos de longitud de onda  $\Delta\lambda=1\text{nm}$ , como se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$X = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (14)$$

$$Y = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad (15)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (16)$$

Schanda menciona que en colorimetría distinguen dos clases de estímulos de color:

Los que nos llegan de una fuente de luz primaria directamente, por ejemplo, de una lámpara, un monitor a color, luz solar directa, entre otros y aquellos que llegan de un material reflectante o transmisor, es decir, es la luz reflejada / transmitida, donde el objeto material no luminoso cambia la distribución espectral de la luz por absorción (selectiva). A menudo nos interesan las características colorimétricas de dichos materiales, por

ejemplo, el color de una superficie pintada, la transmisión de un vidrio tintado, entre otros. Para las dos clases, la constante k en las ecuaciones (14), (15) y (16) han sido definidas de diferente forma:

**Valores triestímulos de objetos autoluminosos.** El valor del triestímulo Y es proporcional a una cantidad fotométrica porque  $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ . Se puede calcular una cantidad fotométrica a partir de la radiométrica correspondiente.

$$\phi_v = K_m \int_0^{\infty} \phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda$$

donde  $K_m$  es el valor máximo de la eficacia luminosa de la radiación,  $K_m = 683 \text{ lm/W}$ ,  $\phi_{e,\lambda}$  es una cantidad radiométrica, por ejemplo, radiancia espectral,  $V(\lambda)$  es la función de eficiencia espectral luminosa y  $\phi_v$  es la correspondiente cantidad fotométrica, por ejemplo, la luminancia. (p.32)

Con base en las consideraciones anteriores, si se inserta una cantidad de radiancia espectral en las ecuaciones (7), (8) y (9) o (14), (15) y (16), y k se establece igual a  $K_m$ , obtenemos Y en unidades fotométricas.

En este caso, el mismo k debe utilizarse también para determinar los valores de triestímulo X y Z. En algunos casos, es conveniente establecer  $Y = 100$  y escalar X y Z convenientemente (p. 32).

**Valores triestímulos de objetos no autoluminosos.**

Schanda, (2007, p.33) indica que, en colorimetría, los objetos reflectantes y transmisores se denominan fuentes de luz secundaria u objetos no autoluminosos. Si la luz de una fuente incide sobre un material reflectante o transmisor, parte de esta luz se refleja / transmite y esta luz llega al ojo del observador, por lo que esta parte reflejada /

transmitida es el estímulo que hay que insertar en las ecuaciones (14), (15) y (16) como  $\phi_\lambda$ . La reflexión espectral de la superficie se describe, por ejemplo, mediante el factor de reflectancia espectral  $R(\lambda)$  y la transmisión espectral se describe mediante el factor de transmitancia espectral  $T(\lambda)$ .

Con base en las consideraciones anteriores, la función de estímulo de color relativo,  $\Phi_\lambda$  para objetos reflectantes o transmitentes viene dada por:

$$\phi(\lambda) = R(\lambda) * S(\lambda) \text{ ó } \phi(\lambda) = T(\lambda) * S(\lambda)$$

donde  $R(\lambda)$  es el factor de reflectancia espectral,  $T(\lambda)$  es el factor de transmitancia espectral, del color del objeto y  $S(\lambda)$  es la distribución espectral de potencia relativa del iluminante CIE.

En este caso, la constante  $k$  refiere Schanda, se elige de modo que  $Y = 100$  para objetos para los que  $R(\lambda)$  o  $T(\lambda) = 1$  para todas las longitudes de onda, y por lo tanto:

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) * \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda)}$$

Para calcular los valores de triestímulo  $X_{10}$ ,  $Y_{10}$  y  $Z_{10}$  del sistema creado en 1964, las funciones de igualación de color  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  y  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  son usados en las ecuaciones (7), (8) y (9) en lugar de  $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$  y  $\bar{z}_\lambda$ . Del mismo modo, en el caso de los colores de objetos, las funciones de coincidencia de colores de 1964 pueden ser utilizadas en las ecuaciones (10), (11) y (12). En este caso, sin embargo, aunque el valor triestímulo  $Y_{10}$  representa aproximadamente el brillo, el CIE no ha adoptado oficialmente  $y_{10}$  como la eficiencia luminosa espectral para un campo visual de 10 (Ohta & Robertson, 2006, p.75)

El valor  $Y = 100$  (o 1), asignado a un objeto blanco perfecto que refleja el 100% en todas las longitudes de onda, o a la perfecta muestra incolora que transmite 100% en todas las

longitudes de onda, no hay restricción similar a un valor máximo de X o Z. Sus valores pueden ser mayores o menores que 100 (ó 1).

Por ejemplo, cuando el iluminante D65 y el observador estándar de 1931 se utilizan, los valores para el blanco perfecto o incoloro son aproximadamente  $X = 95$  y  $Z = 109$ .

Para más información ver el anexo *d*, donde se muestran los valores triestímulo de los iluminantes CIE 1931 y CIE 1964.

Las coordenadas de cromaticidad  $x$  e  $y$  se establecen por la intersección del vector de color  $(X Y Z)$  con el plano unitario  $X + Y + Z = 1$  como sigue:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (17)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (18)$$

Las coordenadas de cromaticidad  $x_{10}$  e  $y_{10}$  en el sistema  $X_{10}$ ,  $Y_{10}$  y  $Z_{10}$  se puede definir exactamente de la misma manera. La Figura 15 muestra el locus del espectro en el diagrama de cromaticidad  $xy$  y el diagrama de cromaticidad  $x_{10}y_{10}$ .

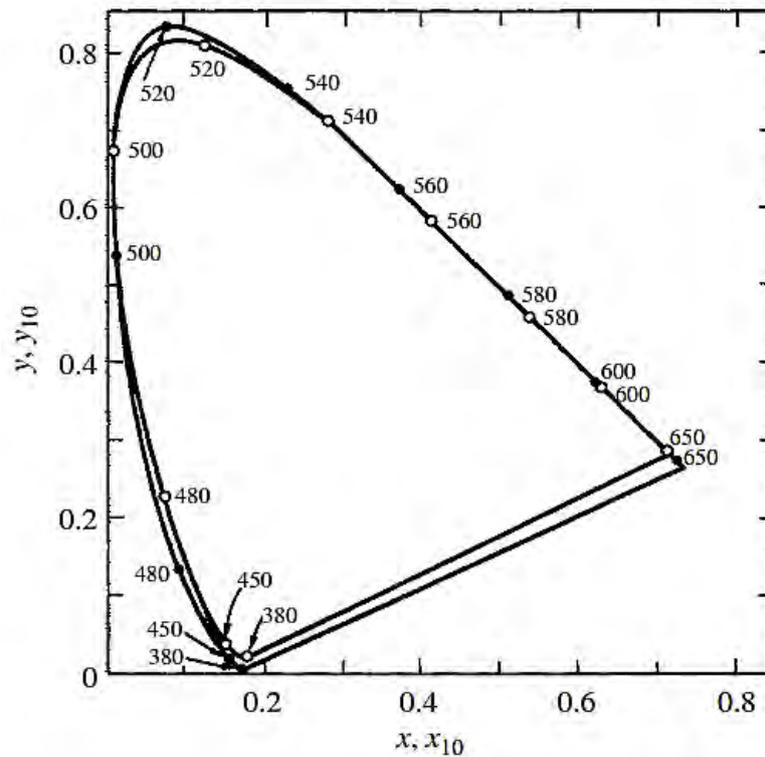


Figura 15. Diagrama de cromaticidad  $xy$  del sistema de especificación de color XYZ (círculos densos) y diagrama de cromaticidad  $x_{10}$  e  $y_{10}$  del sistema de especificación de color a  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  (círculos abiertos) (Ohta & Robertson, 2006, p.76)

A menudo se usa un diagrama de cromaticidad  $xy$  bidimensional para marcar colores. Sin embargo, dado que se necesitan tres piezas de información para especificar el color, se debe agregar un tercero a  $x$  y  $y$  para completar la especificación. Cualquiera de los valores de triestímulo  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  podría ser utilizado, pero en general, se elige la cantidad fotométrica  $Y$  y los colores se expresan por  $(x, y, Y)$ . (Ohta & Robertson, 2006, p.76)

## 2.4.5 SISTEMAS DE COLOR CIE

### 2.4.5.1 ESPACIOS DE COLOR

(Malacara, Z., Pérez, G., Rodríguez, N., García, R., & Nieto, C., 2001). mencionan que

“Los detectores comunes de la luz y el color son el ojo, el sistema nervioso y el cerebro.

Los detectores fotosensibles de la retina se denominan bastones y conos por su forma. Los bastones se activan en la oscuridad y sólo permiten distinguir el negro, el blanco y los distintos grises”.

Artigas, J., Capilla, P., & Pujol, J. (2002) al respecto añade que hay tres tipos de conos que son sensibles a la luz en longitudes de onda distintas, conos tipo S (sensible al azul 445 nm), tipo M (sensible al verde 535 nm), tipo L (sensible al rojo 575 nm). Los ojos humanos son mucho más sensibles al rojo y el azul, remarcan que “los tres tipos de conos y el cerebro interpreta el color como efecto de señales recibidas desde los conos, este mecanismo de percepción del color esa basado en la mezcla de color aditivo”.

(Pascale, 2003, citado en Wu & Sun, 2013) describe el espacio de color como una representación matemática para asociar valores triestímulo con cada color, mencionan tres espacios de color: espacios orientados al hardware, espacios orientados a los humanos y espacios instrumentales, algunos espacios de color son formulados para ayudar a las personas a seleccionar colores y otros son formulados para facilitar el procesamiento de datos en máquinas (adquisición de imágenes, almacenamiento y visualización). (p. 2)

Los espacios de color orientado a hardware más populares son el espacio RGB (rojo, verde y azul), YIQ (luminancia, en fase, cuadratura) y CMYK (Cyan, magenta, amarillo y negro) los cuales son principalmente utilizados para la transmisión de televisión y en la impresión y copia respectivamente, y por lo tanto no se utilizan para la medición del color en la industria alimentaria. (p. 2)

Los espacios orientados al ser humano corresponden a los conceptos de tinte, matiz y tono, que son definidos por un artista basado en las características intuitivas de color. En

general, los espacios orientados al ser humano se basan en el tono y saturación (HS), tal como HSI (tono, saturación, intensidad), HSV (tono, saturación, valor), HSL (tono, saturación, luminosidad), y HSB (tono, saturación, brillo). El color en espacios basados en HS (tono y saturación) se define usando las coordenadas cilíndricas. Siendo que estos espacios se desarrollan en base al concepto de percepción visual en los ojos humanos, sus medidas de color son fáciles de usar y tienen una mejor relación con el significado visual de las superficies de los alimentos. Sin embargo, los espacios orientados al ser humano, como con respecto a la visión humana, no son sensibles a una pequeña variación en color, y por lo tanto no son adecuados para evaluar cambios de color del producto durante el procesamiento. (p. 3)

Para el interés de este trabajo de tesis estudiaremos el espacio instrumental, que son usados para instrumentos de color que en su mayoría son estandarizados por la Commission Internationale d'Eclairage (CIE) sobre una serie de condiciones estándar (Iluminantes, observadores y metodología espectral). Según (Wu & Sun, 2013) este espacio no se le parece a los espacios orientados a hardware ya que tienen diferentes coordenadas para el mismo color para varios medios de salida mientras que las coordenadas de un espacio instrumental son las mismas en todos los medios de salida.

En la medida del color de alimentos el espacio de color  $L^*a^*b^*$  es el más utilizado debido a la distribución no uniforme de los colores y porque es perceptualmente uniforme, explican que la distancia euclidiana entre dos colores diferentes corresponde aproximadamente a la diferencia de color percibida por el ojo humano. (Leon, Mery, Pedreschi, & Leon, 2006 citado en Wu & Sun 2013)

### 2.4.5.2 ESPACIO DE COLOR CIELAB

Malacara D. (2011, p.116) refiere que en 1976 la convención CIE recomendó el espacio de color CIE L\*a\*b o CIELAB principalmente usado en la industria plástica, textil y de pinturas. La luminancia está representada a lo largo del eje z en el sistema cartesiano de coordenadas, con valores de cero para el negro a 100 para un cuerpo perfectamente blanco (reflectancia constante  $R(\lambda) = 1$ ). El eje positivo  $a^*$  representa la cantidad de rojo púrpuro, mientras que el eje negativo de  $a^*$  representa la cantidad de verde. El eje positivo  $b^*$  representa la cantidad de amarillo y el eje negativo  $b^*$  representa la cantidad de azul. La máxima magnitud posible de los valores de estos ejes está en función de la luminancia, entre  $\pm 100$  y  $\pm 200$  para  $a^*$  y  $b^*$  respectivamente.

Las ecuaciones de transformación usadas para pasar del sistema CIE XYZ al sistema CIE L\*a\*b, según Konica Minolta (2007) son:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (19)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (20)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (21)$$

si  $\frac{X}{X_n}$ ,  $\frac{Y}{Y_n}$  o  $\frac{Z}{Z_n}$  es menos que 0.008856, las ecuaciones anteriores se cambian como se describe a continuación.

$$\left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} \text{ es reemplazado por } \frac{841}{108} \left( \frac{X}{X_n} \right) + \frac{16}{116}$$

$$\left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \text{ es reemplazado por } \frac{841}{108} \left( \frac{Y}{Y_n} \right) + \frac{16}{116}$$

$$\left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} \text{ es reemplazado por } \frac{841}{108} \left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{16}{116}$$

Donde X, Y, Z son los valores triestímulo del color del objeto de prueba y los valores triestímulo  $X_n, Y_n$  y  $Z_n$  corresponden a los valores triestímulo de un perfecto difusor cuando es iluminado con el iluminante y observador estándar seleccionado, estos valores triestímulo, y coordenadas de cromaticidad de cada iluminante (A, D65, C, D50, D55 y D75) para el observador de 2° y 10°, se pueden consultar en el anexo d.

Más información sobre el espacio CIELAB y la derivación de sus ecuaciones se pueden encontrarr en (Berns, 2000, p.66) y (Ohta y Robertson, 2006, p.133)

(Malacara, 2011, p.117) describe que cuando la luminancia se incrementa, la gama (gamut) de colores decrece, produciendo el límite de MacAdam. Entonces el mínimo y máximo valor de iluminación los cuales son 0 y 100, respectivamente son sólo posibles para colores neutrales (blanco y negro). El tamaño y forma de las regiones representantes del gamut de colores para diferentes valores de iluminación son mostrados en la Figura 16.

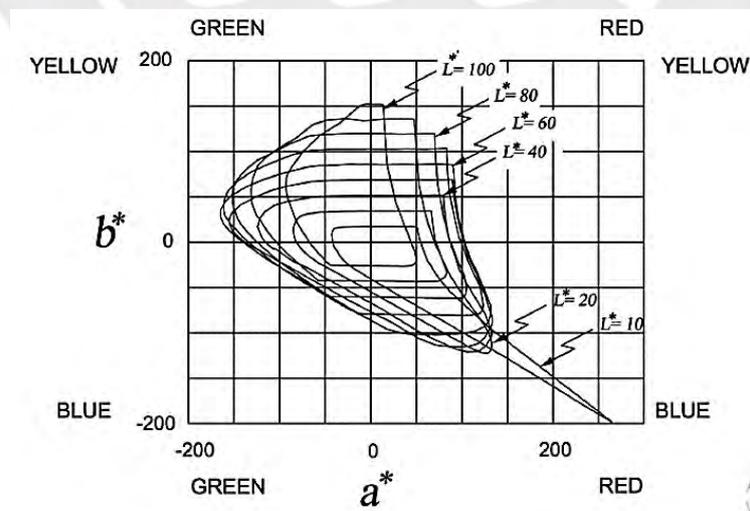


Figura 16. Gamut de todos los colores posibles para diferentes valores de luminancia en el plano  $a^*b^*$ , tomado de: "Color vision and colorimetry: theory and applications.", D. Malacara, 2001, p. 118.

En (Hill et al, 1997, p. 110) se cita que la definición estandarizada de CIELAB [CIE 1986a] da un límite solo para el eje  $L^*$  ( $0 \leq L^* \leq 100$ ) mientras que no se especifican limitaciones para  $a^*$  y  $b^*$ . En cuanto a los colores de los objetos, una limitación teórica viene dada por los denominados colores óptimos derivados de la reflectancia espectral limitada o de las curvas de transmisión junto con un iluminante especificado

El espacio de color óptimo de CIELAB delimitado por la superficie de los colores más saturados se muestra en la Figura 17. El espacio está compuesto por planos de luminosidad constante  $L^*$  que están dispuestos a distancias de 5 unidades de distancia. Cada plano está limitado por los colores óptimos de la respectiva luminosidad. (p. 113)

Hill menciona que el espacio de color óptimo muestra algunas características típicas. Los planos inferiores se estiran en la gama azul formando una "nariz" delgada. A mayor luminosidad, el centro de los planos se mueve del azul al amarillo.

Con poca luminosidad, es decir menores valores de  $L^*$ , predominan los colores azules. Con una luminosidad media, se logra un número máximo de colores perceptibles y con una luminosidad alta, solo están presentes los colores amarillo y verde.

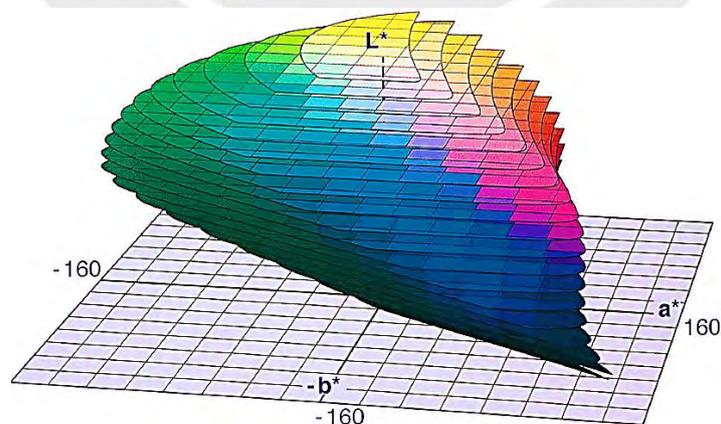


Figura 17. Espacio de color óptimo CIELAB compuesto por planos de luminosidad constante  $L^*$  espaciados en  $\Delta L = 5$  unidades. La red indicada en cada plano representa líneas de constante  $a^*$  o  $b^*$  con espacios entre líneas de 20 unidades.

De otro lado, siendo el sistema CIELAB un sistema rectangular, se puede también usar las coordenadas polares cilíndricas, de esta manera se correlaciona con el tono  $h_{ab}$ , la iluminación  $L^*$  y el croma  $C_{ab}^*$  como se muestran en las siguientes ecuaciones. (Berns, 2019, p.76).

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (23)$$

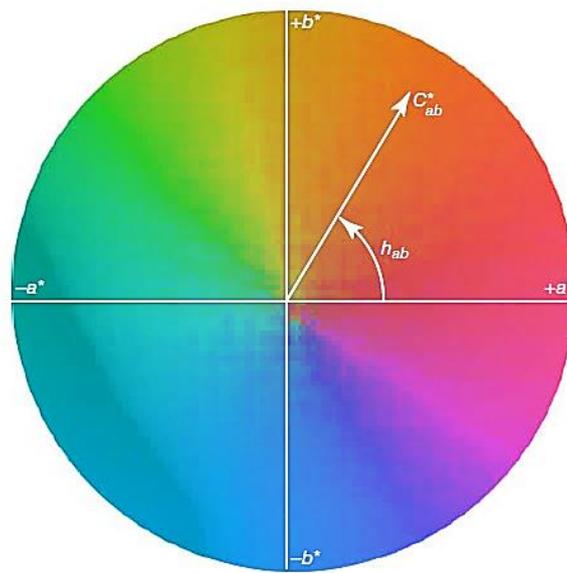


Figura 18. CIE 1976  $a^*b^*$  proyección a una iluminación constante  $L^*=50$ . El tono CIELAB es medido en grados empezando con  $h_{ab}=0^\circ$  en la dirección  $+a^*$  e incrementándose en contra de las manecillas del reloj. El croma CIELAB es medido como la longitud de la línea de un punto neutral ( $a^*=b^*=0$ ) al punto de muestra, tomado de: “*principles of color technology*. John Wiley & Sons” por R. Berns, 2019, p.76.

El ángulo del tono CIELAB y el croma son mostrados en la Figura 18, por convención el ángulo del tono CIELAB es definido en grados con los valores siguientes para cada semieje:  $+a^*=0^\circ$  ( $360^\circ$ ),  $+b^*=90^\circ$ ,  $-a^*=180^\circ$  y  $-b^*=270^\circ$ . El croma CIELAB es medido como la longitud de la línea de un punto neutral ( $a^*=b^*=0$ ) al punto de muestra. Se prefiere usar  $a^* b^*$  para colores neutros cercanos y  $h_{ab}$  y  $C_{ab}^*$  para colores cromáticos. (Berns, 2019, p.76).

Berns muestra como un color naranja es disminuido en profundidad, croma, claridad e intensidad en la Figura 19, el entorno para el cálculo de la claridad es un entorno gris. En esa sección el autor introduce dos variables CIELAB intensidad  $V_{ab}^*$  y profundidad  $D_{ab}^+$  (p.77) , a continuación se dan las definiciones que son referidas por el autor.

Croma: Es un atributo del color que se utiliza para indicar la grado de desviación del color de un color neutro de la misma luminosidad.

Vividez: Es un atributo del color utilizado para indicar la grado de desviación del color de un color negro neutro.

Profundidad: Es un atributo del color que se utiliza para indicar la grado de desviación del color de un color blanco neutro.

Claridad: Es un atributo del color utilizado para indicar la grado de desviación del color de su fondo de color.

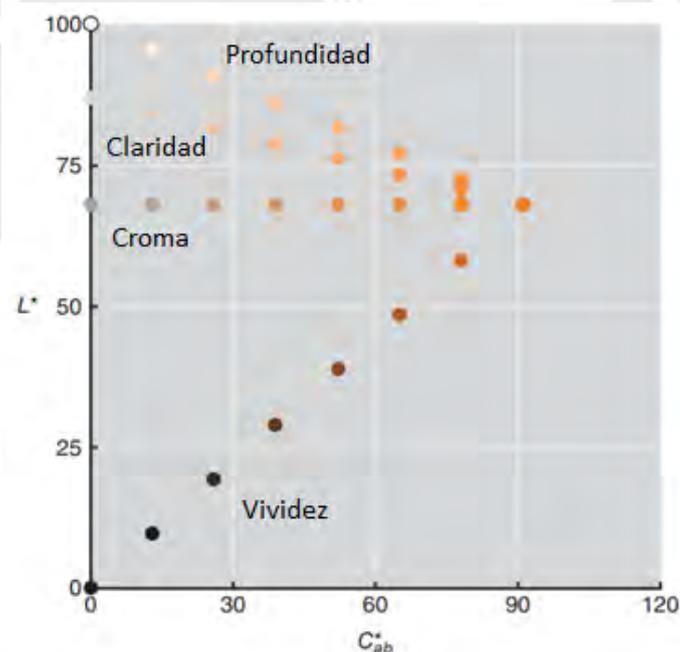


Figura 19.Reducción en profundidad, claridad, croma e intensidad del color naranja, obtenido de: “principles of color technology. John Wiley & Sons” por R. Berns, 2019, p.78.

Consideramos importante tener de referente esta gráfica para efectos de tener una comparación del color naranja de un sistema de ordenación de color NCS (Natural Color System) con los valores numéricos de  $L^*$  y  $C_{ab}^*$ .

Otra interpretación que podría sernos de utilidad para entender la clasificación del color en función al parámetro  $L^*$  en asociación al valor triestímulo (Y) y al valor de luminosidad (V) de la escala de color Munsell (escala de especificación visual del color) lo encontramos en (Azorín, 2003, p. 77).

Para colores considerados oscuros ( $Y < 15$ ,  $L^* < 45.63$ ,  $V = 3$  y  $4$ )

Para colores considerados de claridad media ( $15 < Y < 45$ ,  $45.63 < L^* < 72.89$ ,  $V = 5, 6$  y  $7$ )

Para colores considerados de claridad alta ( $Y > 45$ ,  $L^* > 72.89$ ,  $V = 8$  y  $9$ )

Los valores indicados por Azorín son resultado de las medidas colorimétricas a muestras de cuero de diferentes colores con un espectrofotómetro Konica Minolta CM-2600d bajo el iluminante D65 y en el modo SCI.

#### **2.4.5.3 DIFERENCIA DE COLOR EN EL ESPACIO DE COLOR CIELAB**

En (Xrite, 2016) en el blog titulado “*Are You Using the Right Tolerancing Method*” mencionan que “una mala memoria de color, vista cansada, daltonismo y las condiciones de visión, todos estos factores pueden afectar la habilidad del ojo humano para distinguir las diferencias de color”.

Xrite, indica que adicionalmente a estas limitaciones el ojo humano no detecta diferencias de tonalidades(matices), de croma (saturación de color) o de la claridad(luminosidad) de la misma manera. Es decir, el observador promedio primero verá diferencias de tono, luego de diferencias de croma y finalmente diferencias de claridad. Indican que el mejor modo de representar la aceptabilidad visual es un elipsoide (Figura 20)

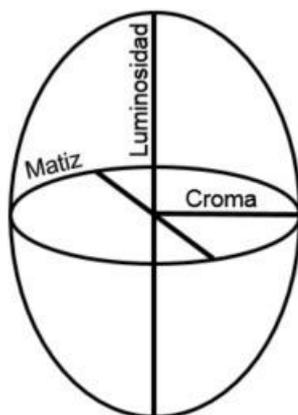


Figura 20. Representación de aceptabilidad visual.

Concluyen que “la tolerancia para una igualación aceptable de color consiste en un límite tridimensional con límites variables de claridad, matiz(tono) y croma y que debe estar de acuerdo con el análisis de color visual. Tanto CIELAB como CIELCH pueden ser empleados para producir estos límites. Las fórmulas adicionales de establecimiento de tolerancias conocidas como CMC y CIE94 producen tolerancias elipsoidales”. (p. 15)

Malacara D. (2011, p.120) explica que en el caso del espacio de color  $L^*a^*b^*$ , la diferencia entre dos colores es calculado por:

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (24)$$

Donde:  $\Delta L^* = L^* - L_{ref}^*$ ;  $\Delta a^* = a^* - a_{ref}^*$ ;  $\Delta b^* = b^* - b_{ref}^*$ .

Donde el subíndice *ref* representa el valor de referencia u objetivo. Un valor positivo de  $\Delta L^*$  significa que el color medido es más claro que la referencia y un valor negativo significa que es más oscuro que la referencia. Un valor positivo de  $\Delta a^*$  significa que la muestra es más rojiza y la muestra es más verdosa si  $\Delta a^*$  es negativo. Un valor positivo de  $\Delta b^*$  significa que la muestra es más amarilla o azul si  $\Delta b^*$  es negativo.

(Mokrzycki, 2011) refiere como se relacionan los valores de diferencia de color en el sistema CIELAB con la percepción del ojo humano, indica que esos datos representan estadísticas verificadas experimentalmente.

- $0 < \Delta E < 1$ , el observador no nota la diferencia,
- $1 < \Delta E < 2$ , solo un observador experimentado puede notar la diferencia
- $2 < \Delta E < 3.5$ , el observador inexperto también nota la diferencia,
- $3.5 < \Delta E < 5$ , se nota una clara diferencia de color,
- $5 < \Delta E$ : el observador nota dos colores diferentes.

En el sistema CIELCH, la diferencia de croma se puede escribir como:

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab}^* - C_{ab\ ref}^* \quad (25)$$

donde un valor positivo indica un croma más alto que la referencia y un valor negativo el valor indica un croma más bajo que la referencia. La diferencia de tono no es calculado por la diferencia de ángulo. Se calcula tomando en cuenta las diferencias de croma e iluminación, está dado por:

$$\Delta h_{ab}^* = [(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L_{ab}^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} \quad (26)$$

También se puede escribir como:

$$\Delta h_{ab}^* = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} \quad (27)$$

Adicionalmente en (Konica Minolta, 2007) se menciona que el ojo humano no puede diferenciar unos colores de otros, aunque sean diferentes. El área de tales colores en el diagrama de cromaticidad se denomina umbral de discriminación de color del ojo humano.

La Figura 21 es parte del diagrama de cromaticidad  $a^*b^*$  que representa el espacio de color de CIELAB. Las elipses blancas del diagrama representan los umbrales de discriminación de color del ojo humano con respecto a la saturación y el tono. En otras palabras, el ojo humano no puede diferenciar los colores dentro de la misma elipse. (Konica Minolta, 2007, p.50)

Los autores muestran las siguientes cuatro características de la capacidad de diferenciación de color del ojo humano en el diagrama de cromaticidad de CIELAB

- 1) La sensibilidad a las diferencias de color es baja para los colores con alto croma. En consecuencia, estos colores son difíciles de diferenciar. La forma de las elipses se vuelve cercana a un círculo para colores con baja saturación, y se vuelve más larga en la dirección de saturación y más estrecha en la dirección del tono para colores con alta saturación. Esto significa que el ojo humano no puede diferenciar colores con alta saturación, aunque su diferencia de color es relativamente grande, esto se observa en la Figura 21. (p.50)
- 2) En la Figura 22, se observa que la sensibilidad a las diferencias de color en la dirección del tono varía según el tono. Como se observa las elipses blancas A y B, aunque su saturación es similar, A es más ancha en la dirección del tono y B es más estrecha. Esto significa que la sensibilidad a las diferencias de color con respecto al tono es mayor en B que en A. (p.51)
- 3) La sensibilidad a la diferencia de color en la dirección de la luminosidad varía según la luminosidad. Se dice que la sensibilidad se vuelve más alta alrededor de la luminosidad de 50, y disminuye tanto para una luminosidad mayor como una menor. (p.51)
- 4) Para los colores azules, cambia la dirección del umbral de discriminación de color. La Figura 23 muestra que los ejes principales de las elipses blancas para los colores azules no coinciden con la dirección de saturación que se extiende desde el centro. Es este desajuste lo que causa diferencias en la evaluación de la diferencia de color entre los medidores de color y el ojo humano. (p. 51)

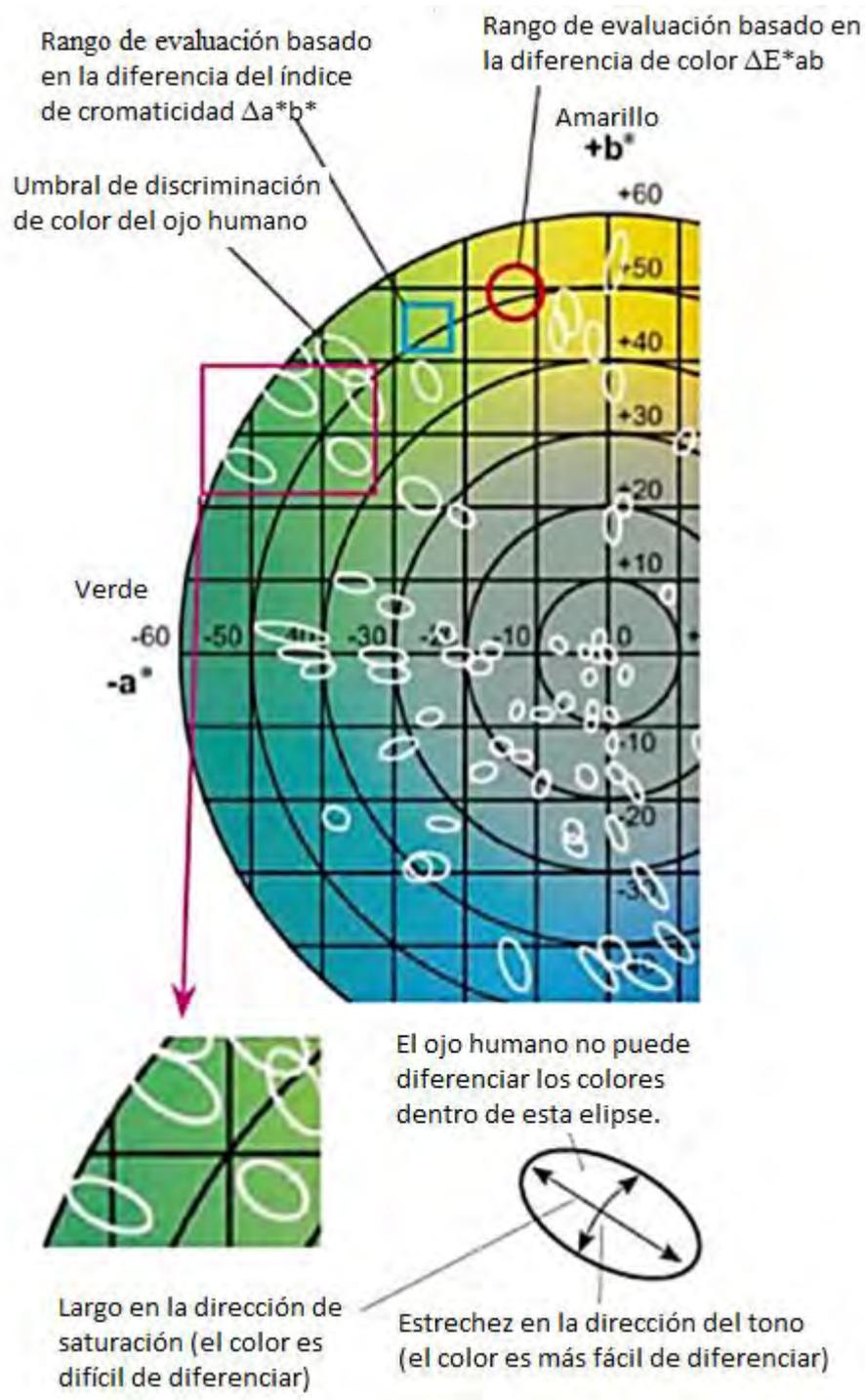


Figura 21. Sensibilidad a las diferencias de color en el espacio CIELAB. Traducido de <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html>

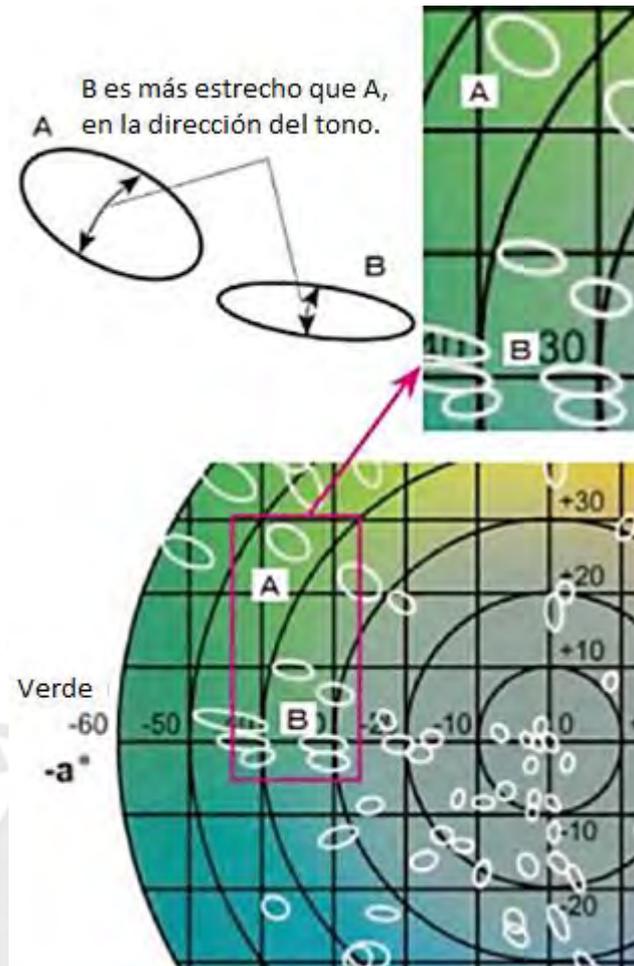


Figura 22. Sensibilidad a las diferencias de color en la dirección del tono. Traducido de <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html>

La diferencia de color  $\Delta E$ , usualmente usada en la evaluación de la diferencia de color en el espacio de color CIELAB está representada por un círculo perfecto para cada saturación y tono, como se muestra en el círculo rojo en la Figura 24 y difiere considerablemente de la forma del umbral de discriminación de color del ojo humano (elipse blanca) (Konica Minolta, 2007, p.51)



Figura 23. Sensibilidad a las diferencias de color en la zona de los azules. Traducido de <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html>

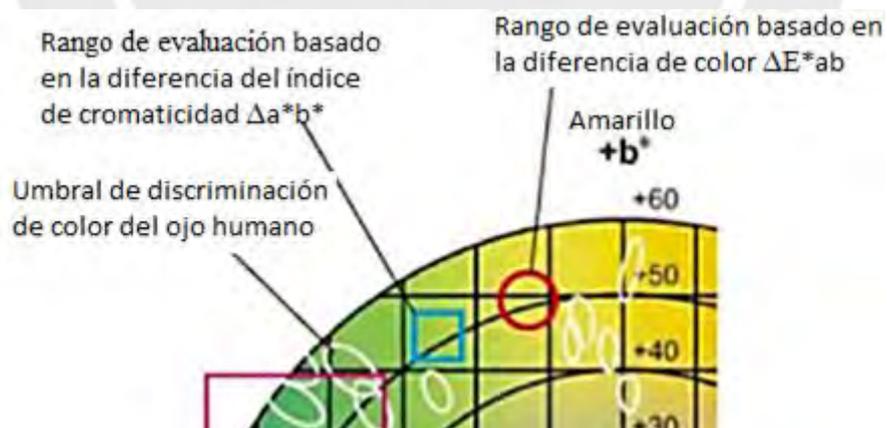


Figura 24. Diferencias de color  $\Delta E^*ab$  del espacio CIELAB está representada por un círculo perfecto, la diferencia del índice de cromaticidad  $\Delta a^*b^*$ , es representado por un cuadrado. Traducido de <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/02.html>

## 2.4.6 ILUMINANTES PATRONES CIE

### FUENTES DE LUZ

Berns (2019, p.3) introduce las fuentes de luz como aquellos objetos que emiten luz que es blanca o cercanamente blanca como el sol, metales calientes como el filamento de bombillas y lámparas de estado sólido, entre otros. La luz de cualquier fuente puede ser descrita de cuatro maneras.

El primero es la irradiancia, la cantidad de luz recibida en una superficie por unidad de área, a menudo definida por Watts por unidad de área ( $W/m^2$ ). El segundo es la radiancia, que es la cantidad de luz que emana desde una superficie por unidad de área proyectada, a menudo definido por Watts por unidad de área por ángulo sólido expresado en metros cuadrados estereorradianes ( $W/m^2Sr$ ) y con la letra "L". El tercero es normalizar el espectro en relación con una longitud de onda específica, y la cuarta es normalizar a la misma intensidad ("brillo"). (p.3)

Obviamente, la fuente de luz más importante es la luz natural. Desafortunadamente, sus características espectrales son bastante variables debido al tiempo, la ubicación geográfica y el clima. La transparencia atmosférica y las nubes pueden cambiar la luz del día en unos pocos minutos. La temperatura correlacionada de color (TCC)<sup>6</sup> de la luz del día varían de aproximadamente 2000 K a última hora de la mañana a más 10,000 K en la tarde. (Malacara, 2011).

---

<sup>6</sup> Temperatura usualmente expresada en kelvin, de un radiador de cuerpo negro que se parece más al color de una fuente de luz

Malacara explica que las fuentes de luz estándar y los iluminantes son conceptos ligeramente diferentes. Desde un punto de vista formal, existe una fuente de luz estándar en la vida real y se puede apagar o encender físicamente. Por otro lado, los iluminantes estándar son descripciones matemáticas (numéricas) de fuentes de luz ideales. Sin embargo, algunas fuentes de luz están especialmente diseñadas y construidas para emular iluminantes, haciendo estos términos equivalentes para muchos propósitos prácticos. En 1931 la convención CIE recomendó tres iluminantes estándar (CIE, 1932; ISO / CIE, 1991) definido por algunas fuentes de luz reales. Estos iluminantes estándar se denominan iluminantes A, B y C. (p. 34)

El iluminante A está formado por una lámpara incandescente llena de gas con un filamento de tungsteno enrollado y una bombilla de cuarzo. Su TCC es de 2856 K, el segundo iluminante, B, ahora discontinuado, emula la luz solar del mediodía. Este iluminante fue producido por un filtro de doble líquido frente a una fuente de luz A. El tercer iluminante, C, que emula la luz diurna promedio, también se produce filtrando una fuente de luz que emula el iluminante A con un filtro de líquido, las distribuciones espectrales de potencia de ellos se muestran en la Figura 25. Sin embargo, la luz del día real contiene más luz ultravioleta que el iluminante C. Debido a las grandes fluctuaciones de la luz natural, los iluminantes B y C se consideraron inadecuados. En cambio, la convención CIE recomendó una serie de iluminantes *D* cuya distribución espectral se muestra en la Figura 26, con TCC de aproximadamente 5500(D<sub>55</sub>), 6500(D<sub>65</sub>) y 7500(D<sub>75</sub>) K, para reemplazar los iluminantes B y C. Según lo definido por la Convención CIE en 1931 (CIE, 1932). (p. 34)

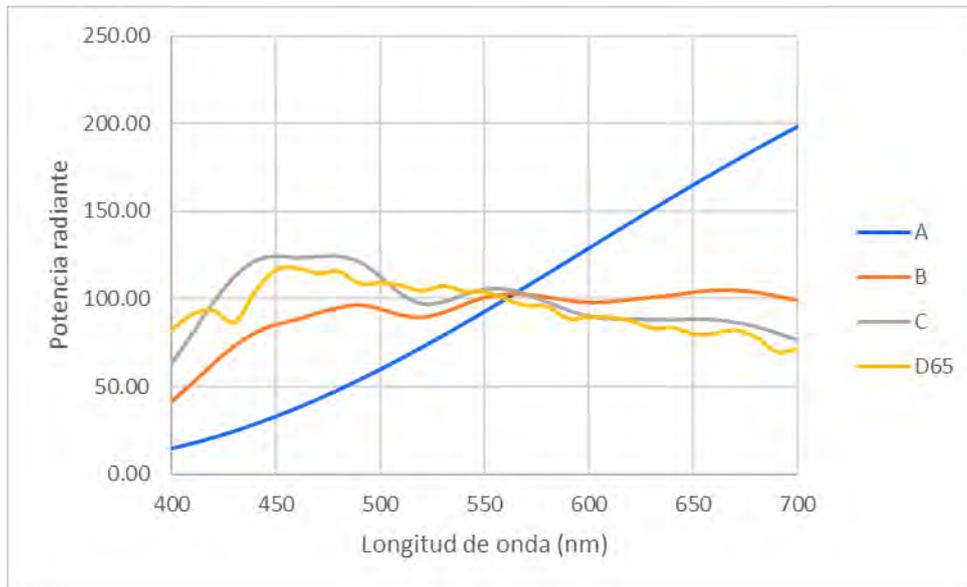


Figura 25. Distribución espectral de los iluminantes estándar CIE A, B, C y D<sub>65</sub>

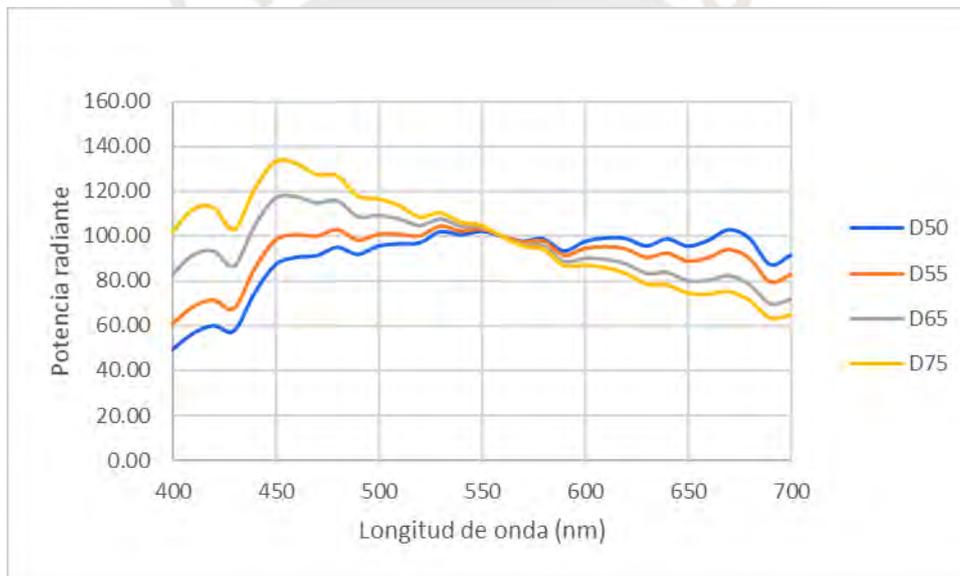


Figura 26. Distribución espectral del iluminante estándar CIE D<sub>65</sub>, y los iluminantes suplementarios D<sub>50</sub>, D<sub>55</sub> y D<sub>75</sub>

El iluminante estándar D<sub>65</sub>, representa la luz diurna promedio y tiene una temperatura de color de 6500 K. Su distribución de potencia espectral es similar a la del iluminante C discontinuado, pero con algunas características importantes que lo acercan a la luz diurna. El iluminante D<sub>65</sub> se basa en muchas mediciones de la luz del día en varios países. (p.35)

Estos iluminantes se obtienen del iluminante D65 cambiando su temperatura de color con un procedimiento sugerido por la convención CIE. En la definición de iluminantes, el valor absoluto de su radiación espectral no es importante. El factor importante es la variación con la longitud de onda, de modo que se pueda multiplicar por cualquier constante arbitraria deseada, y así se pueden obtener las radiaciones espectrales relativas. Los iluminantes F están formados por varios tipos de lámparas fluorescentes. El iluminante F2 es el más común de ellos, representado por una lámpara fluorescente blanca fría (4100 K y CRI<sup>7</sup> (Índice de reproducción cromática) = 60). (p. 35)

Todos los valores tabulados para iluminantes estándar se han normalizado multiplicando por un factor apropiado, de modo que su valor sea igual a 100 a una longitud de onda de 560 nm. Por lo tanto, los valores de irradiancia espectral relativa pueden ser mayores que 100 para algunas longitudes de onda. Los buenos simuladores de luz diurna son muy importantes en colorimetría y control de color. (p.35)

## **2.5 MEDICIÓN ESPECTRAL DEL COLOR**

### **EQUIPOS PARA MEDIR EL COLOR**

La colorimetría, así como la fotometría, requiere que el flujo radiante sea evaluado de acuerdo con la sensibilidad espectral del ojo humano. Las medidas instrumentales deben correlacionarse con lo que los ojos ven. La colorimetría requiere tres funciones de peso: la fuente (el iluminante), el objeto (factor de reflectancia/transmitancia) y el observador (funciones de igualación de color) con el objetivo de evaluar la intensidad luminosa y cromaticidad. (Hammond III, 1969)

---

<sup>7</sup> Definido en la sección 2.1 en la página 27.

## ANÁLISIS INSTRUMENTAL

### ESPECTROFOTÓMETROS

Según Berns (2000, p.88) los espectrofotómetros son instrumentos que miden la reflectancia o la transmitancia de los materiales como función de la longitud de onda. Ellos tienen muchos usos además de la medida del color, pero es de nuestro interés la espectrofotometría en la región del espectro visible.

Los principales componentes de todos los espectrofotómetros para medir el color son una fuente de radiación óptica, un sistema óptico para definir las condiciones geométricas de medida, esto es un dispersante de la luz y un detector, además de un sistema de procesamiento de señal que convierte la luz en una señal adecuada para el análisis. Un arreglo común de espectrofotómetro es mostrado en la Figura 27.

Berns (2000) también menciona que en la práctica los espectrofotómetros diseñados para la medición de color tienen rango de longitud de onda entre los 400 a 700 nm con incrementos de 10 nm ó 20 nm

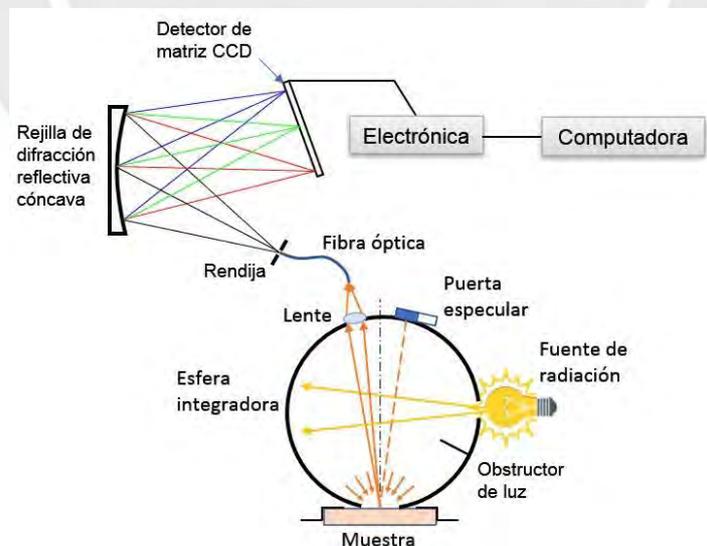


Figura 27. Arreglo óptico común para espectrofotómetros, adaptado de: " Color vision and colorimetry: theory and applications.", D. Malacara, 2001, p.159

**Terminología básica:**

Reflexión: es el proceso por el cual la energía radiante es retornada de un material u objeto (ASTM E 284).

Factor de reflectancia: la razón del flujo reflejado de un espécimen al flujo reflejado de un difusor perfectamente reflectante sobre las mismas condiciones geométricas y espectrales de medida (CIE 17.4)

Transmitancia: es la razón del flujo transmitido al flujo incidente, sobre condiciones espectrales y geométricas específicas (ASTM E 284) (p.89).

**2.5.1 GEOMETRÍAS PARA MEDIDA DEL COLOR POR REFLECTANCIA**

Para medir el color de objetos, varias geometrías estandarizadas son definidas.

(Berns, 2000, p.84) El primer par de geometrías son etiquetadas como 45°/normal (45°/0°) y normal/45° (0°/45°), como se observan en la Figura 28, son conocidas como geometrías bidireccionales, la designación corresponde a ángulos de iluminación/observación. La manera más simple de construir un instrumento con este estándar es tener un haz simple de luz colimado iluminando a un espécimen. Sin embargo, esto resulta en cantidades insuficientes de luz y presenta problemas de direccionalidad, muestras rotadas presentan diferentes cantidades de medición, insuficientes niveles de niveles de luz son aliviados agregando una segunda fuente en ángulo opuesto azimutal (Figura 29 c). Estos instrumentos todavía sufren de sensibilidad direccional. Los modernos instrumentos bidireccionales miden también todos los ángulos azimutales circunferencialmente, llamado geometría bidireccional anular, mostrado en la Figura 29 (a).

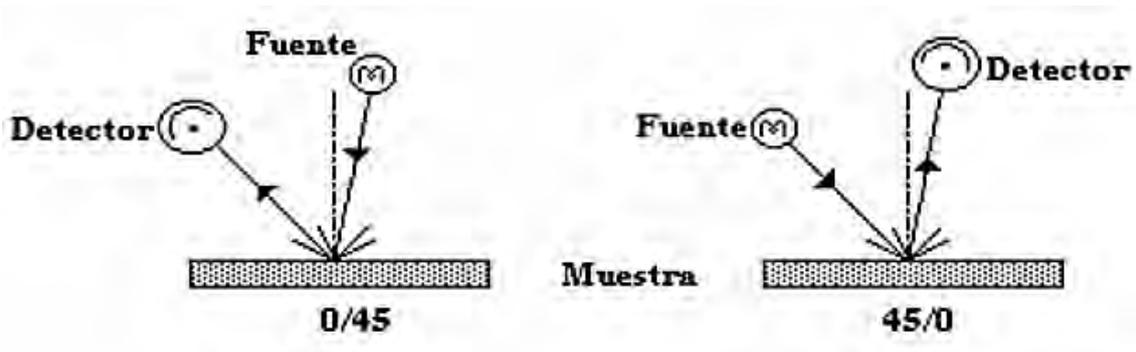


Figura 28. Geometrías de medición por reflectancia  $0^\circ/45^\circ$  y  $45^\circ/0^\circ$ , obtenido de (Bujdud J, 1999) <https://biblioteca.cio.mx/tesis/06999.pdf>

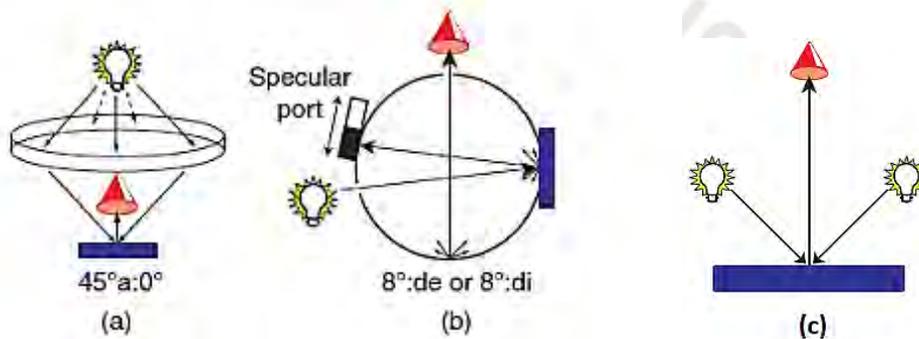


Figura 29. (a) geometría bidireccional anular, (b) geometría de esfera integradora, donde la componente especular puede o no ser incluida o excluida, (c) geometría  $45/0$  a dos ángulos azimutales, fuente: “Principles of color technology. John Wiley & Sons” por R. Berns, 2000, p.84.

El segundo par de geometrías mencionado por Berns son difuso/normal y normal/difuso y refiere al uso de esferas integradoras, mostradas en la Figura 30 y Figura 29(b). Una esfera integradora es una esfera metálica hueca recubierta con un material altamente reflectante tal como el sulfato de bario o el politetrafluoroetileno. Una esfera integradora colecta toda la luz reflejada de la superficie de una muestra. Si el ángulo normal es mantenido, toda la reflexión especular saldría a través de la fuente o el puerto del detector. Sin embargo, la esfera integradora diseñada para la medición del color inclina el ángulo normal entre  $6^\circ$  y  $8^\circ$ , para colocar un puerto especular (trampa de brillo) a un ángulo opuesto, la reflexión especular puede ser también incluida o excluida de la

medida, excluyendo esta luz de la medida del color, el resultado podría tener mejor correlación con la medida visual. (p. 85)

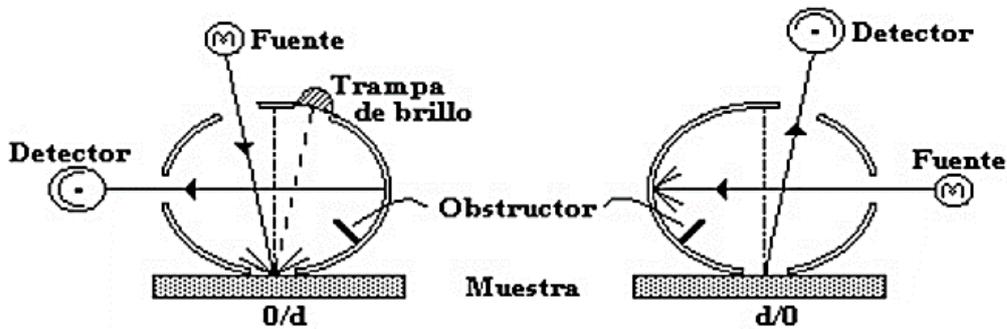


Figura 30. Geometrías de medición por reflectancia 0/d y d/0, obtenido de (Bujdud J, 1999) <https://biblioteca.cio.mx/tesis/06999.pdf>

Berns menciona que la terminología CIE no establece una distinción entre las diferentes maneras de diseño bidireccional o instrumentos de esfera integradora por ello enlista las siguientes abreviaciones para las geometrías de medición:

d/8:i para iluminación difusa y ángulo de observación de 8° con la componente especular incluida.

d/8:e para iluminación difusa y ángulo de observación de 8° con la componente especular excluida.

d/d:i para iluminación y observación difusas con la componente especular incluida.

45/0:c para iluminación circunferencial a 45° y observación normal.

0/45:c para iluminación normal y observación circunferencial de 45°.

0/0 para iluminación y observación normales.

## 2.5.2 GEOMETRÍAS ESTÁNDAR CIE PARA MEDIR EL COLOR POR TRANSMITANCIA

Según (Berns, 2000) la CIE recomienda que las geometrías de esferas integradoras de d/0:i, d/0:e, 0/d:i, 0/d:e, así como también las geometrías de los casos 0/0 y d/d:i. para especímenes completamente transparentes todas las geometrías mencionadas deberían

tener resultados casi idénticos, sin embargo si hay dispersiones presentes, las medidas pueden presentar ligeras variaciones (excepto en geometrías reversibles, que por definición son idénticas) los instrumentos de esfera integradora son muy útiles en transmisiones difusas, observar en la Figura 31.

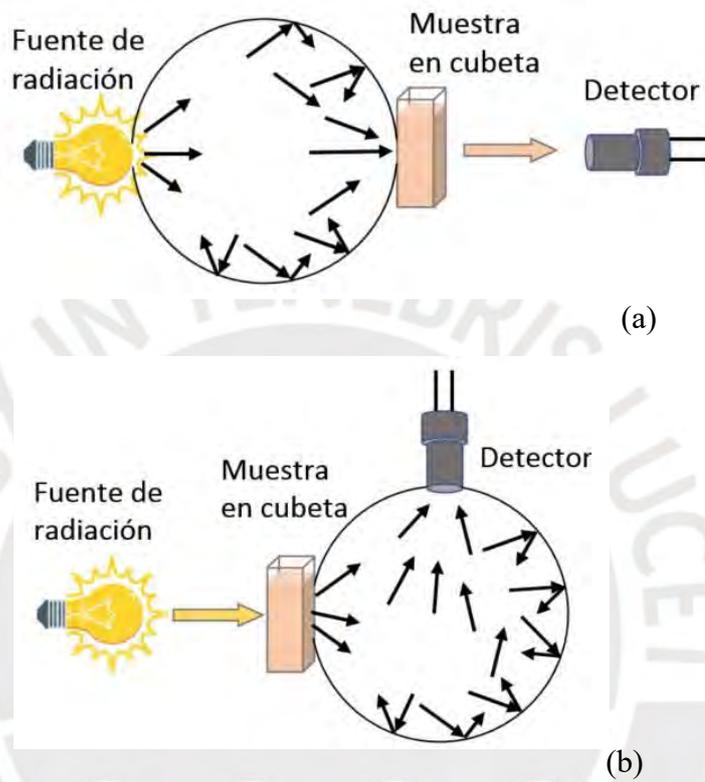


Figura 31. Geometría d/0 (iluminación difusa/0° de observación) y geometría 0/d (0° de iluminación/observación difusa, adaptado de “Precise Color Communication” Konica Minolta (2007), [http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color\\_communication.pdf](http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf)

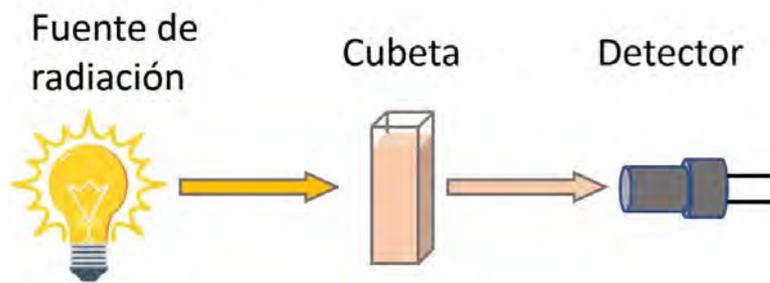


Figura 32. Geometrías 0/0 (0° de iluminación/ 0° de observación), adaptado de “Precise Color Communication” Konica Minolta (2007), [http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color\\_communication.pdf](http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf)

### **3 METODOLOGÍA**

La metodología aplicada para evaluar el color del zumo de naranjas consiste en la realización de mediciones instrumentales usando espectrofotómetros, desde donde se obtienen datos de espectros de transmisión y reflexión de las muestras de zumos; los datos son analizados en el rango del espectro visible (400-700 nm), luego se obtienen los valores tristímulo X, Y y Z siguiendo el estándar CIE, para con estos valores pasar a los espacios de color CIELAB y CIELCH.

#### **3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN**

El trabajo experimental se llevó a cabo en los siguientes laboratorios:

- Laboratorio de Óptica de la Sección de Física de la PUCP
- Laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM.
- Laboratorio de Análisis Físicoquímicos de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la UNALM

#### **3.2 APARATOS E INSTRUMENTACIÓN**

- Espectrofotómetro de la marca Thermo Spectronic modelo: Helios Gamma.
- Espectrofotómetro Konica Minolta CM 700d
- Espectrofotómetro Konica Minolta CM 5



(a)



(b)



(c)

Figura 33. (a) Espectrofotómetro Thermo Spectronic Helios Gamma, (b) Espectrofotómetro Konica Minolta CM 700d y (c) Espectrofotómetro Konica Minolta CM 5

MCMXVII

## Especificaciones técnicas del espectrofotómetro Konica Minolta CM 5.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del sistema óptico del espectrofotómetro Konica Minolta CM 5

<b>Sistema de Iluminación / Visión</b>	Reflectancia: de:8° (iluminación difusa: ángulo de visión 8°) / SCE (componente especular excluido) Transmitancia: di:0°, de:0° (iluminación difusa: ángulo de visión 0°)
<b>Tamaño de la Esfera Integradora</b>	Ø152 mm
<b>Detectores</b>	Cadena doble de 40 fotodiodos de silicio
<b>Dispositivo de Separación Espectral</b>	Rejilla de difracción plana
<b>Fuente de iluminación</b>	Lámpara de xenón pulsante (filtro corte UV)
<b>Tiempo de medición</b>	Aprox. 1 s (para salida de datos en pantalla); intervalo mínimo de medición: Aprox. 3 s
<b>Área de Medición / Iluminación</b>	Reflectancia: Intercambiable por selección de máscara de medición. LAV: Ø 30 mm / Ø 36 mm; MAV (opcional): Ø 8 mm / Ø 11 mm; SAV (opcional): Ø 3 mm / Ø6 mm Transmitancia: Área de medición Ø20 mm/ Ø26 mm
<b>Repetitividad</b>	Valores colorimétricos: desviación estándar dentro de E*ab 0.04 * Cuando la placa de calibración blanca es medida 30 veces en intervalos de 10 segundos, después de la calibración con el blanco
<b>Acuerdo Entre Instrumentos</b>	Dentro de E*ab 0.15 (típico), (LAV/SCE) (Basado en 12 placas de color BCR A Serie II, comparado con valores medidos con equipo patrón Konica Minolta en condiciones estándar)
<b>Cavidad de Transmitancia</b>	Sin laterales (longitud de muestra ilimitada). Profundidad (espesor máximo de la muestra): 60 mm Porta muestras (opcional) para láminas o cubetas para líquidos se puede instalar/quitar
<b>Pantalla</b>	LCD (TFT color) de 14.5 cm
<b>Idiomas en Pantalla</b>	Inglés, japonés, alemán, francés, italiano, español y chino simplificado

<b>Calibración Blanco</b>	Calibración con blanco automática (reflectancia) 100%(transmitancia) utilizando la placa de calibración blanco-interna (no aplicable a la calibración 100% cuando se usan cubetas para mediciones de transmitancia de líquidos)
<b>Comunicación</b>	USB 1.1 (Conexión a PC; memoria USB); RS-232C estándar (conexión a impresora en serie)
<b>Observador</b>	Observador estándar 2° y 10°
<b>Iluminante</b>	A, C, D50, D65, F2, F6, F7, F8, F10, F11, F12, ID50, ID65 (es posible la evaluación simultánea con dos fuentes de luz)
<b>Datos Visualizados</b>	Valores/gráficos espectrales (reflectancia, transmitancia, absorbancia), valores colorimétricos, valores/gráficos de diferencias de color, evaluación pasa/falla, simulación de color, evaluación de color
<b>Espacios de Color</b>	L*a*b*, L*C*h, Hunter Lab, Yxy, XYZ, Munsell, y diferencias de color en estos espacios (excepto en Munsell)
<b>Índices</b>	Reflectancia: WI (ASTM E 313-73, ASTM E 313-96); YI (ASTM E 313-73, ASTM E 313-96, ASTM D 1925); WB (ASTM E313-73) Transmitancia: Gardner, Iodo, Hazen (APHA), Farmacopea Europea, Farmacopea US
<b>Ecuaciones de Diferencia de Color</b>	$\Delta E^*ab$ (CIE 1976), $\Delta E^*94$ (CIE 1994), $\Delta E00$ (CIE 2000), $\Delta E$ (Hunter), CMC (l: c)
<b>Evaluación Pasa/Falla</b>	Las tolerancias se pueden ajustar para los valores colorimétricos (excepto Munsell), los valores de diferencias de color, o los índices de color
<b>Valores que se Pueden Memorizar</b>	Muestras: 4.000 mediciones; patrones: 1.000 mediciones
<b>Dispositivo de Memoria USB*</b>	Memorización de valores de muestras (4000) y patrones (1000). Carga/descarga de condiciones y configuración de medición *No pueden utilizarse memorias USB con seguridad habilitada
<b>Fuente de Alimentación</b>	AC 100 a 240 V, 50/60 Hz (usando adaptador AC exclusivo)
<b>Tamaño</b>	Cubierta deslizante cerrada: 385 (ancho) × 192 (alto) × 261 (profundo)mm Cubierta deslizante abierta: 475 (ancho) × 192 (alto) × 261 (profundo)mm
<b>Peso</b>	Aprox. 5.8 kg
<b>Rango Temperatura/Humedad de Funcionamiento</b>	13 a 33° C, humedad relativa del 80% o menor (a 35 ° C) sin condensación
<b>Rango Temperatura/Humedad de Almacenamiento</b>	0 a 40 ° C, humedad relativa del 80% o menor (a 35 ° C) sin condensación

Nota. Datos técnicos obtenidos de:

<https://www.aquatecnica.com/product/espectrocolorimetro-cm-5/>

Tabla 3. Especificaciones técnicas del sistema óptico del espectrofotómetro Konica Minolta CM 700d

<b>Modelo</b>	CM-700D
<b>Sistema de iluminación y visión</b>	di: 8°, de: 8° (iluminación difusa, ángulo de visión de 8 grados), SCI (componente especular incluido) / SCE (componente especular excluido) seleccionable con conmutación automática (cumple con CIE No. 15, ISO 7724/1, DIN5033 Teil7, ASTM E 1164, y JIS Z 8722).
<b>Tamaño de la esfera integradora</b>	ø 40 mm
<b>Detector</b>	Serie de fotodiodos de silicio (36 sensores)
<b>Dispositivo de separación espectral</b>	Rejilla de difracción
<b>Rango de longitudes de onda</b>	400 nm. a 700 nm.
<b>Intervalo de longitudes de onda</b>	10 nm.
<b>Anchura de banda media</b>	Aprox. 10 nm.
<b>Rango de reflectancia</b>	0 a 175%. Resolución en pantalla: 0.01%
<b>Fuente de luz</b>	Lámpara de xenón pulsante (con filtro de corte UV)
<b>Tiempo de medida</b>	Aprox. 1 segundo.
<b>Intervalo mínimo de medición</b>	Aprox. 2 segundos (en modo SCI o SCE)
<b>Duración de la batería</b>	Con pilas alcalinas: aprox. 2.000 medidas. Con pilas recargables de níquel metal hidruro (2300 mAH): aprox. 2.000 medidas con carga completa* Medición continua fijada, bien en modo SCI o en modo SCE, a intervalos de medida de 10 segundos a 23° C.
<b>Área de medición / iluminación</b>	CM-700d: MAV: ø 8 mm / ø 11 mm. SAV: ø 3 mm / ø 6 mm. *Modificable reemplazando la máscara de medición y seleccionando la posición de la lente. CM-600d: MAV: ø 8 mm / ø 11 mm sólo.
<b>Repetitividad</b>	Reflectancia espectral: desviación estándar dentro de 0,1%. Valores colorimétricos: desviación estándar dentro de E*ab 0,04. *Cuando la placa de calibración blanca es medida 30 veces en intervalos de 10 segundos, después de la calibración blanco.
<b>Acuerdo entre instrumentos</b>	Dentro de E*ab 0,2 (MAV/SCI) * Basado en 12 placas de color BCRA Serie II, comparado con valores medidos con equipo patrón a 23° C.
<b>Promediación de medidas</b>	1 a 10 (promedio auto.), 1 a 30 (promedio manual)
<b>Pantalla</b>	Pantalla 2,36 pulgadas TFT color LCD.
<b>Comunicación</b>	USB1.1; Bluetooth® versión estándar 1.2*.

<b>Observador</b>	Observador 2°, Observador 10°.
<b>Iluminante</b>	A, C, D50, D65, F2, F6, F7, F8, F10, F11, F12 (evaluación simultánea con dos posibles iluminantes).
<b>Datos visualizados</b>	Valores/gráfico espectral, valores colorimétricos, valores/gráfico de diferencias de color, resultado “PASA/FALLA”, simulación de color, evaluación de color
<b>Espacios de color</b>	L*a*b*, L*C*h, Hunter Lab, Yxy, XYZ, Munsell, y diferencias de color en estos espacios (excepto para Munsell)
<b>Datos colorimétricos</b>	MI, WI (ASTM E313), YI (ASTM E313-73/ASTM D1925), brillo ISO, valor brillo 8°
<b>Fórmulas de diferencia de color</b>	E*ab (CIE1976), E*94 (CIE1994), E00 (CIE 2000), CMC (1:c)
<b>Conjunto de datos almacenables</b>	Medidas: 4.000 datos. Patrones para diferencias de color: 1.000 datos
<b>Valoración “Pasa/Falla”</b>	Las tolerancias se pueden ajustar para los valores colorimétricos (excluyendo Munsell), los valores de diferencias de color, y los índices de color (excluyendo el valor de brillo 8°), respectivamente.
<b>Fuente de alimentación</b>	Adaptador AC especial; 4 pilas alcalinas secas tamaño AA o baterías recargables de níquel metal hidruro.
<b>Tamaño</b>	73 (ancho) x 211.5 (alto) x 107 (profundo) mm
<b>Peso</b>	Aprox. 550 g (sin tapa de calibración blanca ni pilas)
<b>Rango de temperatura / humedad de funcionamiento</b>	5 a 40°C, humedad relativa del 80% o menor (a 35°C) sin condensación.
<b>Rango de temperatura / humedad de almacenamiento</b>	0 a 45° C; humedad relativa del 80% o menor (a 35°C) sin condensación.

Nota. Datos técnicos obtenidos de:

<https://www.aquateknica.com/product/espectrocolorimetro-espectrofotometro-cm-700d-cm-600d/>

Tabla 4. Especificaciones técnicas del sistema óptico del espectrofotómetro Thermo Spectronic modelo: Helios Gamma.

<b>Modelo</b>	<b>Helios Gamma</b>
Óptica	De haz simple
Monocromador	Rejilla interferométrica maestra (MIG)
Ancho de banda	2 nm
Escaneo	si
Rango de longitud de onda	190-1100 nm
Exactitud de longitud de onda	1 nm
Reproductibilidad de longitud de onda	± 0.2 nm
Tipo de pantalla	LCD, gráfica VGA
Exactitud fotométrica	±0.005 A a 1A
Reproductibilidad fotométrica	±0.002 A a 1A
Estabilidad	<0.002 A/hr
Ruido (RMS)	<0.0001 A
Luz parásita	<0.05 % a 220 nm & 340 nm
Máxima longitud de camino	100 nm
Salida:	
Registro	0-1V / -0.3-3A
RS 232C	si
Almacenamiento de datos	no
Impresión	si (Centronics)
Suministro eléctrico	100-240 V, 50-60 Hz
Peso	10 kg

Nota. Especificaciones técnicas “Range of UV-Visible Spectrophotometers” traducida de <<http://www.a-a.co.kr/pdf/Helios%20Series.pdf>>

### 3.3. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

A continuación, se muestra los procedimientos analíticos seguidos para obtener los valores de color para cada uno de los tres equipos utilizados.

### 3.3.1 MEDICIÓN DEL COLOR POR TRANSMITANCIA, UTILIZANDO EL ESPECTROFOTÓMETRO THERMO SPECTRONIC

Las medidas se realizaron durante los meses de abril y mayo del 2016, se utilizaron 19 muestras de naranjas provenientes de diferentes puestos de venta de frutas en Lima metropolitana de las variedades conocidas en el mercado como: Tangelo, Huando, Valencia y jugos envasados a base de concentrado de naranja. Éstos se exprimieron y se colaron para luego ser colocados en cubetas de plástico de 10 mm de espesor. Como blanco de referencia se utilizó agua destilada, las muestras de zumos fueron analizadas con el espectrofotómetro en el modo de transmitancia en el rango de longitud de onda de 400 nm a 700 nm que corresponde al espectro visible con un intervalo de paso de longitud de onda entre dato y dato de  $\Delta\lambda=10$  nm, ver Figura 34.



Figura 34. Arreglo experimental con el espectrofotómetro Thermo Spectronic, modelo: Helios gama.

#### Análisis del color

El color de los zumos se obtiene indirectamente con la medida espectral de transmitancia obtenida con el espectrofotómetro, para el cálculo de las variables triestímulo X, Y y Z, se considerarán según lo más utilizado en la industria alimentaria para la medición del

color a los datos del iluminante D65 y los datos del observador de 10° CIE 1964, ambos mostrados en la Tabla 5, para después usarlos en la conversión del espacio X, Y y Z al espacio CIELAB y CIELCH, descritos en la Figura 35.

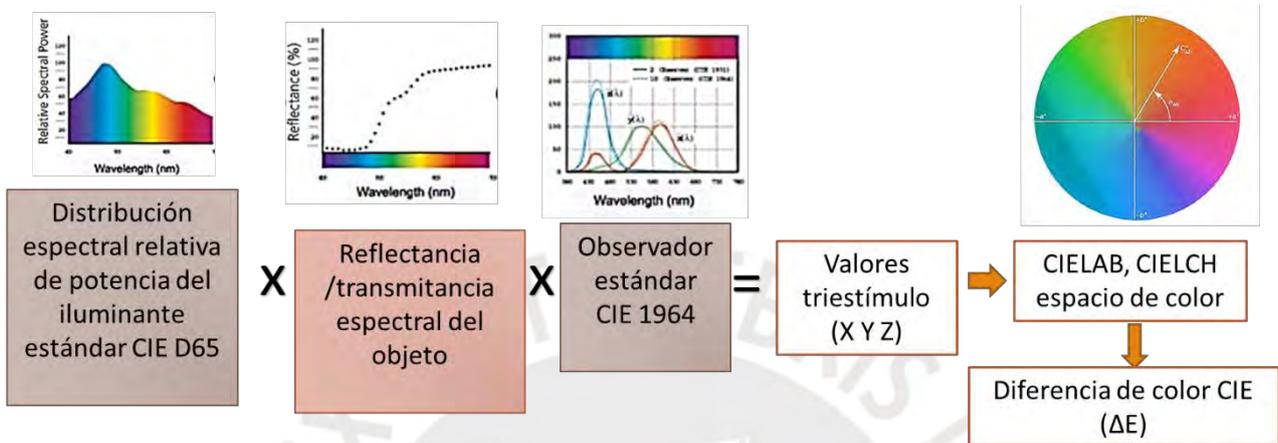
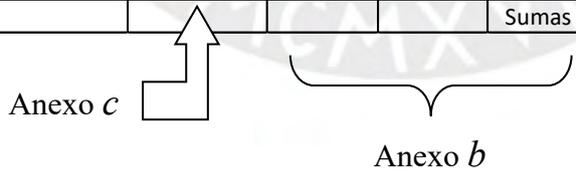


Figura 35. Diagrama de cálculo de valores CIELAB, CIELCH y  $\Delta E$ .

Los valores de transmitancia de cada una de las muestras analizadas, conjuntamente con los datos del iluminante D65 (luz natural) y el observador de décimo grado permiten calcular los valores triestímulo, utilizando las ecuaciones (14), (15), y (16) para luego usar la conversión a las escalas de color CIELAB y CIELCH con las fórmulas dadas en las ecuaciones (19), (20) y (21), (22) y (23). La diferencia de color ( $\Delta E$ ) se obtiene con la ecuación (24) de la sección 2.5.4. Estos cálculos se procesan en una plantilla con el programa Excel y es mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5. Hoja de cálculo para la obtención de los valores de color en las escalas L\*a\*b y L\*c\*h

Longitud de onda $\lambda$ (nm)	Transmitancia (valor máx=1) $T(\lambda)$	Iluminante D65 $S(\lambda)$	Observador estándar de 10°			$W_x(\lambda)$	$W_y(\lambda)$	$W_z(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda) * S(\lambda)$
			$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$				
400	0.00258775	82.75	0.0191	0.0020	0.0860	0.00409	0.00042827	0.01841572	0.1655
410	0.003154	91.49	0.0847	0.0088	0.3894	0.024441	0.00253932	0.11236505	0.805112
420	0.00343425	93.43	0.2045	0.0214	0.9725	0.0656163	0.00686645	0.31203827	1.999402
430	0.0035755	86.68	0.3147	0.0387	1.5535	0.0975332	0.01199407	0.48146746	3.354516
440	0.00367175	104.86	0.3837	0.0621	1.9673	0.1477321	0.02390972	0.75744927	6.511806
450	0.0036795	117.01	0.3707	0.0895	1.9984	0.1596005	0.03853318	0.86038773	10.472395
460	0.00398375	117.81	0.3023	0.1282	1.7454	0.1418771	0.06016754	0.81916088	15.103242
470	0.00441475	114.86	0.1956	0.1852	1.3176	0.0991845	0.09391088	0.66812622	21.272072
480	0.0047275	115.92	0.0805	0.2536	0.7721	0.0441149	0.13897579	0.42311991	29.397312
490	0.00566	108.81	0.0162	0.3391	0.4153	0.009977	0.20883969	0.25576857	36.897471
500	0.00738475	109.35	0.0038	0.4608	0.2185	0.0030686	0.37210633	0.17644365	50.38848
510	0.0091585	107.8	0.0375	0.6067	0.1120	0.0370232	0.5989866	0.11057607	65.40226
520	0.01129475	104.79	0.1177	0.7618	0.0607	0.139307	0.90164885	0.07184311	79.829022
530	0.01337225	107.69	0.2365	0.8752	0.0305	0.3405736	1.26033841	0.04392176	94.250288
540	0.01547375	104.41	0.3768	0.9620	0.0137	0.6087634	1.5542209	0.02213392	100.44242
550	0.0169015	104.05	0.5298	0.9918	0.0040	0.9317068	1.74418055	0.0070344	103.19679
560	0.0181625	100	0.7052	0.9973	0.0000	1.2808195	1.81134613	0	99.73
570	0.01915175	96.33	0.8787	0.9555	0.0000	1.6211032	1.76279056	0	92.043315
580	0.01989025	95.79	1.0142	0.8689	0.0000	1.9323421	1.65550392	0	83.231931
590	0.0213965	88.69	1.1185	0.7774	0.0000	2.1225278	1.47523745	0	68.947606
600	0.02260625	90.01	1.1240	0.6583	0.0000	2.2871023	1.33950131	0	59.253583
610	0.02367225	89.6	1.0305	0.5280	0.0000	2.1857251	1.11990574	0	47.3088
620	0.02480475	87.7	0.8563	0.3981	0.0000	1.862775	0.86601741	0	34.91337
630	0.02589725	83.29	0.6475	0.2835	0.0000	1.3966458	0.61150438	0	23.612715
640	0.0270055	83.7	0.4316	0.1798	0.0000	0.9755715	0.40641279	0	15.04926
650	0.02817425	80.03	0.2683	0.1076	0.0000	0.6049589	0.24261489	0	8.611228
660	0.029361	80.21	0.1526	0.0603	0.0000	0.35938	0.14200926	0	4.836663
670	0.0305195	82.28	0.0813	0.0318	0.0000	0.204156	0.07985439	0	2.616504
680	0.0316925	78.28	0.0409	0.0159	0.0000	0.1014684	0.03944613	0	1.244652
690	0.03285325	69.72	0.0199	0.0077	0.0000	0.0455815	0.01763707	0	0.536844
700	0.0340665	71.61	0.0096	0.0037	0.0000	0.0234192	0.00902616	0	0.264957
					Sumas	19.858186	18.5964541	5.14025199	1161.68952



k							
0.086081521 Xn, Yn y Zn son los valores del iluminantes D65 10°							
X	1.70942	Xn	94.811	$W_x(\lambda) = T(\lambda) * S(\lambda) * \bar{x}_{10}(\lambda)$			
Y	1.60081	Yn	100	$W_y(\lambda) = T(\lambda) * S(\lambda) * \bar{y}_{10}(\lambda)$			
Z	0.44248	Zn	107.304	$W_z(\lambda) = T(\lambda) * S(\lambda) * \bar{z}_{10}(\lambda)$			
x	0.45552	X/Xn	0.01802979				
y	0.42657	Y/Yn	0.01600811				
z	0.11791	Z/Zn	0.00412362				
Análisis de la condicional X/Xn, Y/Yn y Z/Zn		X/Xn	0.26221866	Si[(X/Xn)>0.08856;(X/Xn)^(1/3);7.787*(X/Xn)+(16/116)]			
		Y/Yn	0.25202678	Si[(Y/Yn)>0.08856;(Y/Yn)^(1/3);7.787*(Y/Yn)+(16/116)]			
		Z/Zn	0.17004165	Si[(Z/Zn)>0.08856;(Z/Zn)^(1/3);7.787*(Z/Zn)+(16/116)]			
Valores colorimétricos:							
L*	13.2351	x	0.45551634	X	1.7094228	C* <sub>ab</sub>	17.17065
a*	5.09594	y	0.42657415	Y	1.6008111	h° <sub>ab</sub>	72.73557
b*	16.397	z	0.1179095	Z	0.4424807		
Illuminant and observer:							
	2°			10°			
	Xn	Yn	Zn	Xn	Yn	Zn	
A	109.85	100	35.585	111.144	100	35.2	
C	98.074	100	118.232	97.285	100	116.15	
D50	96.422	100	85.521	96.72	100	81.427	
D55	95.682	100	92.149	95.799	100	90.926	
D65 Daylight	95.047	100	108.883	94.811	100	107.3	
D75	94.972	100	122.638	94.416	100	120.64	
F2 Fluorescen	99.187	100	67.395	103.28	100	69.026	
F7	95.044	100	108.755	95.792	100	107.69	
F11	100.966	100	64.37	103.866	100	65.627	
Fuente: Logicol S.r.l., 2007							

Lightness variable L\*:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16$$

Chromaticity coordinates a\* and b\*:

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right]$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right]$$

where

X, Y, Z: Tristimulus values XYZ (for 2° Standard Observer) or X<sub>10</sub>Y<sub>10</sub>Z<sub>10</sub> (for 10° Supplementary Standard Observer) of the specimen

X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Z<sub>n</sub>: Tristimulus values XYZ (for 2° Standard Observer) or X<sub>10</sub>Y<sub>10</sub>Z<sub>10</sub> (for 10° Supplementary Standard Observer) of a perfect reflecting diffuser.

If X/X<sub>n</sub>, Y/Y<sub>n</sub>, or Z/Z<sub>n</sub> is less than (24/116)<sup>3</sup>, the above equations are changed as described below:

$$\left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} \text{ is replaced by } \frac{841}{108} \left( \frac{X}{X_n} \right) + \frac{16}{116}$$

$$\left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \text{ is replaced by } \frac{841}{108} \left( \frac{Y}{Y_n} \right) + \frac{16}{116}$$

$$\left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \text{ is replaced by } \frac{841}{108} \left( \frac{Z}{Z_n} \right) + \frac{16}{116}$$

## CÁLCULO DE VALORES TRIESTÍMULO X, Y y Z

$$k = \frac{100}{\sum_{100}^{800} \bar{y}_{10}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda} = \frac{100}{1161.68952} = 0.08608152$$

$$X = k \sum_{\lambda} T(\lambda) * S(\lambda) * \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda = k \sum_{\lambda} W_x(\lambda) \Delta\lambda = 0.08608152 * 19.8581857$$

$$X = 1.70942282$$

$$Y = k \sum_{\lambda} T(\lambda) * S(\lambda) * \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda = k \sum_{\lambda} W_y(\lambda) \Delta\lambda = 0.08608152 * 18.5964541$$

$$Y = 1.60081105$$

$$Z = k \sum_{\lambda} T(\lambda) * S(\lambda) * \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda = k \sum_{\lambda} W_z(\lambda) \Delta\lambda = 0.08608152 * 5.14025199$$

$$Z = 0.44248071$$

### CALCULO DE VALORES $L^*a^*b^*$ , $C_{ab}^*$ y $h_{ab}^\circ$

Para el cálculo de  $L^*$  y  $a^*$ , usaremos las ecuaciones (19) y (20), debido a que son menores al umbral 0.0088856 ó  $\left(\frac{24}{116}\right)^3$ , así:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 = 116 * 0.2520268 - 16 = 13.2351065$$

$$a^* = 500 \left[ \left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] = 500 * [0.262219 - 0.252027] = 5.096$$

Para el cálculo de  $b^*$ , debido a que  $\frac{Z}{Z_n} = 0.004124 < 0.008856$ , entonces

$$\left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} \text{ de la ecuación (21) será reemplazado por } \frac{841}{108} \left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{16}{116}$$

Entonces:

$$b^* = 200 \left[ \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] = 200 [0.252027 - 0.170042] = 16.3970265$$

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} = (5.09593879^2 + 16.3970265^2)^{0.5} = 17.17065$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{16.3970265}{5.09593879}\right) = 72.74^\circ$$

### 3.3.2 MEDICIÓN DEL COLOR POR TRANSMITANCIA, UTILIZANDO EL ESPECTROFOTÓMETRO CM-5 DE KONICA MINOLTA

Las medidas fueron realizadas en el mes de junio del 2017. Se utilizaron 5 muestras de naranja; Huando que corresponde al grupo Navel, Valencia y naranja de jugo criolla (ambas pertenecen al grupo de blancas), además de Tangelo que es un híbrido de mandarina y naranja y por último uno envasado sabor naranja (Cifrut). Estos se

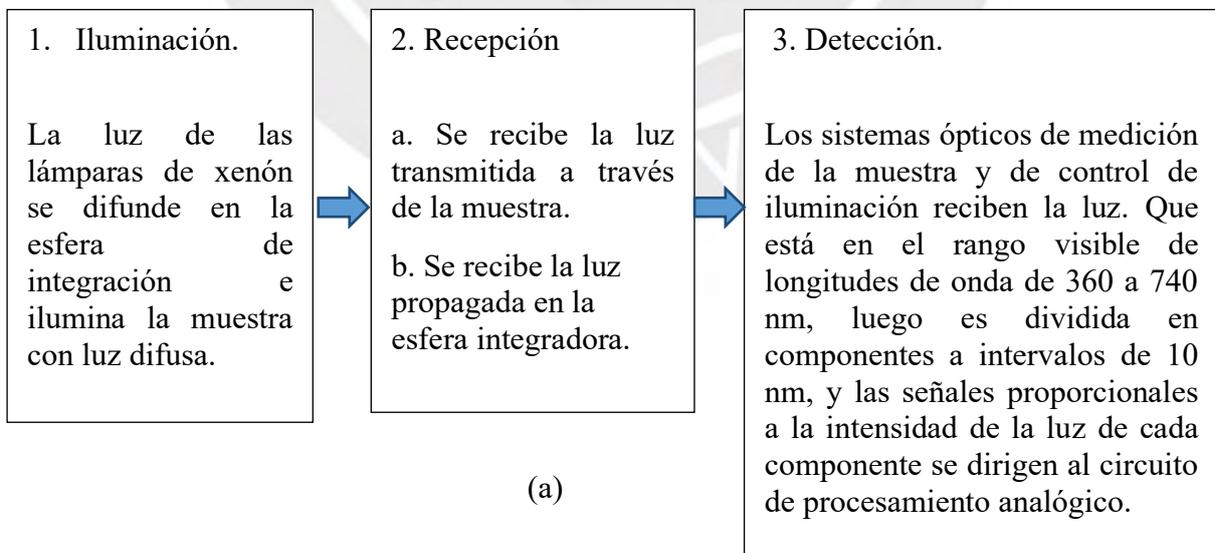
exprimieron, se colaron y luego se colocaron en una cubeta de plástico codificada como CM-A131, la cubeta tiene un espesor de 10 mm para el paso de la luz.

Después de calibrar el equipo según su manual, se obtuvieron las medidas del color en las escalas  $L^*a^*b$  y  $L^*c^*h$  utilizando el software de color del equipo.



Figura 36. En la figura de la izquierda se muestra el compartimento donde se inserta la cubeta usada para la medición del color con el equipo CM 5.

A continuación, en la Figura 37(a) mostramos mediante un diagrama de flujo, el proceso de medición del color por transmitancia, usando el equipo CM-5 de Konica Minolta, obtenido del manual de instrucciones del mismo equipo. Luego en la figura 37(b) se muestra un esquema de la geometría óptica usada para realizar la medición del color



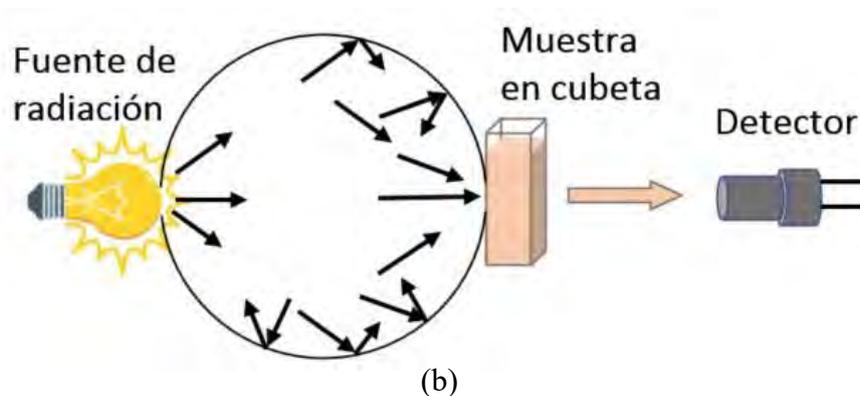


Figura 37. (a) Esquema del diagrama de flujo, mostrando la medición, obtenido de: [https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction\\_manual/color/pdf/cm-5\\_instruction\\_spa.pdf](https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cm-5_instruction_spa.pdf), (b) Diagrama aproximado de la geometría d/0 (iluminación difusa/0° de observación)

### 3.3.3 MEDICIÓN DEL COLOR POR REFLECTANCIA, UTILIZANDO EL ESPECTROFOTOMETRO CM 700d DE KONICA MINOLTA

Las medidas del color por reflectancia fueron realizadas en el mes de enero del 2016, se utilizaron 28 muestras de naranjas provenientes de diferentes puestos de venta de frutas en Lima metropolitana que son la naranja Huando que corresponde al grupo Navel, Valencia y criolla (ambas pertenecen al grupo de blancas), Tangelo que es un híbrido de la mandarina y por último los jugos envasados a base de concentrado de naranja. Luego éstos se exprimieron y se colaron para ser colocados en una cubeta de plástico circular de 1,50 cm de altura y 4,1 cm de diámetro (accesorio CM 128: destinado a medición del color de líquidos del modelo CM 700d de Konica Minolta).

Después de calibrar el equipo usando una placa cerámica blanca estándar, se realizaron varias medidas de cada muestra en el rango de longitud de onda comprendido entre 400 nm a 700 nm que corresponde al espectro visible, con intervalo de longitud de onda de  $\Delta\lambda=10$  nm. Estos se procesaron con el software OnColor v 5x, utilizando el observador de 10° y el iluminante D65 cuya tabla de datos se muestran en los anexos b y c, en el

modo SCI (componente especular incluida) y el área de iluminación y medición, denotada como MAV ( $\phi=8$  mm).

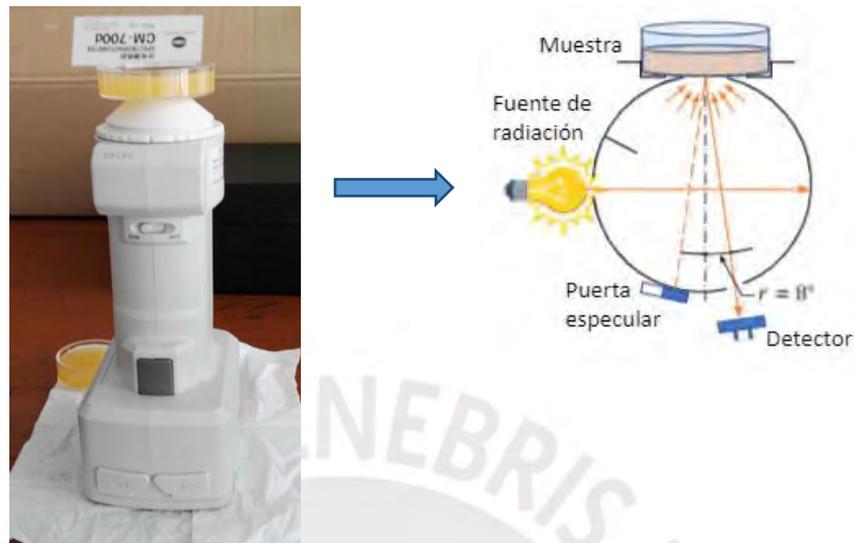
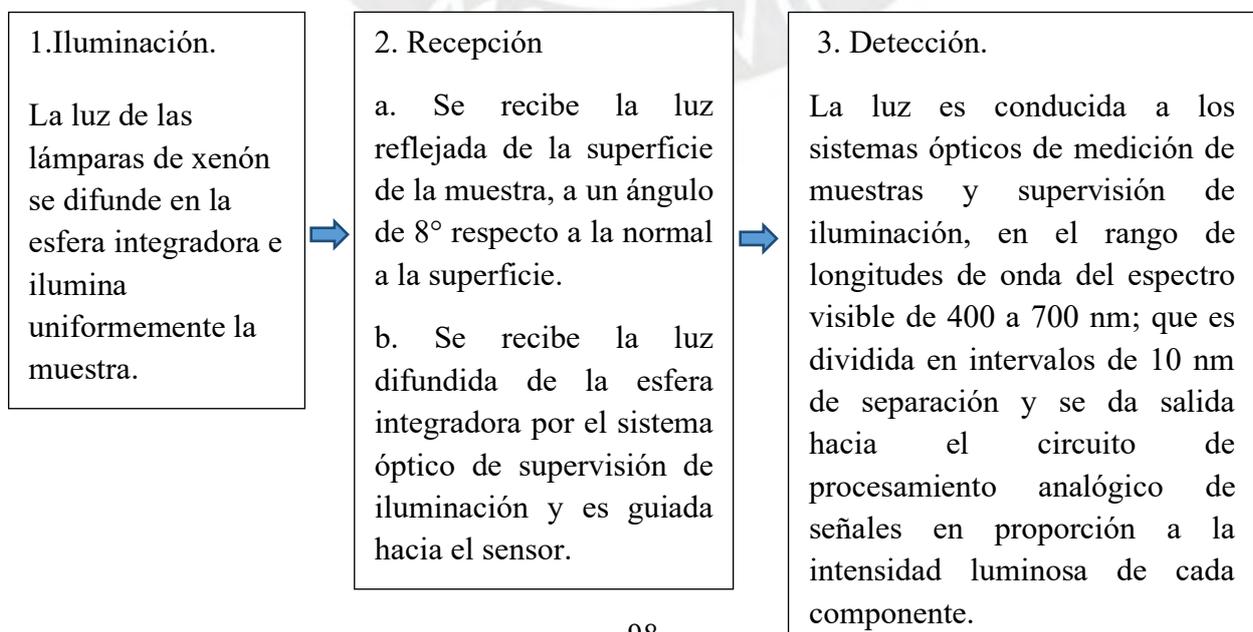


Figura 38. Vista de la muestra de zumo colocada sobre el espectrofotómetro CM 700d y un esquema aproximado de su configuración óptica d/8° (iluminación difusa/8° de observación).

Las principales características del sistema óptico es que tiene una geometría de iluminación difusa, con 8° de ángulo de visión, con una esfera de integración de 40 mm de diámetro y cuenta con un conjunto de fotodiodos de silicio (doble de 36 elementos), un modelo de esta geometría se muestra en la Figura 38.

En el manual de instrucciones del espectrofotómetro CM-700d de Konica Minolta, se indica el siguiente diagrama flujo para realizar la medición del espectro de reflectancia.



## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO THERMO SPECTRONIC.

Las medidas de color obtenidas a partir de mediciones de transmitancia con el espectrofotómetro de la marca Thermo Spectronic, modelo Helios Gamma son las que se muestran en la Tabla 6 y son graficadas en el espacio CIELAB como se presentan en la Figura 42 (plano  $a^*b^*$ ) y la claridad con el parámetro  $L^*$  (Figura 41), la gráfica de transmitancia se puede ver en la Figura 45.

Las muestras estudiadas fueron: zumos de naranjas envasados (Ecofresh, Vitta y Londa), y zumos frescos de naranjas Valencia (grupo blancas), Tangelo selva e importada, Huando nacional e importado<sup>8</sup> (grupo Navel) y son mostradas en las Figura 39 y Figura 40. De ellas se tomaron 19 muestras que fueron adquiridas en un supermercado de Lima.

Las medidas espectrales de transmitancia fueron realizadas el 30 de abril, 7 de mayo y 21 de mayo 2016 en el Laboratorio de Óptica de la PUCP, se tomaron a una temperatura ambiente, se calibró el equipo con agua destilada como blanco de referencia.

---

<sup>8</sup> La naranja Huando es un término acuñado y conocido por la población peruana, pero en realidad hace referencia a la variedad Washington Navel y la denominación huando importado a la variedad Navel late.



Figura 39. Fotografía de las muestras de jugos envasados, Tangelo y naranja de jugo (Valencia)

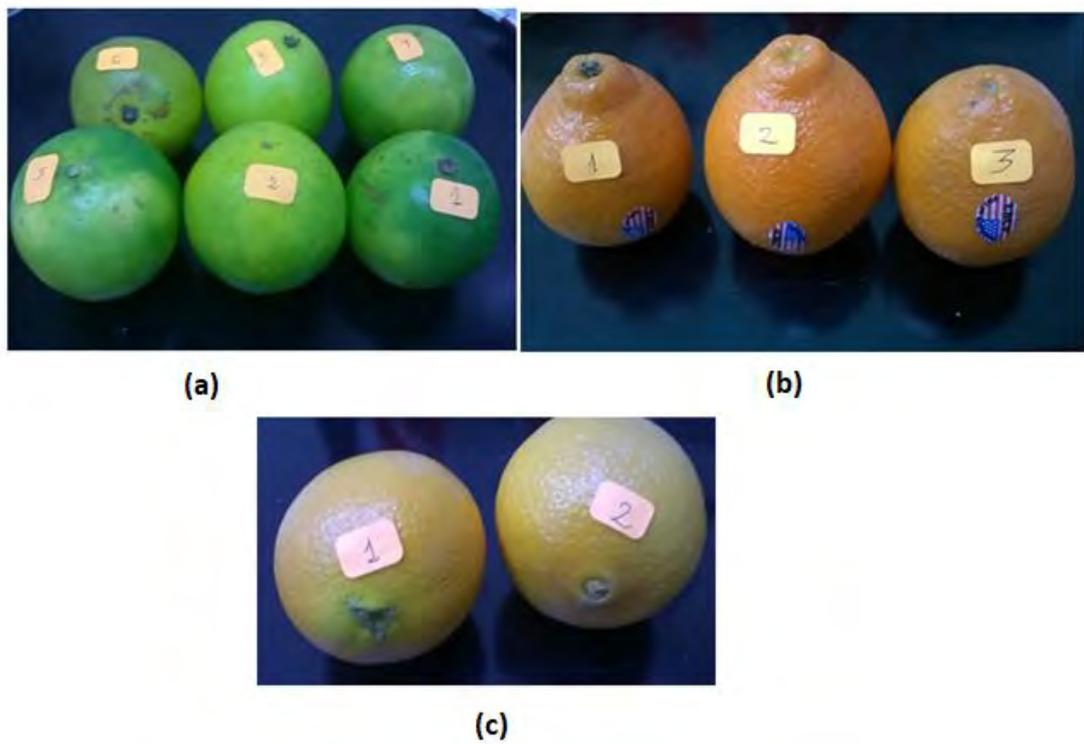


Figura 40. Muestras analizadas: (a)Naranja de jugo (Valencia), (b) Tangelo sin pepa (importado) y (c) Huando nacional

Tabla 6. Valores cuantitativos de la escala de color L\*a\*b\* y L\*c\*h\* obtenidos con el espectrofotómetro Helios Gamma

	NARANJA	L*	a*	b*	C* <sub>ab</sub>	h° <sub>ab</sub>	ΔE
Tangelo	Tangelo selva	13.46	5.43	14.95	15.90	70.04	
	Tangelo selva	16.22	6.06	16.20	17.30	69.49	
	Tangelo selva	13.24	4.88	14.68	15.47	71.61	
	Tangelo selva	11.43	4.49	15.47	16.11	73.82	
	Tangelo selva	13.73	3.82	17.01	17.40	77.34	
	PROMEDIO	13.62	4.94	15.66	16.44	72.46	5.29
	DESVEST	1.71	0.86	0.95	0.87	3.20	
	Tangelo sp1	6.56	4.58	9.75	10.78	64.84	
	Tangelo sp2	5.87	4.45	8.69	9.76	62.88	
	Tangelo sp3	3.53	3.31	5.59	6.50	59.37	
	PROMEDIO	5.32	4.11	8.01	9.01	62.36	6.42
	DESVEST	1.59	0.70	2.16	2.24	2.77	
Huando	Huando nac.	7.57	1.69	8.76	8.92	79.08	4.45
	Huando imp	6.38	3.27	8.69	9.29	69.38	
	Huando imp	7.48	3.40	10.33	10.88	71.78	
	PROMEDIO	6.93	3.34	9.51	10.09	70.68	4.16
Valencia (referencia)	Valencia1	8.33	2.63	10.47	10.80	75.90	
	Valencia2	13.19	3.73	14.36	14.84	75.44	
	Valencia3	11.13	3.66	13.03	13.53	74.31	
	Valencia4	9.55	3.21	11.47	11.91	74.37	
	Valencia5	8.98	2.43	10.77	11.04	77.29	
	PROMEDIO	10.24	3.13	12.02	12.42	75.40	4.45
	DESVEST	1.95	0.59	1.64	1.72	1.23	
Envasados	Ecofresh	3.16	0.37	3.84	3.86	84.50	11.16
	Londa	2.58	0.85	3.51	3.61	76.31	11.67
	Vitta	4.39	0.36	4.87	4.88	85.80	9.65

## Resultados en la escala CIELAB

### Valores de claridad (L\*)

Los valores de L\* son los mostrados en la Tabla 6 y graficados en la Figura 41, se encuentran en el rango de 2,58 a 16,22 siendo los zumos envasados los de menor valor de claridad, seguido de Tangelo sin pepa, luego Huando importado y nacional y las más iluminadas las correspondientes a la naranja Tangelo selva con un promedio de  $L^* = 13.62 \pm 1.71$ , seguido de la naranja Valencia con un valor promedio de  $L^* = 10.24 \pm 1.95$

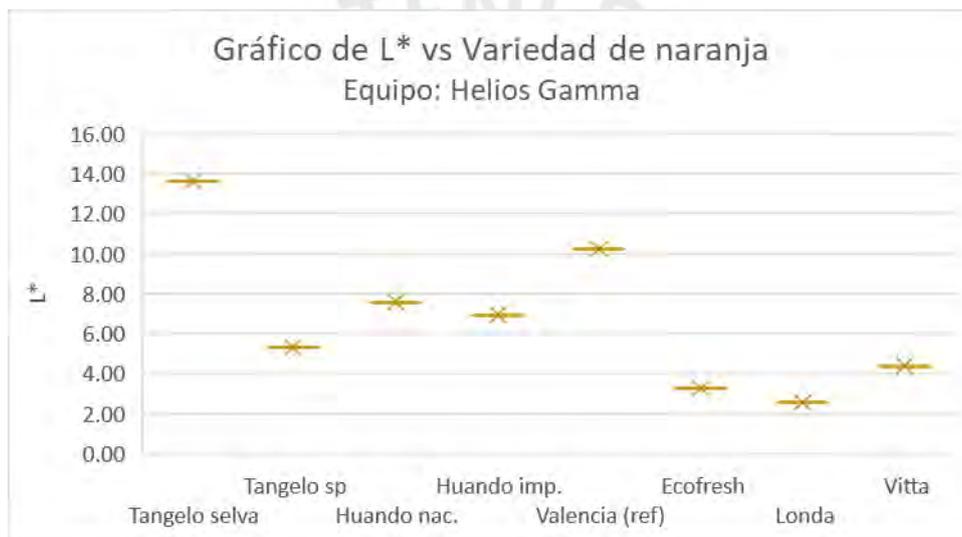


Figura 41. Resultados de valores de claridad L\* en la escala de color CIELAB.

### Valores a\* y b\* (componentes de rojo y amarillo)

En la Figura 42, se observa la agrupación de tres grupos más resaltantes correspondientes a: zumos envasados, Tangelo selva y Valencia, las restantes Huando y Tangelo importadas de USA no se encuentran claramente agrupadas. Todos los zumos se encuentran en el primer cuadrante del plano a\*b\* en la zona de amarillos anaranjados. Los valores de a\*b\* son mayores para el grupo Tangelo ( $a^* = 4.94 \pm 0.86$ ;  $b^* = 15.66 \pm$

0.95) y menores para el grupo de zumos envasados siendo el jugo Ecofresh el de menor valor ( $a^* = 0.37$ ;  $b^* = 3,84$ ).

Observando los valores  $a^*$  y  $b^*$  la naranja Tangelo selva y Valencia tienen mayores valores del componente amarillo ( $b^*$ ) y más componente roja ( $a^*$ ) para la naranja Tangelo selva y Tangelo sin pepa.

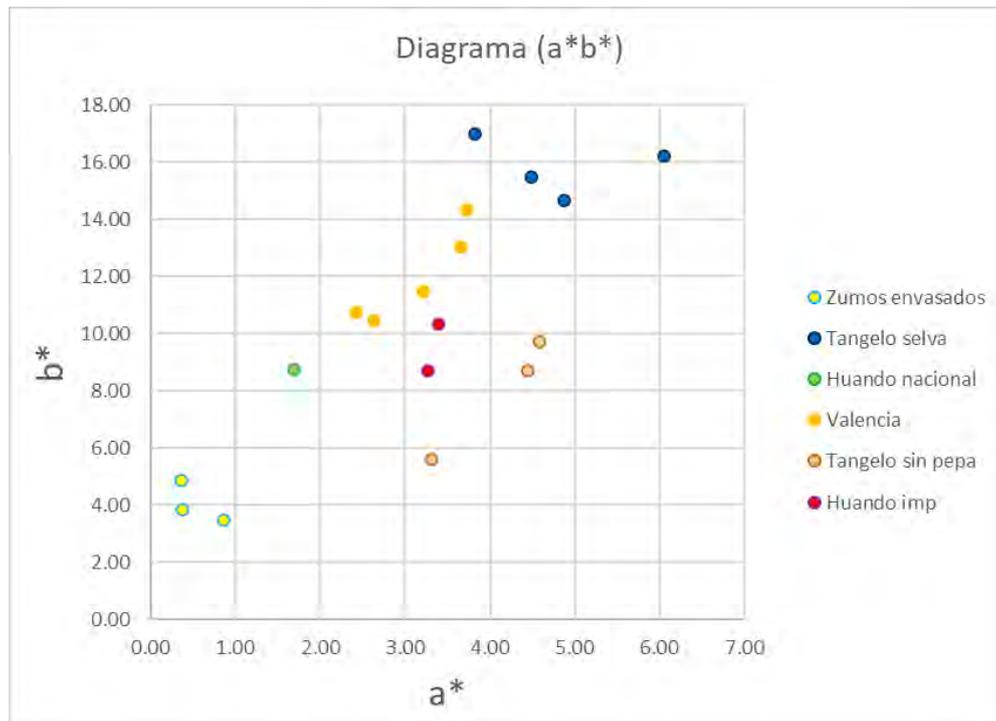


Figura 42. Resultados de valores  $a^*$  y  $b^*$  en la escala de color CIELAB.

## Resultados escala CIELCH

### Croma ( $C_{ab}^*$ )

Comparando los valores de croma o saturación del color  $C_{ab}^*$  mostrados en la Figura 43, la naranja Tangelo selva es la que tiene mayor saturación de color, seguido de Valencia y Huando que es cercano en valor con la variedad Tangelo sin pepa, y por último con menor saturación de color están los zumos envasados.

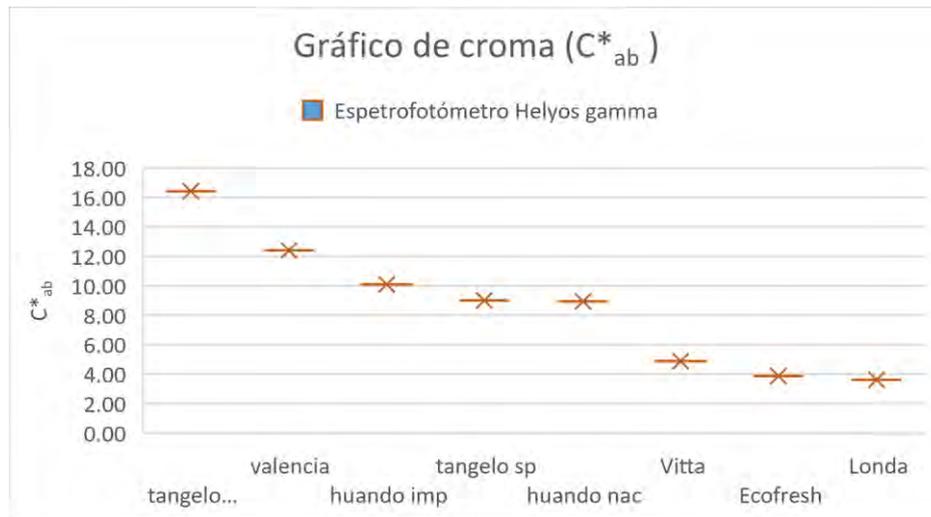


Figura 43. Valores de cromatografía según variedad del zumo de naranjas frescas e industriales (Vitta, Ecofresh y Londa).

### Tono ( $h^{\circ}_{ab}$ )

La Figura 44, muestra los resultados de los valores de tono de los zumos de naranja analizados, aquellos que tienen valores más cercanos a los  $90^{\circ}$ , como el caso de los zumos Vitta y Ecofresh son más amarillentos, y el de tendencia a tener los tonos con tendencia al rojizo es el de la variedad Tangelo sp (importado sin pepa)

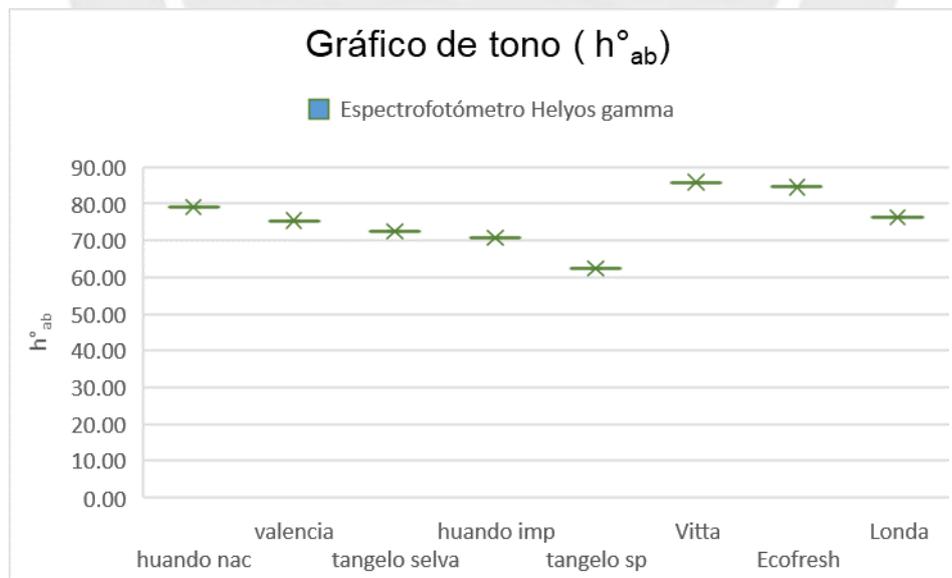


Figura 44. Tono de color de zumos de naranja según variedad y zumos industriales: Vitta, Ecofresh y Londa.

## Diferencias de color

Según la teoría y los valores de diferencia de color ( $\Delta E$ ), descritos en la sección (2.5.4.3), considerando que  $3.5 < \Delta E < 5$ , es un indicador que las muestras son visualmente diferenciables entre ellas, al compararse el zumo de cada variedad de naranja, con respecto a la naranja Valencia se tienen valores de  $\Delta E = 5.29, 6.42, 4.16$  y es aún más diferenciable con los zumos envasados con  $11.16, 11.67, 9.65$ ,

## Transmitancia

Los resultados de la transmitancia espectral promedio se muestran en la Figura 45, donde los mayores valores de transmitancia llegan cerca del 5% y corresponde a la naranja Tangelo selva y cerca de 2.5 % corresponde a la naranja Valencia, mientras que para los zumos envasados los valores de transmitancia están por debajo del 1% esto puede deberse a que son más concentrados y las muestras tienen a dispersar la luz y ésta no llega al detector del equipo.

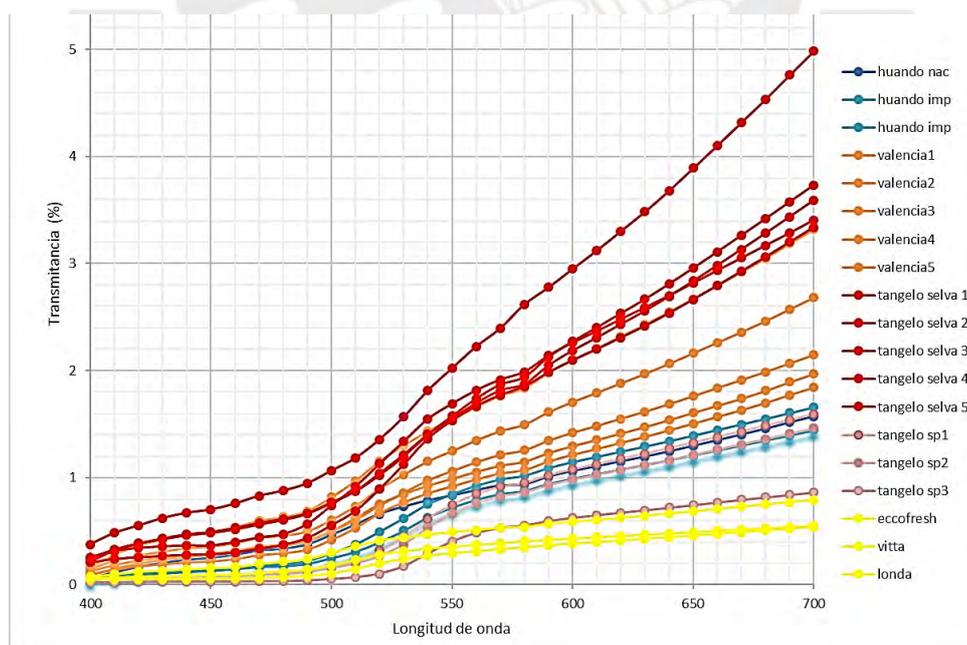


Figura 45. Espectros de transmitancia de los zumos de naranjas Huando, Valencia, Tangelo selva, Tangelo sin pepa, y jugos envasados, medidos con el espectrofotómetro Thermo Spectronic.

#### 4.1.1 Discusión de resultados obtenidos con el equipo Thermo Spectronic

Se mostraron las gráficas y tabla de valores de las mediciones del color de las muestras de zumos en las escalas CIELAB y CIELCH, todas las muestras se encontraron en el primer cuadrante (zona de amarillos-anaranjados), los valores de tonos y croma son ordenados de mayor a menor valor, aquellos cercanos a los 90° tienen más componente de amarillo y los de mayor croma presentan mejor saturación de color. Sin embargo, en relación con su apariencia de color tener valores de  $L^*$  (claridad) que no pasan de 20, es un indicador en la escala CIELAB de una reducida gama de colores con tendencia a valores más oscuros. En la sección 2.3.5.2, se explica y muestra como a medida que el valor de  $L^*$  aumenta o disminuye, en la escala CIELAB la gama de colores se reduce, además los valores bajos de croma ( $C_{ab}^*$ ) contribuyen a reducir la viveza de los colores a colores oscuros.

El zumo de naranja, es una muestra de tipo translúcida ya que al observarse a simple vista está entre clara y opaca y siendo que en la extracción del zumo pudo tener contenidos de pulpas pequeñas hizo que mucha de la luz incidente al zumo no llegue al detector del espectrofotómetro y que esta luz se haya perdido por dispersión, una desventaja con este modelo de espectrofotómetros de la marca Thermo Spectronic ahora llamado Thermo Scientific es que el haz que incide en la cubeta tiene un ancho de apenas 2mm con una altura de 7mm (valor indicado para el modelo Genesys 10s que es el que le sigue al modelo Helyos Gamma).

Con el fin de estudiar el efecto de un mejor filtrado de las pulpas de fruta en el jugo de naranja y su relación con los valores colorimétricos CIELAB ( $L^*a^*b^*$ ). Previamente se realizó el filtrado del zumo de naranja con un papel filtro de 5  $\mu\text{m}$  y luego se usó el equipo Thermo Scientific modelo Genesys 10s, para obtener el espectro de transmitancia.

Encontrándose que las muestras tomaron una apariencia más pálida; es decir, los valores de claridad  $L^*$  se incrementaron considerablemente entre 60-83 unidades, pero no se incrementó el croma incluso el parámetro  $a^*$  se redujo más, esto va acorde con lo mencionado por (Meléndez-Martínez et al, 2005, p.897) quien concluye que la información cromática obtenida no coincide con el color real del producto, por la manipulación (filtrado) de la muestra y respecto a las mediciones por espectrofotometría de transmisión convencional y que pueden ser muy útiles para las industrias que no cuentan con instrumentación más específica.

Los resultados de diferencia de color ( $\Delta E$ ), que los relacionan con la percepción del ojo humano, descrito por (Mokrzycki, 2011), considera que para  $3.5 < \Delta E < 5$ , se notan una clara diferencia de color al compararse el zumo de cada variedad de naranja, con respecto a la naranja Valencia se tienen valores de  $\Delta E = 5.29, 6.42, 4.16$  y es aún más diferenciable con los zumos envasados con  $11.16, 11.67, 9.65$ . Una aplicación en que puede aprovecharse es hacer seguimiento de cambios de color de muestras líquidas transparente al mezclarse con otras de la misma naturaleza.

Este estudio también se propuso analizar la potencialidad del espectrofotómetro de transmisión como medidor de color. Por esto se terminó de implementar una plantilla Excel con los valores de iluminantes y el observador CIE en formato digital y el cálculo de los valores triestímulo y los valores de la escala CIE<sub>xy</sub> que en un inicio nos proporcionó gentilmente el M.C. Juan Manuel Bujdud del CIO Aguascalientes, así como la capacitación en el manejo del programa ColorCIO para el cálculo de las variables colorimétricas. Nuestro aporte fue hacer la plantilla para el cálculo del color en la escala CIELAB y CIELCH y los resultados fueron contrastados con el programa ColorCIO versión 2007 (ver Tabla 5).

Con la implementación de este programa de cálculo de color y teniendo un equipo cuya geometría óptica corresponde a 0/0 (a 0° ubicado la fuente de iluminación y a 0° el detector) como se observa en la Figura 32, se encontró que éste se puede adecuar mejor a la medida del color de muestras transparentes como el vino u otra bebida clara, como también es sugerido por Legget (2008).

#### 4.2 RESULTADOS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO KONICA MINOLTA CM-700d

Las muestras de zumos frescos fueron obtenidas de la naranja Valencia (grupo blancas), Tangelo y Huando (grupo Navel), además de muestras de zumos envasados y frescos que son mostradas en la siguiente Figura 46. El procedimiento de calibrado es explicado en la sección 3.3.3.

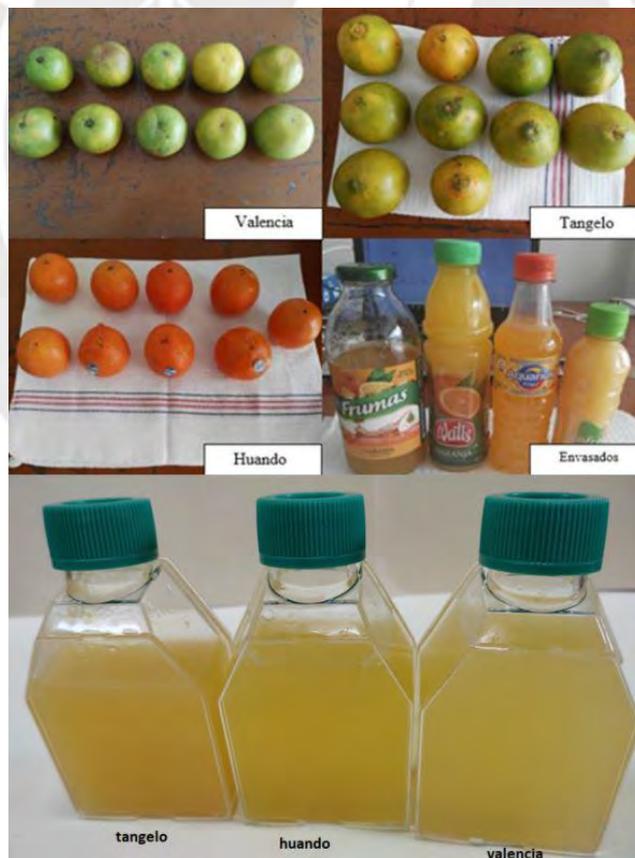


Figura 46. Fotografías de las naranjas Valencia, Tangelo, Huando y sus respectivos zumos

En la Tabla 7, se observan los resultados de medida del color en el espacio CIELAB y CIELCH de las muestras de zumos frescos de naranja.

Tabla 7. Tabla de resultados de color de muestras de zumo con el espectrofotómetro CM 700d

Naranja	etiquetas zumo	L*	a*	b*	C* <sub>ab</sub>	h° <sub>ab</sub>	ΔE
Valencia	Valencia 1	37.74	0.88	10.44	10.47	85.20	
	Valencia2	37.95	2.33	11.77	12.00	78.81	
	Valencia 3	38.86	1.80	11.70	11.84	81.28	
	Valencia 4	38.15	1.41	11.64	11.72	83.08	
	Valencia 5	38.26	1.08	10.79	10.84	84.28	
	Valencia 6	38.37	0.85	10.55	10.58	85.38	
	Valencia 7	36.97	1.83	10.52	10.67	80.13	
	Valencia 8	37.53	1.50	10.19	10.30	81.61	
	Promedio	37.98	1.46	10.95	11.05	82.40	0.00
	Desvest	0.57	0.52	0.65	0.83	1.05	
Naranja	etiquetas zumo	L*	a*	b*	C* <sub>ab</sub>	h° <sub>ab</sub>	ΔE
Huando	Huando1	39.99	0.74	11.79	11.82	86.42	
	Huando2	40.63	0.77	13.50	13.52	86.71	
	Huando3	40.62	0.90	14.27	14.30	86.41	
	Huando4	39.50	1.08	12.98	13.03	85.23	
	Huando5	39.34	1.08	13.01	13.06	85.26	
	Huando6	40.03	0.85	13.67	13.69	86.45	
	Huando7	39.65	1.06	12.78	12.82	85.24	
	Huando8	38.74	1.33	12.55	12.62	83.97	
	Promedio	39.81	0.98	13.07	13.11	85.71	2.85
	Desvest	0.64	0.20	0.75	0.75	0.94	
Naranja	etiquetas zumo	L*	a*	b*	C* <sub>ab</sub>	h° <sub>ab</sub>	ΔE
Tangelo	Tangelo1	36.47	1.86	9.96	10.13	79.40	
	Tangelo2	36.54	1.75	9.90	10.05	79.95	
	Tangelo3	36.84	0.94	9.36	9.40	84.24	
	Tangelo4	36.48	1.85	11.30	11.45	80.68	
	Tangelo5	36.37	1.54	9.20	9.32	80.50	
	Tangelo6	35.60	2.03	11.76	11.93	80.22	
	Tangelo7	36.79	1.37	10.02	10.11	82.20	
	Tangelo8	36.78	1.32	9.80	9.89	82.33	
	Promedio	36.49	1.58	10.16	10.29	81.19	1.69
	Desvest	0.40	0.36	0.90	0.93	1.60	
ENVASADOS		L*	a*	b*	C* <sub>ab</sub>	h° <sub>ab</sub>	ΔE
	Ecofresh	47.74	-1.43	14.41	14.48	95.65	10.75
	Watts_naranja	35.90	0.60	11.57	11.59	87.04	2.34
	Frumas	34.25	3.45	11.32	11.84	73.04	4.24
	Aquarius	34.62	5.41	13.88	14.90	68.70	5.96

## Resultados en la escala CIELAB

### Valores de claridad (L\*)

Respecto a los valores de claridad L\* de los zumos frescos, el de mayor valor es el zumo de la naranja Huando, seguido de la Valencia y Tangelo y menos claros los zumos envasados a excepción del Ecofresh que es el más claro de todos, observable también en la Figura 47.

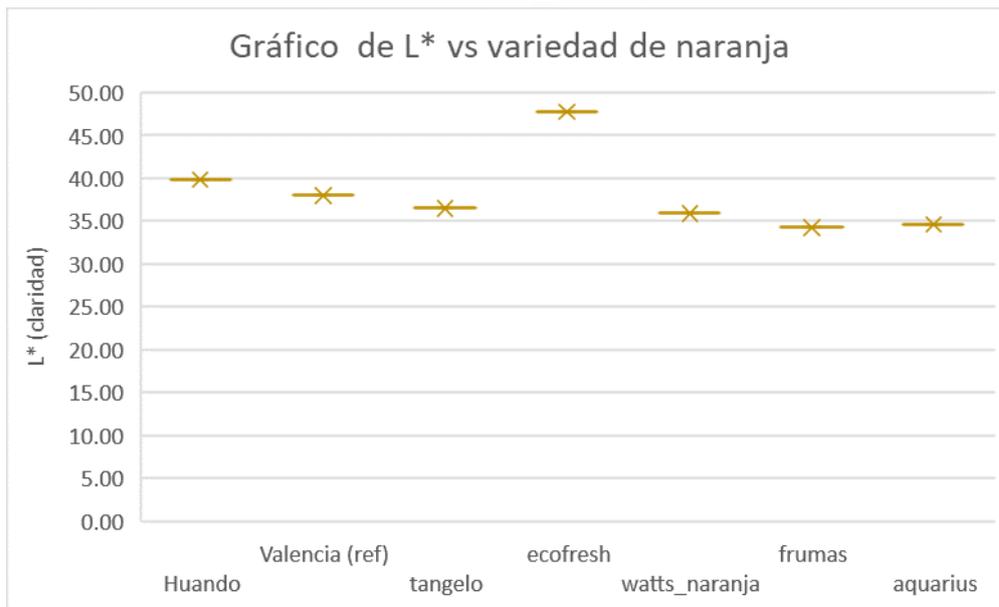


Figura 47: Valores promedio de L\* de las variedades de zumo de naranja frescas e industriales.

### Valores a\* y b\* (componentes de rojo y amarillo)

En la Figura 48 se observa que todas las muestras se encuentran en el primer cuadrante del sistema CIELAB en la zona de amarillos anaranjados siendo en el caso de los zumos frescos la más colorida corresponde a la naranja Huando que tiene más componente amarillo que rojo, mientras que en el caso de zumos envasados el jugo Aquarius es el más colorido esto también se nota en un mayor valor de saturación del color  $C_{ab}^*$ . El jugo

Ecofresh es el único que aparece en el segundo cuadrante con mayor componente amarillo y una parte de verde.

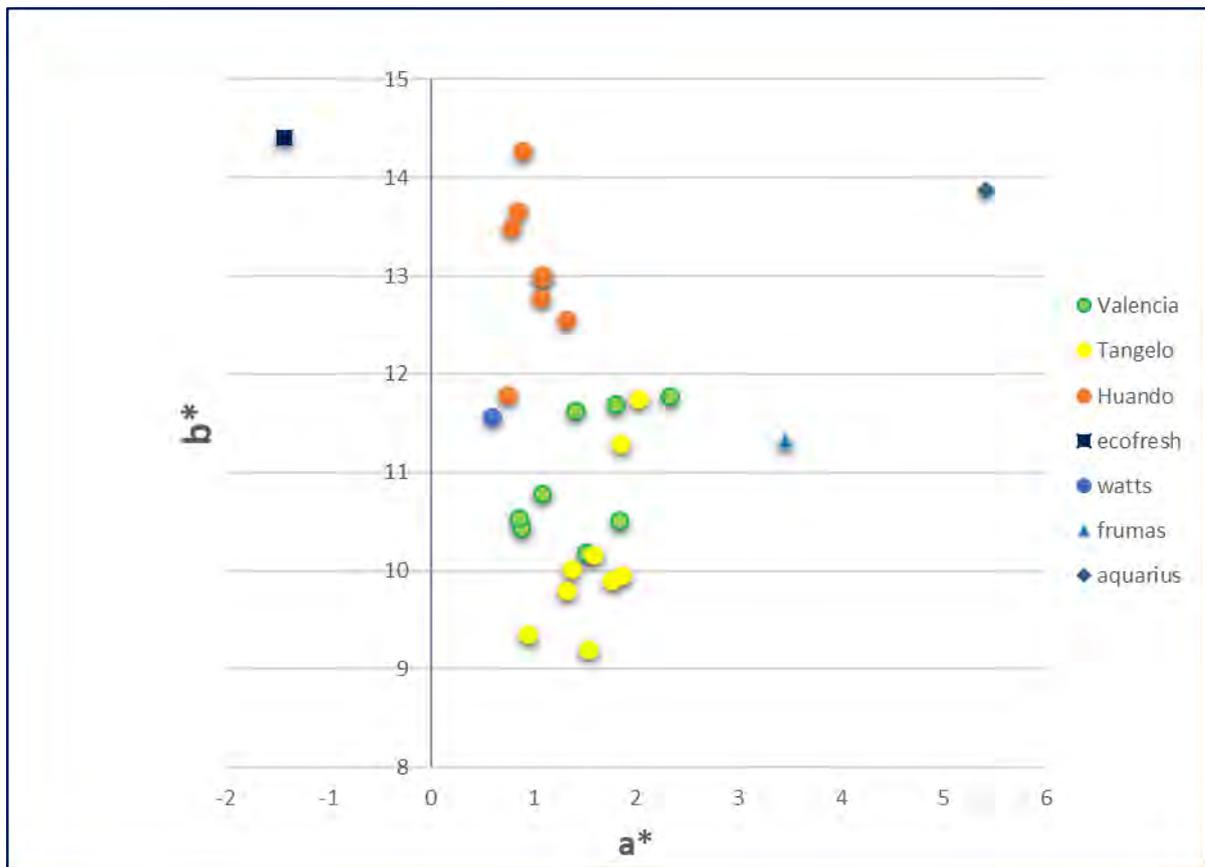


Figura 48. Diagrama a\*b\* rojo-amarillo de las variedades de zumo de naranja.

## Resultados escala CIELCH

### Croma ( $C_{ab}^*$ )

La Figura 49, muestra que la naranja Huando tiene mayor valor de saturación de color  $C_{ab}^*$  en relación con los zumos frescos, seguido de la naranja Valencia y Tangelo. En los zumos envasados, Aquarius y Ecofresh presentan mayores valores de saturación de color.

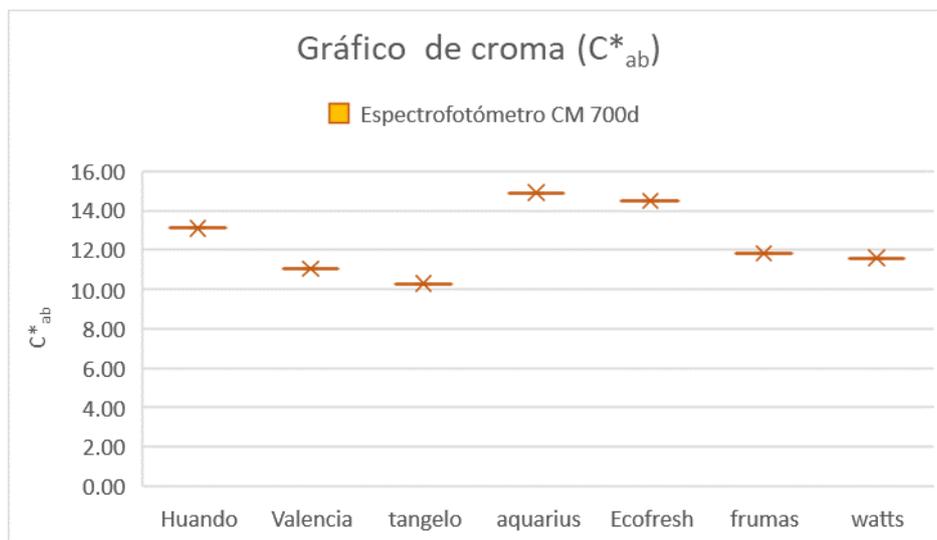


Figura 49. Valores de croma según variedad de zumo de naranjas frescas (Huando, Valencia, e industriales (Aquarius, Ecofresh, Frumas y Watts).

### Tono ( $h^{\circ}_{ab}$ )

La Figura 50, muestra que la naranja Huando presenta el tono con mayor tendencia al amarillo, la Valencia y Tangelo presentan valores cercanos. En cuanto a los zumos industriales, Ecofresh es más amarillento, mientras que Aquarius presenta más tonalidad hacia los rojos.

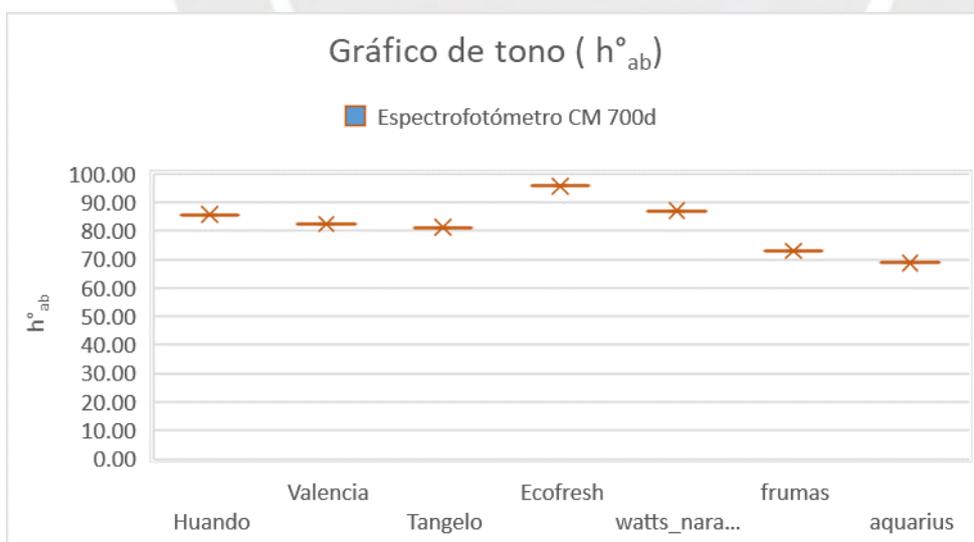


Figura 50. Tono de color de zumos de naranja según variedad y zumos industriales: Ecofresh, Watts, Frumas y Aquarius.

## **Diferencias de color**

En el análisis de diferencias de color en los zumos de las naranjas tomando de referencia a la naranja Valencia, se calculó para la naranja Tangelo  $\Delta E=1.69$  indicador de que sólo un observador experimentado notará diferencias visuales respecto a la naranja Valencia, mientras que con Huando se tiene  $\Delta E=2.85$  esto significa que puede diferenciarse de la Valencia. En el caso de los zumos envasados Ecofresh, Frumas, Watts y Aquarius sus valores de diferencia de color son  $\Delta E=10.75$ ;  $\Delta E=2.34$ ,  $\Delta E=4.24$  y  $\Delta E= 5.96$ , son todos diferenciables de la naranja Valencia. Bajo las consideraciones explicadas por (Mokrzycki, 2011) descritos en la sección 2.5.4.3, cuando  $3.5 < \Delta E < 5$ , se nota una clara diferencia de color y si  $2 < \Delta E < 3.5$ , el observador inexperto también notará la diferencia,  $1 < \Delta E < 2$ , solo un observador experimentado puede notar la diferencia. Otra referencia importante para determinar el umbral de discriminación con la escala CIELAB para el de zumo de naranjas lo da (Fernández-Vázquez, 2013) que propone el valor alrededor de 2.8 para panelistas no entrenados y de 1.5 para panelistas entrenados.

## **Reflectancia**

En cuanto a los valores de porcentaje de reflectancia versus longitud de onda, mostrados en la Figura 51, el jugo Ecofresh, que según el fabricante es de zumo de naranja pasteurizado, es el que más refleja la luz proveniente de la fuente, esto puede ser debido a que tiene más contenido de pulpas de naranjas y es más concentrado, luego es seguido de la naranja Huando y Tangelo; se observa menor porcentaje de reflectancia en el resto de zumos envasados (Frumas, Watts, Aquarius), también se resalta la diferencia en la forma de la curva en estos zumos porque la mayoría de ellos no son zumos puros y en sus ingredientes indican tienen colorantes añadidos, saborizantes y estabilizantes.

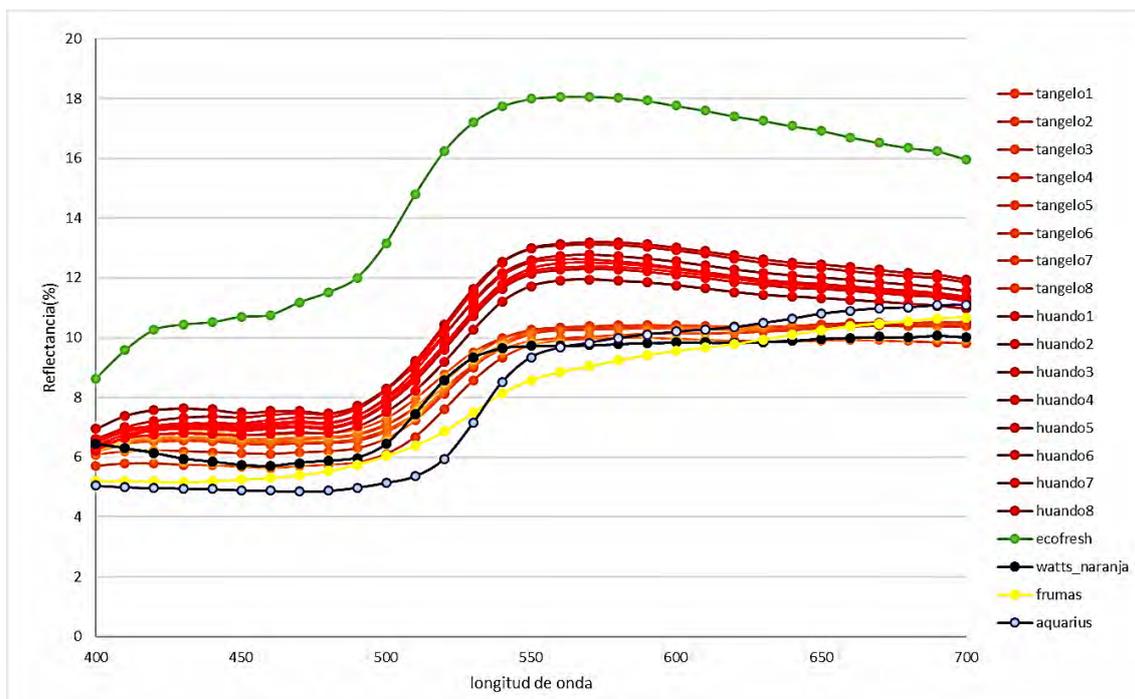


Figura 51. Gráfica de porcentaje de reflectancia versus longitud de onda.

#### 4.2.1 Discusión de resultados obtenidos con el equipo Konica Minolta CM-700d

Tras revisar la literatura existente en (Conesa et al, 2015), (Schuavd et al, 2013), (Fernández-Vázquez, 2010), (MacDougal, 2010), (Hunterlab, 2008) y (Pérez López et al, 2006) respecto a la evaluación del color en zumos frescos de naranja se encontró valores muy variados: para  $L^*$  están en el rango de 34-77,  $a^*=2-8$ ;  $b^*=20-68$ , al compararlos con el que encontramos con nuestro equipo, tenemos valores muy bajos para la variable  $b^*$  los que obtuvimos están entre 9 y 14 y para  $a^*$  los valores que tenemos no pasan de 3; para  $L^*$  de 34 a 48; creemos que esto es debido a una limitante de la altura del contenedor de la muestra de análisis que fue de 1,5 cm. Nos quedó pendiente acondicionar un recipiente de mayor altura como sugiere (MacDougal, 2010), esto con el fin de mejorar la equivalencia entre la medida instrumental y su equivalente perceptual.

Las coordenadas de color presentadas en la Tabla 7 tienen valores más altos en comparación con las mediciones realizadas con el espectrofotómetro Helios Gamma. Sin

embargo, estos resultados no son consistentes con la equivalencia de la escala de color Munsell, ya que los bajos valores del croma ( $C_{ab}^*$ ) y los valores de claridad  $L^*$  son indicadores de pérdida de la viveza del color o tendencia a colores oscuros, las referencias que nos guían a esa conclusión las encontramos en Berns (2019, p.78) y Azorín (2003, p.77).

Por otro lado, se encontró que es posible diferenciar el color entre los zumos de naranja frescos con respecto a los zumos de naranja industrial en muestras con  $\Delta E > 2,8$  cuya referencia lo encontramos en (Fernández-Vázquez, 2013). El parámetro  $\Delta E$  también puede usarse como una herramienta de control de calidad del color en la industria de bebidas aún más en líquidos opacos, para efectos de medidas resultantes del factor de reflectancia.

Comentario aparte merece una de las condiciones de medición que es la de inclusión o exclusión de la componente especular denotada como SCI o SCE respectivamente, los datos ofrecidos en la tabla 7 son medidas que incluyen la componente especular incluida, en nuestra experiencia encontramos que las medidas con SCI tuvieron mayor valor de claridad  $L^*$  y menor croma, mientras que las medidas con SCE el valor de claridad disminuyó, pero la de croma se incrementó. Al respecto (Joshi et al, 2002, p.5) menciona que incluir la luz especular (es decir, mantenerla dentro de la esfera de integración) garantizará que solo se midan el color y no los efectos de la superficie. Por otro lado, en (MacDougall, 2010, p.62) se menciona que en Hunt (1987) se sugiere que en mediciones que son comparadas es mejor incluir la componente especular porque hay variación considerable en el área de atrapa brillo usadas en diferentes esferas. También refiere a (Best, 1987) que señala que para que las medidas estén mejor relacionadas a la observación visual son con la componente especular excluida.

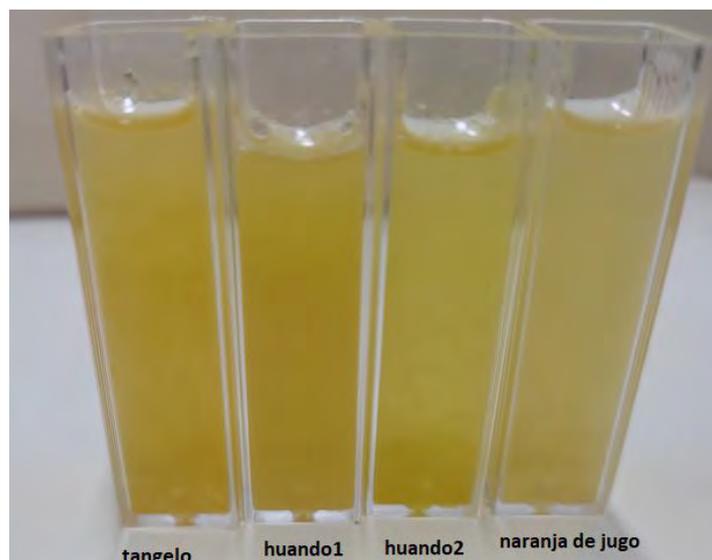
En pruebas preliminares se puso un fondo blanco sobre la cubeta que contenía la muestra de zumo Tangelo con el fin de investigar si esto lograba incrementar los valores  $L^*a^*b^*$ . Al analizar los valores de diferencia de color entre la muestra sin fondo y con fondo blanco se encontró una diferencia que no sería notoriamente visual ( $\Delta E=1.05$ )

#### **4.3 RESULTADOS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO KONICA MINOLTA, MODELO CM-5**

Fue configurado en el modo transmitancia d/0 (iluminación difusa y detector a  $0^\circ$  de la línea normal), observador de  $10^\circ$ , en el modo SCI (componente especular incluida), las muestras fueron de una naranja Tangelo, una naranja de jugo(criolla), dos de Huando las dos primeras pertenecen a la variedad del grupo blancas y Huando1, corresponde a producción nacional y Huando 2 naranja importada de USA ambas corresponden al grupo Navel y son mostradas en la Figura 52. También se evaluó el color de un jugo a base de colorantes y saborizante de naranja denominado Cifrut.



(a)



(b)

Figura 52. (a) Naranja del grupo blancas (naranja de jugo) y Navel o umbilicadas (Huando) y naranja Tangelo (b) Cubetas conteniendo las muestras de jugos de naranja

Las medidas mostradas en la Tabla 8, fueron realizadas el 5 de junio del 2017, en el laboratorio de análisis de alimentos de la UNALM.

Tabla 8. Tabla de resultados de medidas de color en la escala  $L^*a^*b^*$  y  $L^*c^*h$

NOMBRE	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*_{ab}$	$h^{\circ}_{ab}$	$\Delta E$
Tangelo	72.933	10.744	41.625	42.989	75.528	13.26
Huando 1	69.974	12.499	50.728	52.245	76.158	22.70
Huando 2	75.752	4.858	36.220	36.544	82.361	5.80
Naranja de jugo (ref)	80.684	3.916	33.317	33.547	83.297	0.00
Cifrut	61.277	11.984	75.232	76.180	80.949	46.89

### Valores de claridad ( $L^*$ )

El indicador de claridad  $L^*$  muestra que la naranja de jugo presenta mayor valor de claridad, seguido de Huando 2, Tangelo, Huando 1 y por último la menos clara Cifrut. Esto se observa también en la Figura 53.

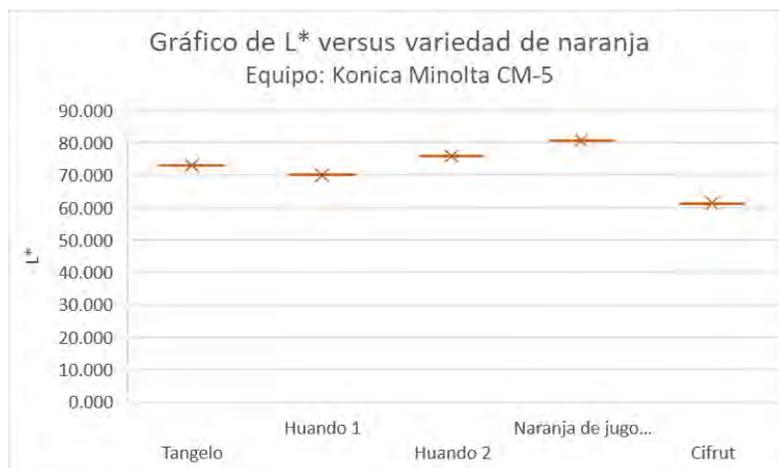


Figura 53. Distribución de valores L\* de las muestras de zumo de naranja.

### Valores a\* y b\* (componentes de rojo y amarillo)

En la Figura 54, se observa que todos los valores de a\* y b\* se encuentran en el primer cuadrante de la escala CIELAB, ubicadas en la zona de amarillos anaranjados, siendo Tangelo y Huando1 y Cifrut, las de mayores valores de rojo y amarillo en comparación con la naranja de jugo y Huando 2

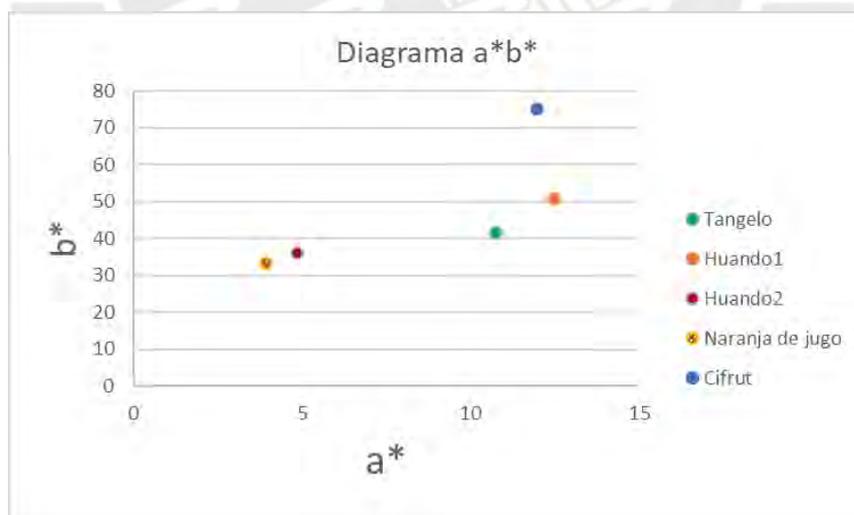


Figura 54. Distribución del color de las muestras en el plano a\*b\*.

## Resultados escala CIELCH

### Tono ( $h^{\circ}_{ab}$ )

La Figura 55, muestra los valores del tono con la variable  $h^{\circ}_{ab}$  (medido en grados) donde la naranja de jugo tiene la mayor tendencia al tono amarillo, los siguientes van con tonalidades anaranjadas como se observa en la Tabla 9, se recuerda que un valor de  $90^{\circ}$  representa el tono amarillo y un valor de  $0^{\circ}$  el tono rojo.

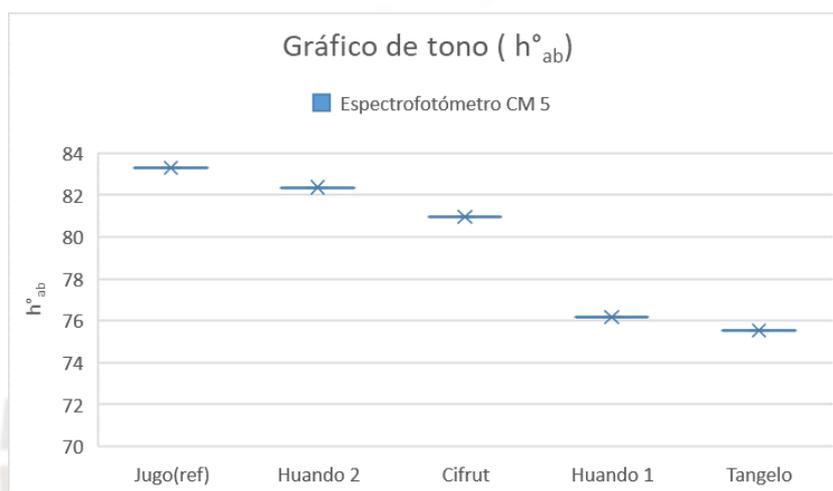


Figura 55. Tono de color de zumos de naranja según variedad Huando, Tangelo y naranja de jugo o jugo(ref) y zumo industrial Cifrut.

Tabla 9. Tonos de color en orden decreciente obtenido con el equipo CM 5

Variedad	$h^{\circ}_{ab}$ (tono)
Jugo(ref)	83.2965
Huando 2	82.3612
Cifrut	80.9492
Huando 1	76.1584
Tangelo	75.5275

### Croma ( $C^*_{ab}$ )

En la Figura 56 se ve el valor del croma  $C^*_{ab}$  versus los zumos de las naranjas medidos, muestra que el de mayor croma o saturación del color es el jugo Cifrut, seguido de la

naranja Huando1, Tangelo, Huando2 y por último la naranja de jugo del grupo blancas, esto queda también ejemplificado en la Tabla 10

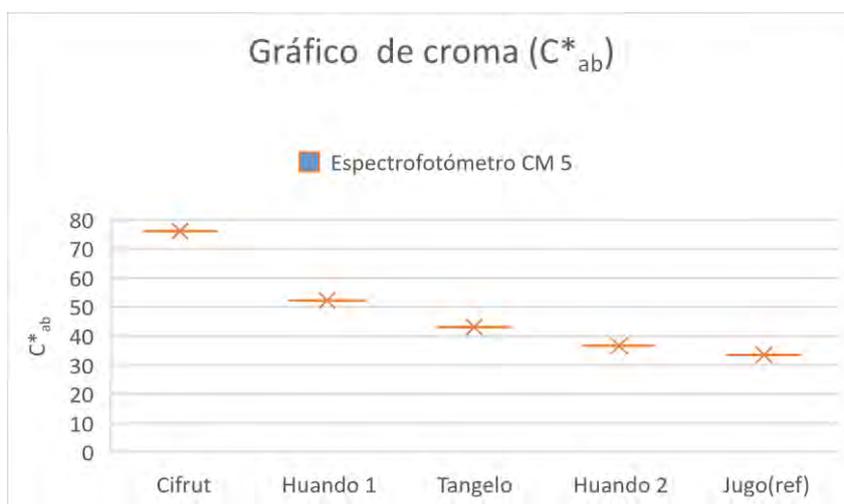


Figura 56. Valores de croma según variedad de zumo de naranjas frescas e industrial Cifrut.

### Diferencias de color

En la Tabla 10, también se observa los parches de tonalidades naranja que el software del equipo procesa según la escala Munsell observándose una diferencia visual entre ellas, otro parámetro para corroborar esta observación es con  $\Delta E$  que representa la diferencia de color, tomando de referencia a la naranja de jugo del grupo blancas, los valores que superan el valor de 3.5 son indicadores de que el color de las muestras serán bien diferenciados a simple vista según (Mokrzycki, 2011) y según (Fernández-Vázquez, 2013)

Tabla 10. Valores de croma y ejemplificación visual en el sistema Munsell

Variedad	C* <sub>ab</sub> (croma)
Cifrut	76.18
Huando 1	52.25
Tangelo	42.99
Huando 2	36.54
Jugo(ref)	33.55

## Transmitancia

Al analizar los espectros de transmitancia mostrados en la Figura 57, se observa que los valores de transmitancia son más bajos en las regiones menores a los 460 nm y van incrementándose rápidamente a cerca de los 480 nm en adelante; entre los 550 nm y 700 nm el incremento es suave. En cambio, en el jugo saborizado y coloreado Cifrut, se distingue que los valores de transmitancia se elevan súbitamente cerca de los 460 nm, notándose que este incremento se suaviza cerca de los 550 nm, la curva de transmitancia del zumo comercial Cifrut se distingue de los zumos frescos de naranja.

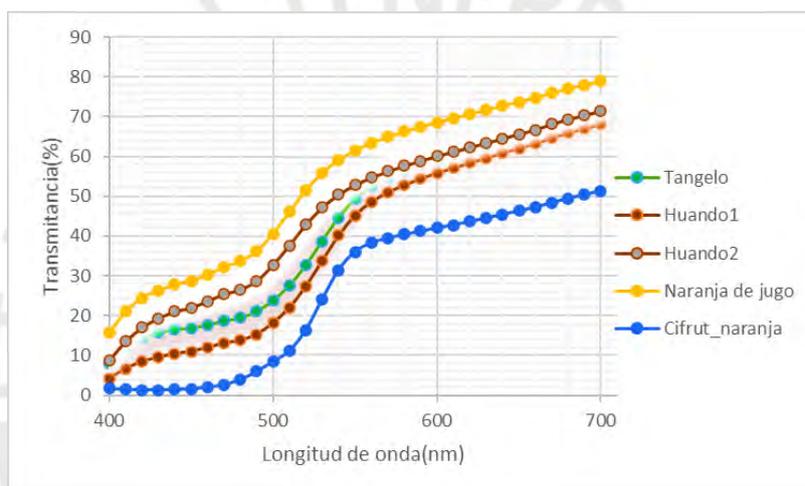


Figura 57. Valores de porcentaje de transmitancia de las muestras de zumo de naranja.

### 4.3.1 Discusión de resultados obtenidos con el equipo Konica Minolta CM-5

Los resultados encontrados en la escala CIELAB al compararse con sus equivalentes de color en la escala visual Munsell mostrados en la Tabla 8 indican una buena correspondencia en cuanto al tono y croma. Los valores de  $L^*$  son de luminosidad media a alta y los valores del croma  $C_{ab}^*$  son indicadores que ofrecen una correspondencia visual al color naranja, estos aspectos son inferidos de (Azorín, 2003, p. 77) y (Berns, 2019, p.78) en la sección 2.3.5.2.

En una prueba previa se realizó una medida al zumo de una naranja de jugo por reflectancia y transmitancia. En la medida por reflectancia la cubeta contenedora del líquido era el mismo accesorio CM A128 que se usó con el modelo CM 700d, considerando una apertura de 30 mm de diámetro, con el observador de 10° y el iluminante D65, en modo SCI, se encontró los valores colorimétricos  $L^* = 45.95$ ,  $a^* = 1.85$  y  $b^* = 23.52$ , mientras que en el modo transmitancia  $L^* = 60.73$ ,  $a^* = 8.86$  y  $b^* = 56.11$ . Debido a que los valores  $L^*a^*b^*$  en el modo reflectancia son más bajos (indicadores de menos colorido) se decidió hacer las medidas en el modo transmitancia.

La geometría óptica de los espectrofotómetros: Helios Gamma es 0/0 (0° de iluminación/ 0° de observación), CM 700d es d/8° (iluminación difusa / 8° de observación) y el CM 5 di/0 (iluminación difusa/ 0° de observación), la esfera de integración del CM 5 tiene un diámetro de iluminación de hasta 26 mm, el modelo CM 700d se midió con 8mm de diámetro de iluminación, mientras que modelos similares al espectrofotómetro Helios Gamma tienen apenas un área de iluminación 2 mm de diámetro y un tamaño de haz de 7mm, aparte el modelo CM 5 posee un detector de doble red de fotodiodos. Al respecto (Meléndez-Martínez et al, 2005) menciona que la medida de color por transmitancia no es efectiva, pero que los mejores resultados fueron obtenidos con grandes fotoreceptores y usando una esfera de reflectancia difusa, esa es una de las ventajas del equipo Konica Minolta CM 5.

La comparación de las medidas del tono y croma promedio obtenidos para los zumos frescos de naranja Huando, Valencia y Tangelo obtenidas con los equipos modelo Helios Gamma, CM 5 y CM 700d se muestran en la Figura 58 y Figura 59 . En cuanto al análisis del tono  $h^{\circ}_{ab}$  las muestras se encuentra entre los tonos amarillos y anaranjados,

los de mayor cercanía a las tonalidades amarillas son los más cercanos a los 90° y los de menor valor tienen más componente de color rojo. En cuanto al croma CM 5 presenta valores más diferenciados, que pueden deberse a la diferencia de geometrías ópticas, tamaño de la esfera de integración, área de iluminación, entre otros, pero que hace que las medidas sean más cercanas a la percepción visual del color.

Las Tabla 13 y Tabla 14 muestran los coeficientes de correlación de Pearson de las variables de croma y tono respectivamente, en la Tabla 13 se observa una correlación negativa muy fuerte ( $r = -0.955$ ) entre los equipos Helios Gamma y CM 700d, esto debido a que son configuraciones opuestas, una por transmisión y la otra por reflectancia; entre Helios Gamma y CM 5 se muestra una correlación positiva alta  $r=0.697$  si bien son configuraciones que miden la transmitancia, pero de configuraciones ópticas distintas, mientras que  $r = -0.455$  representa una correlación negativa media entre los equipos CM 700d y CM 5 creemos en parte por la diferencia de medidas de reflectancia y transmitancia, así como de las diferencias en configuraciones ópticas, otro aspecto por considerar es que las muestras si bien es cierto corresponden a las variedades indicadas, fueron tomadas de otros lotes y en diferentes estaciones del año.

En el análisis de correlación de la variable colorimétrica  $h^{\circ}_{ab}$  (tono), mostrado en la Tabla 14, los resultados indican que hay una correlación positiva muy fuerte  $r=0.98$  entre los equipos Helios Gamma y CM 700d, hay una correlación positiva media  $r=0.54$  entre los equipos CM 700d y CM 5 y una correlación positiva débil  $r=0.37$  entre los equipos CM 700d y CM 5.

Tabla 11. Tabla de comparación entre los equipos para el croma ( $C_{ab}^*$ )

Variedad	Helyos gamma	CM 700 d	CM 5
Huando	8.92	13.11	36.54
Valencia	12.42	11.05	33.55
Tangelo	16.44	10.29	42.99

Tabla 12. Tabla de comparación entre los equipos para el tono  $h_{ab}^{\circ}$

Variedad	Helyos gamma	CM 700 d	CM 5
Huando	79.08	85.71	82.36
Valencia	75.4	82.4	83.29
Tangelo	72.46	81.19	80.95

Tabla 13. Tabla de coeficiente de correlación de Pearson del croma ( $C_{ab}^*$ ) entre los equipos.

	<i>Helios gamma</i>	<i>CM 700d</i>	<i>CM 5</i>
Helios gamma	1		
CM 700d	-0.955328799	1	
CM 5	0.697596775	-0.45467904	1

Tabla 14. Tabla de coeficiente de correlación de Pearson del tono  $h_{ab}^{\circ}$  entre los equipos.

	<i>Helios gamma</i>	<i>CM 700d</i>	<i>CM 5</i>
Helios gamma	1		
CM 700d	0.980536532	1	
CM 5	0.545539116	0.3703741	1

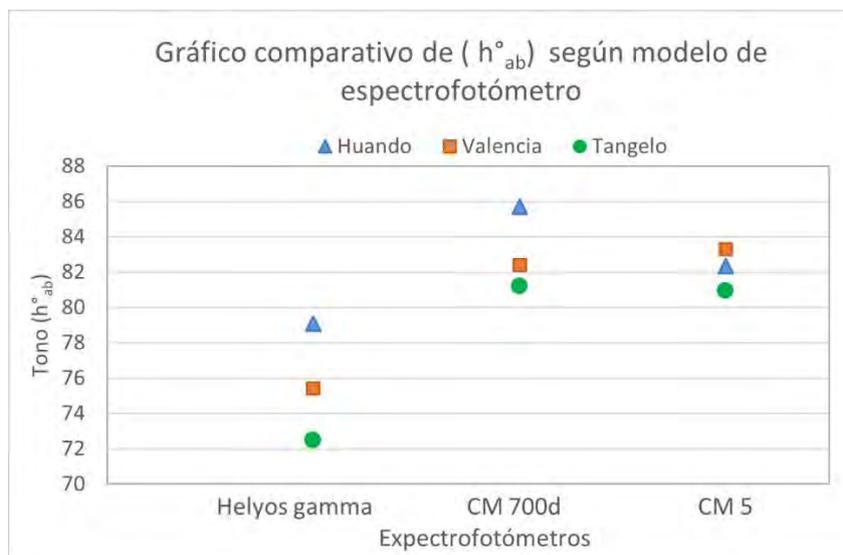


Figura 58. Resultados del tono de color en los zumos frescos de la variedad: Huando, Valencia y Tangelo, según equipo.

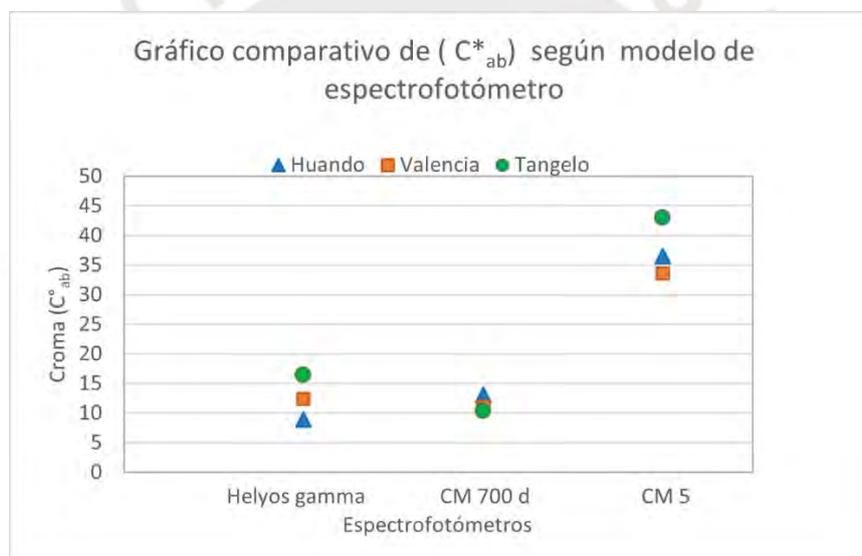


Figura 59. Resultados del croma de color en los zumos frescos de la variedad: Huando, Valencia y Tangelo, según equipo.

## 5 CONCLUSIONES

En esta tesis se ha investigado sobre la caracterización colorimétrica del zumo de naranja mediante la técnica de espectrofotometría de transmisión y reflexión. También se ha documentado la teoría para medir el color bajo el estándar CIE. Esta información puede ser utilizada como apoyo de los profesionales y científicos de la industria alimentaria en cuanto se muestra los procedimientos y análisis de medida del color de muestras de naturaleza translúcida. Es el primer estudio a nivel nacional para analizar y caracterizar coloriméricamente los zumos frescos y comerciales de naranja.

En la medición del color del zumo de naranja por el método de espectrofotometría de transmitancia con el equipo Konica Minolta CM 5, se encontró una mejor equivalencia visual con la cartilla Munsell del equipo, que puede ser debido a que posee una esfera de integración de mayor tamaño, mayor área de iluminación y mayor número de detectores respecto a los otros espectrofotómetros.

Con el espectrofotómetro de reflectancia Konica Minolta CM 700d, consideramos que los valores obtenidos para  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  corresponden a colores percibidos como opacos, creemos que el accesorio de medición de líquidos dados por el fabricante de 1,5 cm de altura no es el adecuado para este tipo de muestras translúcidas, nos hizo falta acondicionar la muestra a un recipiente con al menos de 4cm de altura y probar la transreflectancia para procurar tener medidas más acordes al color percibido.

Con relación a la comparación de medidas entre los zumos frescos de naranja el tono tiene mejor correspondencia entre las variedades analizadas, mientras que, el croma mostró que las medidas hechas con los equipos CM 5 tuvieron más saturación de color respecto a los encontrados con los equipos Thermo Spectronic y CM 700d.

En este estudio también se propuso analizar la potencialidad del espectrofotómetro de transmisión convencional como medidor de color. Por esto se terminó de implementar una plantilla Excel con los valores de entrada: iluminante D65, transmitancia/reflectancia del objeto y observador CIE 1964 para poder calcular los valores triestímulo y luego transformarlos en las escalas CIE<sub>xy</sub>, CIELAB y CIELCH, los resultados fueron contrastados con el programa ColorCIO versión 2007.

Este estudio ha mostrado el uso del espectrofotómetro de transmitancia de configuración óptica 0/0 (espectrofotómetro Thermo Spectronic modelo: Helios Gamma), como una alternativa de medidor de color para líquidos transparentes, para seguir procesos de cambio de color de bebidas transparentes por adición de otros de la misma naturaleza. Sin embargo, los resultados de medida del color encontrados para las muestras de zumo de naranja difieren del color percibido visualmente, debido a la naturaleza dispersiva de la muestra.

No podríamos asignar valores definitivos al color del zumo de naranja por variedad ya que están asociados a muchos aspectos, entre ellos, la selección del instrumento, geometría óptica, tipo de iluminación y preparación de la muestra. Los valores que mejor se acercaron al color percibido se encontraron con el espectrofotómetro modelo CM 5, como siguen:  $L^*$  de 69-73, valores de  $a^*$  entre 3-11 y  $b^*$  entre 33 y 51.

Las diferencias de color  $\Delta E$  nos ayudaron a distinguir los zumos frescos de naranja de los zumos comerciales, el umbral que tomamos en consideración para observadores no entrenados en observar diferencias de color fue de 2.8 y de 1.5 para expertos. En el caso de los zumos frescos los equipos Thermo Spectronic y CM 5 obtuvieron mayores valores de discriminación.

Nos planteamos caracterizar el color de zumos frescos de diferentes variedades llamándolas en general: Huando, Valencia y Tangelo, pero la realidad es que dentro de los grupos a los que pertenecen (blancas, Navel e híbridos de mandarina) sus variedades tienen diferentes denominaciones, nos limitamos a hacer un reconocimiento solo por clasificación por grupos, en futuras investigaciones recomendamos estudiar más a las naranjas del grupo de *blancas* en su variedad Valencia, ya que es la que más se exporta para consumo de zumos, con la recomendación adicional de estudiar las cosechas en zonas específicas en conjunto con agricultores.

Otros posibles temas de investigación son la estimación del contenido de carotenoides, consistencia del color, determinación de cambios de color de bebidas en mezcla, seguimiento de maduración de alimentos. Sería muy útil calibrar un espectrofotómetro de reflexión con los patrones de la USDA para los zumos de naranja, ya que éste es un requisito para poder exportar zumos a mercados como USA.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agrodataperu. (2018). Exportaciones Peruanas de Cítricos crecieron 300%. 2016 - agrodataperu.[Online], disponible en:  
<https://www.agrodataperu.com/2016/10/exportaciones-peruanas-de-citricos-crecieron-300-2016.html> [Accessed 11 Jun. 2018].
- [2] *Are You Using the Right Tolerancing Method* | X-Rite Blog. (2016.). X-Rite.  
Recuperado 25 de octubre de 2020, de <https://www.xrite.com/blog/tolerancing-basics>
- [3] Artigas, J., Capilla, P., & Pujol, J. (2002). Tecnología del color. Saragosa: Universidad de Valencia.
- [4] ASTM E284 Standard Terminology of Appearance
- [5] ASTM E179 Standard Guide for Selection of Geometric Conditions for Measurement of Reflection and Transmission Properties of Materials
- [6] ASTM E308 Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System
- [7] ASTM E1164-12 Standard Practice for Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation
- [8] ASTM E1331 Standard Test Method for Reflectance Factor and Color by Spectrophotometry Using Hemispherical Geometry
- [9] Azorín, R. M. (2003). Especificación cromática de gamas de colores usadas en la industria del calzado. Dpto. interuniversitario de óptica. España.
- [10] Badui, D. S. (2006). Química de los alimentos. Ed. Editorial Universidad Alambra, México DF.

- [11] Bems, R. S. (2000). *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. New York.
- [12] Berns, R. S. (2019). *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. John Wiley & Sons.
- [13] Boletín OCEX. (s. f.). Recuperado 27 de abril de 2020, de [https://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/Comunicaciones/Boletines\\_Ocex/Ocex\\_Beijing/beijing\\_boletin19.html](https://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/Comunicaciones/Boletines_Ocex/Ocex_Beijing/beijing_boletin19.html)
- [14] Bujdud, (1999). *Medición práctica del color*. (Tesis de Maestría). Centro de Investigaciones en óptica, León, Gto, México.
- [15] Bujdud, J. (2015). *El color y sus aplicaciones*. Aguascalientes, México: Centro de Investigaciones en Óptica, Unidad Aguascalientes.
- [16] Caivano, J. L., & del Pilar Buera, M. (2012). *Color in food: technological and psychophysical aspects*. CRC Press.
- [17] Colorimetry, C. I. E. (2004). *Publication CIE 15: 2004*. Vienna, Austria: Commission Internationale De L'eclairage.
- [18] *Color Measurement—Measuring Instruments* | KONICA MINOLTA. (s. f.). Recuperado 7 de noviembre de 2020, de: [https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction\\_manual/color/pdf/cm-5\\_instruction\\_spa.pdf](https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cm-5_instruction_spa.pdf)
- [19] Comité Español de Color y Sociedad Española de Óptica (2002). Consultado el 11 de diciembre del 2021, de: <https://web.ua.es/es/gvc/documentos/docs/vocabulariocolor.pdf>

- [20] Conesa, A., Manera, J., Fernandez, J.C., Sanchez, M., Andujar, S., Porras, I., (2015). El color en los zumos de naranja, VI Congreso Ibérico De Ciencias Hortícolas, obtenido de:  
<http://www.sech.info/ACTAS/Acta%20n%C2%BA%2054.%20VI%20Congreso%20Ib%C3%A9rico%20de%20Ciencias%20Hort%C3%ADcolas.%20XII%20Congreso%20Nacional%20de%20Ciencias%20Hort%C3%ADcolas/Comunicaciones/El%20color%20en%20los%20zumos%20de%20naranja.pdf>
- [21] Culver, C. A., & Wrolstad, R. E. (Eds.). (2008). Color quality of fresh and processed foods (Vol. 983). Amer Chemical Society.
- [22] D. B. MacDougall (2002). Colour measurement of food: Principles and practice. Colour in food, 33-62
- [23] De las Casas Cáceres, A., Chávez Rozas, E., Fernández-Dávila Rondón, J. R., & Chávez Quispe, P. A. Planeamiento estratégico de la naranja.
- [24] Fernández-Vázquez, R., Scanarotti, C. M. S., Escudero-Gilete, M. L., Meléndez-Martínez, A. J., Mira, F. J. H., & Romero, I. M. V. (2010). Estudio preliminar sobre la utilidad del color para clasificar los zumos de naranja según su elaboración. *Óptica pura y aplicada*, 43(4), 245-249.
- [25] Fernández-Vázquez, R., Stinco, C. M., Hernanz, D., Heredia, F. J., & Vicario, I. M. (2014). Digital image analysis and visual evaluation of orange juice: influence of different measurements' conditions. *Food Analytical Methods*, 7(1), 157-164.
- [26] Fernández-Vázquez, R., Stinco, C. M., Hernanz, D., Heredia, F. J., & Vicario, I. M. (2013). Colour training and colour differences thresholds in orange juice. *Food Quality and Preference*, 30(2), 320-327.

- [27] Fraser, B. (2005). *Uso Y Administracion Del Color/use And Administration of Color (Diseno Y Creatividad)*. Anaya Publishers.
- [28] Freshplaza.es. (2018). Naranjas Tres países mandan en el sector. [Online] disponible en: <http://www.freshplaza.es/article/103300/Naranjas-Tres-pa%C3%ADses-mandan-en-el-sector> [Accessed 11 Jun. 2018].
- [29] Freshplaza.es. (2018). Perú Marzala exporta el 100-por-ciento de sus naranjas para zumo a Europa. [Online] disponible en: <http://www.freshplaza.es/article/74792/Per%C3%93-Marzala-exporta-el-100-procent-de-sus-naranjas-para-zumo-a-Europa> [Accessed 11 Jun. 2018].
- [30] *Guía para Entender la Comunicación* (s.f.). X-Rite. Recuperado 25 de octubre de 2020, de: [https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/whitepaper\\_pdfs/110-001\\_a\\_guide\\_to\\_understanding\\_color\\_communication/110-001\\_understand\\_color\\_es.pdf](https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/whitepaper_pdfs/110-001_a_guide_to_understanding_color_communication/110-001_understand_color_es.pdf)
- [31] Hammond III, H. K. (1969). Colorimeters. In *Applied Optics and Optical Engineering* (Vol. 5, pp. 105-131). Elsevier.
- [32] Herrera, J. J. C., Torres, I. D. A., Tascón, C. E. O., & Montoya, J. W. M. (2011). Colorimetría del fruto de café (*Coffea arabica* L.) durante su desarrollo y maduración. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 64(2), 6229-6240.
- [33] Hill, B., Roger, T., & Vorhagen, F. W. (1997). *Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula*. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 16(2), 109-154.
- [34] Hunterlab. (2008). *Measuring Translucent Liquids Using the Ring and Disk Set*. 11(3), 6. Recuperado 21 de julio de 2019, de Hunterlab website:

<https://support.hunterlab.com/hc/en-us/articles/203279299-Measuring-Translucent-Liquids-Using-the-Ring-and-Disk-Set-an03-99>

- [35] Hutchings, J. B. (Ed.). (2011). Food colour and appearance. Springer Science & Business Media.
- [36] Joshi, P., & Brimelow, C. J. B. (2002). Colour measurement of foods by colour reflectance. In *Colour in food* (pp. 80-114). Woodhead Publishing.
- [37] Konica Minolta. (2007). Precise Color Communication. Obtenido de [http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color\\_communication.pdf](http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf)
- [38] Leggett, G. L. (2008). Color measurement techniques for food products. Color quality of fresh and processed foods, 7-16.
- [39] Leon, K., Mery, D., Pedreschi, F., & Leon, J. (2006). Color measurement in L\* a\* b\* units from RGB digital images. *Food research international*, 39(10), 1084-1091.
- [40] MacDougall, D. B. (2010). Colour measurement of food: principles and practice. In *Colour Measurement* (pp. 312-342). Woodhead Publishing.
- [41] Malacara, D. (2011, August). Color vision and colorimetry: theory and applications. Bellingham, WA: Spie.
- [42] Malacara, D. (2015). Óptica básica. Fondo de cultura económica.
- [43] Malacara, Z., Pérez, G., Rodríguez, N., García, R., & Nieto, C. (2001). Curso-Taller de Colorimetría. Aguascalientes: Centro de Investigaciones en Óptica.
- [44] Marchante Rodríguez, V., Chorro, E., Perales, E., Viqueira Pérez, V., & Martínez-Verdú, F. M. (2010). Presentaciones de Ciencia del Color. *Ciencia del Color: Aplicaciones Industriales*.

- [45] Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro sur*, 42(2), 57-66.
- [46] Meléndez-Martínez, A. J., Gómez-Robledo, L., Melgosa, M., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2011). Color of orange juices in relation to their carotenoid contents as assessed from different spectroscopic data. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(6), 837-844.
- [47] Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2005). Instrumental measurement of orange juice colour: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(6), 894-901.
- [48] Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011). Colour difference  $\Delta E$ -A survey. *Machine graphics and vision*, 20(4), 383-411.
- [49] Negueruela, I. A. (2012). Is the color measured in food the color that we see? *Color Food Technological and Psychophysical Aspects*. Cavanino JL, Buera P de M (eds.) CRC Press Taylor & Francis. Boca Raton, Florida, USA. pp, 81-91.
- [50] Ohno, Y. (2007). Spectral color measurement. *Colorimetry: understanding the CIE system*, 5-1.
- [51] Ohta, N., & Robertson, A. (2006). *Colorimetry: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- [52] P. Joshi. (2002). Colour measurement of foods by color reflectance. 80-114 descrito en el cap 5. del libro de MacDougall, D. B. (Ed.). (2002). *Colour in food: improving quality*. Woodhead Publishing.
- [53] Pickett, L. (2014). The future of color measurement. *Quality*, 53(10), 22.

- [54] Pérez-López, A. J., Beltran, F., Serrano-Megías, M., López, D. S., & Carbonell-Barrachina, G. A. (2006). Changes in orange juice color by addition of mandarin juice. *European Food Research and Technology*, 222(5-6), 516.
- [55] Range of UV-Visible Spectrophotometers. (s.f.). Recuperado 7 de noviembre de 2020, de: <http://www.a-a.co.kr/pdf/Helios%20Series.pdf>
- [56] Schanda, J. (Ed.). (2007). *Colorimetry: understanding the CIE system*. John Wiley & Sons.
- [57] Schwab, M. D. C., Ferreyra, M. M., Gerard, L. M., & Davies, C. V. (2013). Parámetros de Calidad de jugos de naranja Entrerrianas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 14(1), 85-92.
- [58] Se prevé un aumento en las exportaciones de cítricos peruanos en 2020. (s. f.). Recuperado 27 de abril de 2020, de <https://www.freshplaza.es/article/9188708/se-preve-un-aumento-en-las-exportaciones-de-citricos-peruanos-en-2020/>
- [59] Shannon, R. (Ed.). (2012). *Applied optics and optical engineering* (Vol. 8). Elsevier.
- [60] Spectrophotometer CM 700d: Manual de instrucciones (s.f), consultado el 4 de mayo del 2020, de: <http://www.konicaminoltadistribuidor.com.mx/Espectrofotometros/wp-content/uploads/2014/09/ESPECTROFOTOMETRO-CM-700D-600D-Manual..pdf>
- [61] Spectrophotometer CM 5: Manual de instrucciones (s.f), consultado el 4 de mayo del 2020, de: [https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction\\_manual/color/pdf/cm-5\\_instruction\\_spa.pdf](https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cm-5_instruction_spa.pdf)

- [62] Wu, D., & Sun, D. W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 5-20.S.
- [63] Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (1978). Colorimetry. *Handbook of optics*, 9-2.
- [64] Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (2000). *Color science*. New York: Wiley.



## 7 ANEXOS

### 7.1 Anexo a. Tabla de valores del observador de 2° CIE 1931. Obtenido de Colorimetry, C. I. E. (2004).

Conjunto de funciones de igualación de colores  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  y las correspondientes coordenadas de cromaticidad  $x$ ,  $y$  para longitudes de onda  $\lambda = 380$  nm a  $780$  nm a intervalos de  $5$  nm, redondeados a  $6$  y  $5$  decimales respectivamente.

Table T.4. CIE 1931 standard colorimetric observer					
$\lambda(\text{nm})$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x$	$y$
380	0.001368	0.000039	0.006450	0.174110	0.004960
385	0.002236	0.000064	0.010550	0.174010	0.004980
390	0.004243	0.000120	0.020050	0.173800	0.004920
395	0.007650	0.000217	0.036210	0.173560	0.004920
400	0.014310	0.000396	0.067850	0.173340	0.004800
405	0.023190	0.000640	0.110200	0.173020	0.004780
410	0.043510	0.001210	0.207400	0.172580	0.004800
415	0.077630	0.002180	0.371300	0.172090	0.004830
420	0.134380	0.004000	0.645600	0.171410	0.005100
425	0.214770	0.007300	1.039050	0.170300	0.005790
430	0.283900	0.011600	1.385600	0.168880	0.006900
435	0.328500	0.016840	1.622960	0.166900	0.008560
440	0.348280	0.023000	1.747060	0.164410	0.010860
445	0.348060	0.029800	1.782600	0.161100	0.013790
450	0.336200	0.038000	1.772110	0.156640	0.017700
455	0.318700	0.048000	1.744100	0.150990	0.022740
460	0.290800	0.060000	1.669200	0.143960	0.029700
465	0.251100	0.073900	1.528100	0.135500	0.039880
470	0.195360	0.090980	1.287640	0.124120	0.057800
475	0.142100	0.112600	1.041900	0.109590	0.086840
480	0.095640	0.139020	0.812950	0.091290	0.132700

485	0.057950	0.169300	0.616200	0.068710	0.200720
490	0.032010	0.208020	0.465180	0.045390	0.294980
495	0.014700	0.258600	0.353300	0.023460	0.412700
500	0.004900	0.323000	0.272000	0.008170	0.538420
505	0.002400	0.407300	0.212300	0.003860	0.654820
510	0.009300	0.503000	0.158200	0.013870	0.750190
515	0.029100	0.608200	0.111700	0.038850	0.812020
520	0.063270	0.710000	0.078250	0.074300	0.833800
525	0.109600	0.793200	0.057250	0.114160	0.826210
530	0.165500	0.862000	0.042160	0.154720	0.805860
535	0.225750	0.914850	0.029840	0.192880	0.781630
540	0.290400	0.954000	0.020300	0.229620	0.754330
545	0.359700	0.980300	0.013400	0.265780	0.724320
550	0.433450	0.994950	0.008750	0.301600	0.692310
555	0.512050	1.000000	0.005750	0.337360	0.658850
560	0.594500	0.995000	0.003900	0.373100	0.624450
565	0.678400	0.978600	0.002750	0.408740	0.589610
570	0.762100	0.952000	0.002100	0.444060	0.554710
575	0.842500	0.915400	0.001800	0.478770	0.520200
580	0.916300	0.870000	0.001650	0.512490	0.486590
585	0.978600	0.816300	0.001400	0.544790	0.454430
590	1.026300	0.757000	0.001100	0.575150	0.424230
595	1.056700	0.694900	0.001000	0.602930	0.396500
600	1.062200	0.631000	0.000800	0.627040	0.372490
605	1.045600	0.566800	0.000600	0.648230	0.351390
610	1.002600	0.503000	0.000340	0.665760	0.334010
615	0.938400	0.441200	0.000240	0.680080	0.319750
620	0.854450	0.381000	0.000190	0.691500	0.308340
625	0.751400	0.321000	0.000100	0.700610	0.299300
630	0.642400	0.265000	0.000050	0.707920	0.292030
635	0.541900	0.217000	0.000030	0.714030	0.285930

640	0.447900	0.175000	0.000020	0.719030	0.280930
645	0.360800	0.138200	0.000010	0.723030	0.276950
650	0.283500	0.107000	0.000000	0.725990	0.274010
655	0.218700	0.081600	0.000000	0.728270	0.271730
660	0.164900	0.061000	0.000000	0.729970	0.270030
665	0.121200	0.044580	0.000000	0.731090	0.268910
670	0.087400	0.032000	0.000000	0.731990	0.268010
675	0.063600	0.023200	0.000000	0.732720	0.267280
680	0.046770	0.017000	0.000000	0.733420	0.266580
685	0.032900	0.011920	0.000000	0.734050	0.265950
690	0.022700	0.008210	0.000000	0.734390	0.265610
695	0.015840	0.005723	0.000000	0.734590	0.265410
700	0.011359	0.004102	0.000000	0.734690	0.265310
705	0.008111	0.002929	0.000000	0.734690	0.265310
710	0.005790	0.002091	0.000000	0.734690	0.265310
715	0.004109	0.001484	0.000000	0.734690	0.265310
720	0.002899	0.001047	0.000000	0.734690	0.265310
725	0.002049	0.000740	0.000000	0.734690	0.265310
730	0.001440	0.000520	0.000000	0.734690	0.265310
735	0.001000	0.000361	0.000000	0.734690	0.265310
740	0.000690	0.000249	0.000000	0.734690	0.265310
745	0.000476	0.000172	0.000000	0.734690	0.265310
750	0.000332	0.000120	0.000000	0.734690	0.265310
755	0.000235	0.000085	0.000000	0.734690	0.265310
760	0.000166	0.000060	0.000000	0.734690	0.265310
765	0.000117	0.000042	0.000000	0.734690	0.265310
770	0.000083	0.000030	0.000000	0.734690	0.265310
775	0.000059	0.000021	0.000000	0.734690	0.265310
780	0.000042	0.000015	0.000000	0.734690	0.265310
Sum.:	21.371524	21.371327	21.371540		

**7.2 Anexo b. Tabla de valores del observador estándar de 10°, CIE 1964.**

**Obtenido de Colorimetry, C. I. E. (2004).**

Conjunto de funciones de igualación de colores  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  y  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  y las correspondientes coordenadas de cromaticidad  $x_{10}$  e  $y_{10}$  para longitudes de onda  $\lambda = 380$  nm a 780 nm a intervalos de 5 nm, redondeados a 6 y 5 decimales respectivamente.

Table T.5. CIE 1964 standard colorimetric observer					
$\lambda, \text{nm}$	$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$	$x_{10}$	$y_{10}$
380	0.000160	0.000017	0.000705	0.181330	0.019690
385	0.000662	0.000072	0.002928	0.180910	0.019540
390	0.002362	0.000253	0.010482	0.180310	0.019350
395	0.007242	0.000769	0.032344	0.179470	0.019040
400	0.019110	0.002004	0.086011	0.178390	0.018710
405	0.043400	0.004509	0.197120	0.177120	0.018400
410	0.084736	0.008756	0.389366	0.175490	0.018130
415	0.140638	0.014456	0.656760	0.173230	0.017810
420	0.204492	0.021391	0.972542	0.170630	0.017850
425	0.264737	0.029497	1.282500	0.167900	0.018710
430	0.314679	0.038676	1.553480	0.165030	0.020280
435	0.357719	0.049602	1.798500	0.162170	0.022490
440	0.383734	0.062077	1.967280	0.159020	0.025730
445	0.386726	0.074704	2.027300	0.155390	0.030020
450	0.370702	0.089456	1.994800	0.151000	0.036440
455	0.342957	0.106256	1.900700	0.145940	0.045220
460	0.302273	0.128201	1.745370	0.138920	0.058920
465	0.254085	0.152761	1.554900	0.129520	0.077870
470	0.195618	0.185190	1.317560	0.115180	0.109040
475	0.132349	0.219940	1.030200	0.095730	0.159090
480	0.080507	0.253589	0.772125	0.072780	0.229240
485	0.041072	0.297665	0.570060	0.045190	0.327540
490	0.016172	0.339133	0.415254	0.020990	0.440110

495	0.005132	0.395379	0.302356	0.007300	0.562520
500	0.003816	0.460777	0.218502	0.005590	0.674540
505	0.015444	0.531360	0.159249	0.021870	0.752580
510	0.037465	0.606741	0.112044	0.049540	0.802300
515	0.071358	0.685660	0.082248	0.085020	0.816980
520	0.117749	0.761757	0.060709	0.125240	0.810190
525	0.172953	0.823330	0.043050	0.166410	0.792170
530	0.236491	0.875211	0.030451	0.207060	0.766280
535	0.304213	0.923810	0.020584	0.243640	0.739870
540	0.376772	0.961988	0.013676	0.278590	0.711300
545	0.451584	0.982200	0.007918	0.313230	0.681280
550	0.529826	0.991761	0.003988	0.347300	0.650090
555	0.616053	0.999110	0.001091	0.381160	0.618160
560	0.705224	0.997340	0.000000	0.414210	0.585790
565	0.793832	0.982380	0.000000	0.446920	0.553080
570	0.878655	0.955552	0.000000	0.479040	0.520960
575	0.951162	0.915175	0.000000	0.509640	0.490360
580	1.014160	0.868934	0.000000	0.538560	0.461440
585	1.074300	0.825623	0.000000	0.565440	0.434560
590	1.118520	0.777405	0.000000	0.589960	0.410040
595	1.134300	0.720353	0.000000	0.611600	0.388400
600	1.123990	0.658341	0.000000	0.630630	0.369370
605	1.089100	0.593878	0.000000	0.647130	0.352870
610	1.030480	0.527963	0.000000	0.661220	0.338780
615	0.950740	0.461834	0.000000	0.673060	0.326940
620	0.856297	0.398057	0.000000	0.682660	0.317340
625	0.754930	0.339554	0.000000	0.689760	0.310240
630	0.647467	0.283493	0.000000	0.695480	0.304520
635	0.535110	0.228254	0.000000	0.700990	0.299010
640	0.431567	0.179828	0.000000	0.705870	0.294130
645	0.343690	0.140211	0.000000	0.710250	0.289750

650	0.268329	0.107633	0.000000	0.713710	0.286290
655	0.204300	0.081187	0.000000	0.715620	0.284380
660	0.152568	0.060281	0.000000	0.716790	0.283210
665	0.112210	0.044096	0.000000	0.717890	0.282110
670	0.081261	0.031800	0.000000	0.718730	0.281270
675	0.057930	0.022602	0.000000	0.719340	0.280660
680	0.040851	0.015905	0.000000	0.719760	0.280240
685	0.028623	0.011130	0.000000	0.720020	0.279980
690	0.019941	0.007749	0.000000	0.720160	0.279840
695	0.013842	0.005375	0.000000	0.720300	0.279700
700	0.009577	0.003718	0.000000	0.720360	0.279640
705	0.006605	0.002565	0.000000	0.720320	0.279680
710	0.004553	0.001768	0.000000	0.720230	0.279770
715	0.003145	0.001222	0.000000	0.720090	0.279910
720	0.002175	0.000846	0.000000	0.719910	0.280090
725	0.001506	0.000586	0.000000	0.719690	0.280310
730	0.001045	0.000407	0.000000	0.719450	0.280550
735	0.000727	0.000284	0.000000	0.719190	0.280810
740	0.000508	0.000199	0.000000	0.718910	0.281090
745	0.000356	0.000140	0.000000	0.718610	0.281390
750	0.000251	0.000098	0.000000	0.718290	0.281710
755	0.000178	0.000070	0.000000	0.717960	0.282040
760	0.000126	0.000050	0.000000	0.717610	0.282390
765	0.000090	0.000036	0.000000	0.717240	0.282760
770	0.000065	0.000025	0.000000	0.716860	0.283140
775	0.000046	0.000018	0.000000	0.716460	0.283540
780	0.000033	0.000013	0.000000	0.716060	0.283940
Sum.:	23.329353	23.332036	23.334153		

**7.3 Anexo c. Tabla de valores de la distribución espectral de potencia de los iluminantes CIE, obtenido de Colorimetry, C. I. E. (2004).**

**Table T.1. Relative spectral power distributions of CIE illuminants**  
 Relative spectral power distributions  $[S(\lambda)]$  of CIE standard illuminants A and D65, as well as CIE illuminants C, D50, D55 and D75 for wavelengths  $\lambda = 300 \text{ nm}$  to  $780 \text{ nm}$  at  $5 \text{ nm}$  intervals

$\lambda, \text{nm}$	Standard Illuminant A	Standard Illuminant D65	Illuminant C	IlluminantD50	IlluminantD55	IlluminantD75
300	0.930483	0.034100	0.00	0.019	0.024	0.043
305	1.128210	1.664300	0.00	1.035	1.048	2.588
310	1.357690	3.294500	0.00	2.051	2.072	5.133
315	1.622190	11.765200	0.00	4.914	6.648	17.470
320	1.925080	20.236000	0.01	7.778	11.224	29.808
325	2.269800	28.644700	0.20	11.263	15.936	42.369
330	2.659810	37.053500	0.40	14.748	20.647	54.930
335	3.098610	38.501100	1.55	16.348	22.266	56.095
340	3.589680	39.948800	2.70	17.948	23.885	57.259
345	4.136480	42.430200	4.85	19.479	25.851	60.000
350	4.742380	44.911700	7.00	21.010	27.817	62.740
355	5.410700	45.775000	9.95	22.476	29.219	62.861
360	6.144620	46.638300	12.90	23.942	30.621	62.982
365	6.947200	49.363700	17.20	25.451	32.464	66.647
370	7.821350	52.089100	21.40	26.961	34.308	70.312
375	8.769800	51.032300	27.50	25.724	33.446	68.507
380	9.795100	49.975500	33.00	24.488	32.584	66.703
385	10.899600	52.311800	39.92	27.179	35.335	68.333
390	12.085300	54.648200	47.40	29.871	38.087	69.963
395	13.354300	68.701500	55.17	39.589	49.518	85.946
400	14.708000	82.754900	63.30	49.308	60.949	101.929
405	16.148000	87.120400	71.81	52.910	64.751	106.911
410	17.675300	91.486000	80.60	56.513	68.554	111.894
415	19.290700	92.458900	89.53	58.273	70.065	112.346
420	20.995000	93.431800	98.10	60.034	71.577	112.798
425	22.788300	90.057000	105.80	58.926	69.746	107.945
430	24.670900	86.682300	112.40	57.818	67.914	103.092
435	26.642500	95.773600	117.75	66.321	76.760	112.145
440	28.702700	104.865000	121.50	74.825	85.605	121.198
445	30.850800	110.936000	123.45	81.036	91.799	127.104
450	33.085900	117.008000	124.00	87.247	97.993	133.010
455	35.406800	117.410000	123.60	88.930	99.228	132.682
460	37.812100	117.812000	123.10	90.612	100.463	132.355
465	40.300200	116.336000	123.30	90.990	100.188	129.838
470	42.869300	114.861000	123.80	91.368	99.913	127.322

475	45.517400	115.392000	124.09	93.238	101.326	127.061
480	48.242300	115.923000	123.90	95.109	102.739	126.800
485	51.041800	112.367000	122.92	93.536	100.409	122.291
490	53.913200	108.811000	120.70	91.963	98.078	117.783
495	56.853900	109.082000	116.90	93.843	99.379	117.186
500	59.861100	109.354000	112.10	95.724	100.680	116.589
505	62.932000	108.578000	106.98	96.169	100.688	115.146
510	66.063500	107.802000	102.30	96.613	100.695	113.702
515	69.252500	106.296000	98.81	96.871	100.341	111.181
520	72.495900	104.790000	96.90	97.129	99.987	108.659
525	75.790300	106.239000	96.78	99.614	102.098	109.552
530	79.132600	107.689000	98.00	102.099	104.210	110.445
535	82.519300	106.047000	99.94	101.427	103.156	108.367
540	85.947000	104.405000	102.10	100.755	102.102	106.289
545	89.412400	104.225000	103.95	101.536	102.535	105.596
550	92.912000	104.046000	105.20	102.317	102.968	104.904
555	96.442300	102.023000	105.67	101.159	101.484	102.452
560	100.000000	100.000000	105.30	100.000	100.000	100.000
565	103.582000	98.167100	104.11	98.868	98.608	97.808
570	107.184000	96.334200	102.30	97.735	97.216	95.616
575	110.803000	96.061100	100.15	98.327	97.482	94.914
580	114.436000	95.788000	97.80	98.918	97.749	94.213
585	118.080000	92.236800	95.43	96.208	94.590	90.605
590	121.731000	88.685600	93.20	93.499	91.432	86.997
595	125.386000	89.345900	91.22	95.593	92.926	87.112
600	129.043000	90.006200	89.70	97.688	94.419	87.227
605	132.697000	89.802600	88.83	98.478	94.780	86.684
610	136.346000	89.599100	88.40	99.269	95.140	86.140
615	139.988000	88.648900	88.19	99.155	94.680	84.861
620	143.618000	87.698700	88.10	99.042	94.220	83.581
625	147.235000	85.493600	88.06	97.382	92.334	81.164
630	150.836000	83.288600	88.00	95.722	90.448	78.747
635	154.418000	83.493900	87.86	97.290	91.389	78.587
640	157.979000	83.699200	87.80	98.857	92.330	78.428
645	161.516000	81.863000	87.99	97.262	90.592	76.614
650	165.028000	80.026800	88.20	95.667	88.854	74.801
655	168.510000	80.120700	88.20	96.929	89.586	74.562
660	171.963000	80.214600	87.90	98.190	90.317	74.324
665	175.383000	81.246200	87.22	100.597	92.133	74.873
670	178.769000	82.277800	86.30	103.003	93.950	75.422
675	182.118000	80.281000	85.30	101.068	91.953	73.499
680	185.429000	78.284200	84.00	99.133	89.956	71.576
685	188.701000	74.002700	82.21	93.257	84.817	67.714
690	191.931000	69.721300	80.20	87.381	79.677	63.852
695	195.118000	70.665200	78.24	89.492	81.258	64.464
700	198.261000	71.609100	76.30	91.604	82.840	65.076
705	201.359000	72.979000	74.36	92.246	83.842	66.573
710	204.409000	74.349000	72.40	92.889	84.844	68.070
715	207.411000	67.976500	70.40	84.872	77.539	62.256
720	210.365000	61.604000	68.30	76.854	70.235	56.443

725	213.268000	65.744800	66.30	81.683	74.768	60.343
730	216.120000	69.885600	64.40	86.511	79.301	64.242
735	218.920000	72.486300	62.80	89.546	82.147	66.697
740	221.667000	75.087000	61.50	92.580	84.993	69.151
745	224.361000	69.339800	60.20	85.405	78.437	63.890
750	227.000000	63.592700	59.20	78.230	71.880	58.629
755	229.585000	55.005400	58.50	67.961	62.337	50.623
760	232.115000	46.418200	58.10	57.692	52.793	42.617
765	234.589000	56.611800	58.00	70.307	64.360	51.985
770	237.008000	66.805400	58.20	82.923	75.927	61.352
775	239.370000	65.094100	58.50	80.599	73.872	59.838
780	241.675000	63.382800	59.10	78.274	71.818	58.324

**7.4 Anexo d. valores triestímulo y coordenadas de cromaticidad de los iluminantes CIE, para los observadores colorimétricos estándar CIE 1931 y CIE 1964. obtenido de Colorimetry, C. I. E. (2004).**

**Table T.3. Tristimulus values, chromaticity coordinates of CIE illuminants**

1. For the CIE 1931 standard colorimetric observer as defined in Table T.4 and illuminants as defined in Table T.1 (5 nm intervals over the range 380 nm to 780 nm).

	Standard Illuminant A	Standard Illuminant D65	Illuminant C	Illuminant D50	Illuminant D55	Illuminant D75
$X_n$	109.85	95.04	98.07	96.42	95.68	94.97
$Y_n$	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
$Z_n$	35.58	108.88	118.22	82.51	92.14	122.61
$X$	0.44758	0.31272	0.31006	0.34567	0.33243	0.29903
$y$	0.40745	0.32903	0.31616	0.35851	0.34744	0.31488
$u'$	0.25597	0.19783	0.20089	0.20916	0.20443	0.19353
$v'$	0.52429	0.46834	0.46089	0.48808	0.48075	0.45853

2. For the CIE 1964 standard colorimetric observer as defined in Table T.5 and illuminants as defined in Table T.1 (5 nm intervals over the range 380 nm to 780 nm).

	Standard Illuminant A	Standard Illuminant D65	Illuminant C	Illuminant D50	Illuminant D55	Illuminant D75
$X_{n10}$	111.14	94.81	97.29	96.72	95.80	94.42
$Y_{n10}$	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
$Z_{n10}$	35.20	107.32	116.14	81.43	90.93	120.64
$x_{10}$	0.45117	0.31381	0.31039	0.34773	0.33412	0.29968
$y_{10}$	0.40594	0.33098	0.31905	0.35952	0.34877	0.31740
$u'_{10}$	0.25896	0.19786	0.20000	0.21015	0.20507	0.19305
$v'_{10}$	0.52425	0.46954	0.46255	0.48886	0.48165	0.46004



## **7.5 Anexo e. Ensayo: Oportunidades de servicios e investigación en mediciones colorimétricas**

La colorimetría es un importante elemento en la evaluación de la calidad en las industrias que fabrican productos coloreados de los sectores de manufactura, alimentos, textiles, plásticos, curtiduría, pigmentos, papeles, etc. En Picket (2014) menciona que para algunas industrias como la de alimentos y bebidas, el color vende un producto por sí mismo o por el empaque que lo contiene, para otras industrias tal como la de alimentos y farmacéuticas, ambas están fuertemente reguladas por la administración de alimentos y drogas (FDA) y organismos reguladores similares en todo el mundo, la medición del color se constituye en una herramienta importante para comprender un proceso de fabricación y evitar la contaminación de un producto. En este anexo se presenta una propuesta para crear el servicio de mediciones colorimétricas y espectrofotométricas en el Laboratorio de Óptica de la PUCP, para ellos sugeriremos qué tipo de servicio es posible ofrecer de acuerdo a la disponibilidad de equipos y personal capacitado.

### **Disponibilidad de equipos.**

Hoy el laboratorio de óptica cuenta con un espectrofotómetro Konica Minolta modelo CM-700d, un espectrofotómetro de la marca Thermo Spectronic modelo Helios Gamma y un espectrómetro de la marca Ocean Optics modelo usb 2000, con ellos se pueden cubrir servicios de medición instrumental de color para muestras sólidas de preferencia mates, líquidas opacas/transparentes, según los estándares CIE 15:2004, ASTM E1164-12, ASTM E308-18 entre otros, también es posible incluir el servicio de medición de absorbancia, reflectancia y transmitancia espectral.

### **Requerimientos administrativos**

Analizando los requerimientos administrativos, está la necesidad de contar con un laboratorio acreditado para medición de magnitudes espectrofotométricas y colorimétricas, aquí se debe consultar con el INACAL (Instituto Nacional de Calidad) para averiguar los requisitos necesarios para obtener la certificación del laboratorio bajo el estándar ISO 17025 que es la norma que establece los requisitos para acreditar los laboratorios de ensayo y calibración, con eso se demuestra la competencia técnica de un laboratorio. Esto requiere en términos generales de personal competente, el método o procedimientos normalizados o elaborados por el propio laboratorio, condiciones ambientales y equipamiento.

### **Relaciones con clientes y canales de venta de servicios**

Para la atención de clientes esto debería ser de manera presencial o virtual a cargo de personal especializado, pudiéndose realizar mediante la página web de laboratorio o por anuncios publicitarios en sitios especializados o a través de la página web de INNOVA PUCP.

### **Servicios complementarios y sus requerimientos**

No se debería descuidar tener en proyecto adquirir o hacer una cabina de iluminación para la evaluación visual del color, comprar un atlas de color Munsell, kit de evaluación de discriminación de color Hue test. Además, queda abierta la posibilidad de incursionar en las aplicaciones de formulación del color dirigido a la industria textil y pinturas, así como la gestión de color.

En conclusión, señalamos los requisitos generales para contar con el servicio de mediciones colorimétricas en el laboratorio de óptica de la PUCP, el trabajo de tesis que

presentamos nos permitió conocer más aplicaciones aparte de la colorimetría en alimentos. Por otro lado, también se necesita de recursos humanos (tesistas) que hagan pasantías en centros de aprendizaje, para hacer publicaciones científicas con los equipos que cuenta el laboratorio de óptica.

