



Universidad de Granada

***Facultad de Ciencias
Departamento de Óptica***

**Desarrollo de nuevos índices de blancura:
Aplicaciones en biomateriales dentales**

Tesis Doctoral

María José Rivas Bravo

*Diplomado en Óptica y Optometría
Master en Óptica y Optometría Avanzadas*

Granada, 2014

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: María José Rivas Bravo
D.L.: GR 1973-2014
ISBN: 978-84-9083-173-1



Universidad de Granada
Facultad de Ciencias
Departamento de Óptica

**Desarrollo de nuevos índices de blancura:
Aplicaciones en biomateriales dentales**

Los doctores María de Mar Pérez Gómez, Catedrática de Escuela Universitaria del Departamento de Óptica y Luís Javier Herrera Maldonado, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, ambos pertenecientes a la Universidad de Granada.

Certifican:

Que el trabajo de investigación que recoge esta Memoria de Tesis Doctoral, titulada “**Desarrollo de nuevos índices deblancura: Aplicaciones en biomateriales dentales**”, presentada por la Diplomada en Óptica y Optometría y Master en Óptica y Optometría Avanzadas Dña. María José Rivas Bravo ha sido realizado bajo nuestra dirección en el Departamento de Óptica.

V^oB^o La Directora de Tesis

V^oB^o El Director de Tesis

*Fdo. Dra. M^ªI Mar Pérez Gómez
Catedrática de Escuela Universitaria
Dpto de Óptica
Universidad de Granada*

*Fdo. Dr. Luís Javier Herrera Maldonado
Profesor Titular de Universidad
Dpto. de Arquitectura y
Tecnología de Computadores
Universidad de Granada*



Universidad de Granada
Facultad de Ciencias
Departamento de Óptica

**Desarrollo de nuevos índices de blancura:
Aplicaciones en biomateriales dentales**

El doctorando MARÍA JOSÉ RIVAS BRAVO y los directores de la tesis MARÍA DEL MAR PÉREZ GÓMEZ Y LUIS JAVIER HERRERA MALDONADO garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Granada, 12 de junio de 2014

Directores de la Tesis:

Maria del Mar Pérez Gómez
Luís Javier Herrera Maldonado

Doctoranda:

María José Rivas Bravo

AGRADECIMIENTOS

En estos últimos años ha supuesto para mi un estímulo y un reto la realización de la presente Tesis Doctoral. Quisiera ser capaz de transmitir en su contenido toda la ilusión y entusiasmo que he puesto tanto en la realización como en la escritura. Desde estas líneas quisiera expresar la satisfacción y alegría que ha supuesto el trabajo realizado y mi agradecimiento a todas las personas que, directa o indirectamente, me han ayudado a conseguirlo, que son más de las que puedo recordar. A todos ellos mis más profundo agradecimiento puesto que, de una forma u otra, han hecho que finalice este proyecto con éxito y me convierta en lo que hoy soy.

Manifiesto, muy notablemente, mi agradecimiento y admiración a mis directores Dra. María del Mar Pérez Gómez y Dr. Luís Javier Herrera Maldonado, a cada uno de ellos de una forma diferente.

Gracias María del Mar, mi directora, pero sobre todo amiga. Muchos han sido los momentos que, desde nuestro comienzos en esta institución, hemos compartido juntas, algunos muy buenos pero otros más difíciles, pero siempre superándolos juntas y con optimismo. Siempre has creído en mí y en mi capacidad de aprendizaje, transmitiéndome tu inquietud por la investigación e introduciéndome en ella, enseñándome y formándome. Gracias por convertir este laborioso camino en un proyecto real.

Gracias Luís Javier, tú me inculcaste la pasión por disfrutar cada una de las etapas que han supuesto este proyecto. En cada momento supiste sacar de mí lo mejor y hacerme sentir parte fundamental en su desarrollo y elaboración. Tus ánimos constantes consiguieron lo más importante, acabar satisfecha esta memoria. Gracias de corazón.

Gracias Ana, parte de este proyecto ha sido gracias a la confianza y preocupación que depositaste en mí, en todo momento, para que siempre alcanzara un reto mayor. Tu extraordinaria colaboración ha sido muy valiosa, prestándome ayuda y apoyo moral en todo momento. Gracias por ser mi compañera y sobre todo mi amiga incondicional.

Gracias Manolo Rubiño, Manolo Melgosa, Rafael Huertas y Razvan Guinea porque, de una manera u otra, habéis contribuido a que llegara este momento.

En general, doy las gracias a todos los miembros del Departamento de Óptica, por su apoyo, amistad y su buen hacer diario ya que de una u otra forma ha repercutido en mí, siempre de forma positiva.

Gracias Manolo, apareciste en mi vida mucho antes de comenzar este largo camino y aún sigues a mi lado brindándome tu apoyo y dándome ánimo en todo momento. Gracias por no dudar y confiar en mí desde el principio y no fallarme cuando más lo he necesitado.

Gracias Cristina, gracias Marta, vosotras habéis llenado de alegría todas las duras etapas que he tenido que superar. Gracias por ser el motor de mi vida.

Por último, gracias a mi madre y hermanas porque en toda circunstancia, buena o mala, siempre están conmigo.

A
Enrique,
mi padre.

ÍNDICE

Introducción	13
Capítulo 1: Revisión bibliográfica	17
1.1 Espacio de color CIELAB. Fórmulas de diferencia de color.....	17
1.2 Fórmulas de blancura.....	23
1.2.1 Blancura de los dientes. Estética dental.....	30
1.3 Bibliografía.....	35
Capítulo 2: Motivación y objetivos	41
Capítulo 3: Material y método	43
3.1 Muestras.....	43
3.1.1 Guías Dentales.....	43
3.1.2 Resinas de composites dentales.....	45
3.1.2.1 Estudio sobre tolerancias para la selección de resinas de composite	45
3.1.2.2 Resinas de composites dentales de manufacturación propia seleccionadas	49
3.2. Dispositivo y medida del color.....	51
3.2.1 Espectrorradiómetro.....	52
3.2.2 Cabina de iluminación.....	53
3.2.3 Medida del color.....	55
3.3 Experimento psicofísico.....	62

3.3.1 Panel de observadores.....	62
3.3.2 Experiencias psicofísicas.....	63
3.4 Fórmulas de blancura.....	66
3.5 Nuevos índices.....	75
3.5.1 Índices propuestos.....	75
3.5.2 Optimización de índices propuestos.....	76
3.5.3 Validación de índices propuestos.....	81
3.5.4 Validación clínica de índices propuestos.....	85
3.6 Software.....	86
3.7 Bibliografía.....	87
Capítulo 4: Resultados y discusión.....	91
4.1 Nuevos índices de blancura W_{UGR} y $W_{Lab-UGR}$	91
4.2 Validación de los índices de blancura propuestos.....	103
4.3 Validación clínica de los índices de blancura propuestos.....	109
4.4 Bibliografía.....	113
Capítulo 5: Conclusiones.....	117
Anexos.....	121
Anexo 1.....	121

INTRODUCCIÓN

A lo largo de tiempo, el ser humano se ha preocupado por lograr y obtener una agradable apariencia física. Esta preocupación por la estética en general y en particular por la dental, ha cobrado una gran importancia en la sociedad actual incrementándose día a día la demanda de tratamientos que no sólo se preocupen de restaurar morfo-funcionalmente el diente sino también que restauren su aspecto natural o incluso lo mejoren.

Hoy en día el desarrollo de técnicas cuya finalidad es mejorar el aspecto del diente conlleva no solo la necesidad de disponer de dispositivos instrumentales de medida del color sino, también, de fórmulas de diferencia de color e índices de blancura que estén bien correlacionadas con la percepción visual humana.

Si bien existen numerosos estudios que han establecido la adecuación de fórmulas de diferencia de color en el ámbito odontológico, incluidos los realizados en nuestro laboratorio, hasta la actualidad, son prácticamente inexistentes aquellos que abordan la adecuación de los actuales índices de blancura en la evaluación y la predicción de blancura en este ámbito/campo.

El uso de índices de blancura para describir la blancura de los dientes o biomateriales dentales ha recibido, en general, una limitada atención en investigación y en la práctica clínica odontológica. Cuantificar la blancura ha sido durante décadas de gran importancia en las industrias del papel, textil y pintura. Varios índices de blancura han sido desarrollados para hacer frente a las necesidades de estas industrias. En concreto, el índice WIC y el índice de

tinte (T) propuestos por la CIE, ambos definidos en el espacio de color CIE1931, son los más empleados en el ámbito industrial y hasta ahora, los empleados en odontología.

Recientemente, Luo et al. han propuesto una versión modificada del Índice de blancura CIE (WIO), basado directamente en la experiencias psicofísicas desarrolladas por observadores usando la guía de color dental Vitapan 3D Master[®]. Este índice tiene la misma forma funcional que el índice WIC pero sus parámetros están optimizado específicamente para la evaluación de la blancura en los dientes. De hecho, se ha demostrado que el índice WIO es, hasta la fecha, el más adecuado para la predicción de la blancura de los dientes y el más apropiado para evaluar los cambios en blancura.

En la actualidad el uso del espacio de color CIELAB está ampliamente difundido y su empleo es mayoritario en la práctica industrial, resaltando, además, que es el más empleado y recomendado para su aplicación en Odontología, de hecho son numerosos los trabajos realizados en Odontología sobre el color de los dientes empleando para su especificación el espacio CIELAB. Además los actuales dispositivos desarrollados para la especificación de color dental operan en este espacio. A pesar del avance que ha supuesto el índice WIO hay que hacer notar que éste está definido en el espacio CIE1931 lo que dificulta el uso de este índice en la práctica clínica.

A la vista de lo expuesto anteriormente y la deficiente literatura en este campo se hace necesario llevar a cabo investigaciones que establezcan nuevas fórmulas, especialmente basadas en el espacio de color CIELAB, adecuadas para la especificación y predicción de la blancura así como para evaluar de forma correcta los cambios de blancura de los dientes y biomateriales dentales.

La presente Tesis doctoral se estructura en 5 capítulos. En el capítulo 1 describiremos los antecedentes en investigación sobre el tema, mediante la revisión bibliográfica de los trabajos relacionados con el desarrollo y evolución de índices para la evaluación y predicción de la blancura tanto a nivel general como relacionados con en el campo de la Odontología y en especial los relacionados con el espacio de color CIELAB. En el capítulo 2 se plantean los objetivos de nuestro estudio. En el capítulo 3 describiremos ampliamente tanto el material como la instrumentación y metodología que hemos utilizado para el desarrollo de nuevas fórmulas de blancura para la evaluación de biomateriales dentales. Los resultados obtenidos experimentalmente son analizados en el capítulo 4, que hemos dividido en 3 apartados. En el apartado 1 realizamos el análisis de los nuevos índices optimizados. En los siguientes apartados se realizará la validación de los nuevos índices desarrollados. De forma independiente en cada capítulo, se listarán, al final, las referencias bibliográficas que hemos utilizado y citado. Por último, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas.

CAPÍTULO I

1.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se describirá, en primer lugar, conceptos básicos relacionados con el color y la Colorimetría, ésta última por ser objeto de aplicación para la evaluación cromática de las resinas de composite utilizadas en este trabajo. Seguidamente se hará una revisión de la evolución de las fórmulas de blancura hasta nuestros días, así como la aplicación y desarrollo de estas fórmulas en el ámbito de la Odontología.

1.1. Espacio de color CIELAB. Formulas de diferencia de color

A lo largo del tiempo han sido muchos los sistemas de especificación del color y las diferencias de color que se han propuesto en la literatura, buscando mejorar la correlación entre medidas de color y percepción visual. En 1976, con el deseo de promover una uniformidad en la práctica de la medida del color La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) recomendó el uso de dos sistemas de especificación de color: CIELAB Y CIELUV con sus correspondientes fórmulas de diferencia de color asociadas (CIE, 2004).

Para la evaluación cromática de los materiales dentales, como son las resinas de composite, emplearemos el sistema de especificación de color CIELAB y sus diferencias de color asociadas CIE94 (ΔE^*_{ab}) y CIEDE2000 (ΔE_{00}). En la presente tesis doctoral, nos limitaremos a recordar las ecuaciones que definen a CIELAB, y a realizar algunas breves observaciones respecto a la misma.

Los valores L^* , a^* y b^* de un color en CIELAB se calculan a partir de los valores triestímulo X , Y y Z de ese color, siendo estos últimos valores las “cantidades” de cada primario X , Y y Z que deben ser mezclados para obtener el color deseado. Las ecuaciones para calcular L^* , a^* y b^* son:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{si } \left(\frac{Y}{Y_0} \right) > 0.008856$$

$$L^* = 903.3 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \quad \text{si } \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \leq 0.008856$$

$$a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_0} \right) - f\left(\frac{Y}{Y_0} \right) \right]$$

$$b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_0} \right) - f\left(\frac{Z}{Z_0} \right) \right]$$

donde la función f tiene la siguiente forma:

$$f(a) = a^{1/3} \quad \text{si } (a) > 0.008856,$$

$$f(a) = 7.787 \cdot (a) + \left(\frac{16}{116} \right) \quad \text{si } (a) \leq 0.008856,$$

$$f(a) = \begin{cases} a.. & \text{si } a > \\ 7.787.. & \text{si } a \leq \end{cases}$$

y X_0 , Y_0 y Z_0 son los valores triestímulo del blanco de referencia.

Una característica importante de CIELAB es la posibilidad que ofrece de realizar una especificación del color en coordenadas cilíndricas L^* , croma C^* y ángulo de tono h° , muy bien correlacionadas con los atributos cromáticos de la percepción visual. Esta característica fue recogida por la CIE en 1976, siendo las expresiones para calcular el croma y el ángulo de tono las siguientes:

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$h = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

La Figura 1.1 muestra una representación tridimensional de estas coordenadas y un plano de L^* constante, es decir, un plano C^*-h° en coordenadas cilíndricas.

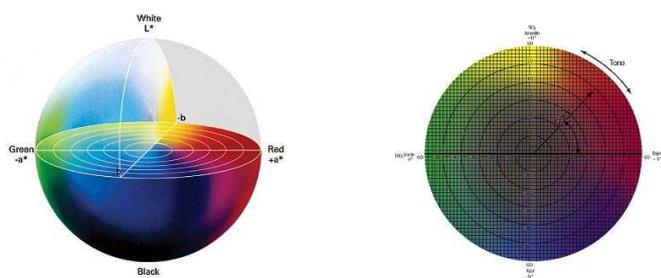


Figura 1.1: *Espacio CIELAB*

El croma (C^*) está relacionado con la saturación de un estímulo, es decir, nos indica si en el diagrama CIELAB un estímulo está más o menos cerca del estímulo acromático situado en el centro (0,0) del diagrama. Y el ángulo de tono (h°), que varía desde 0° hasta 360° , nos indica la zona del diagrama en la que se encuentra el estímulo, es decir, el “color” del mismo.

Queremos señalar que en la actualidad el uso de CIELAB está ampliamente difundido y su empleo es mayoritario en la práctica industrial. Además en base a CIELAB se han desarrollado algunas de las fórmulas de diferencia de color más recientes, en particular la fórmula CIE94 (CIE, 2001) y la fórmula CIEDE2000 (CIE, 2004) (Luo et al, 2001). También queremos resaltar que el sistema CIELAB es el más empleado en los trabajos realizados hasta la actualidad en el campo de la odontología, al que pertenecen las resinas de composite, materiales con los que se realiza nuestro estudio.

Así, la fórmula de diferencia de color asociada a este espacio viene dada por las siguientes expresiones:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^o)^2}$$

donde los incrementos representan las diferencias en cada coordenada entre los colores para los que se calcula la diferencia.

Hasta ahora, para la especificación del color y el cálculo de diferencias de color se ha empleado el sistema CIELAB y su fórmula de diferencia de color asociada ΔE^*_{ab} . Con el objeto de mejorar la relación entre las diferencias de color medidas y percibidas en las aplicaciones industriales, la CIE propuso una fórmula de diferencia de color llamada CIEDE2000 (Luo et al, 2001) (CIE, 2004). Dicha fórmula incorpora correcciones específicas para evitar la no uniformidad del espacio CIELAB, llamadas funciones de peso y designadas por S_L , S_C y S_H y unos parámetros que toman en cuenta la influencia de las condiciones de iluminación y observación en la evaluación de la diferencia de color; dichos parámetros K_L , K_C y K_H son llamados factores paramétricos. La CIE (CIE, 2004) indica que bajo las condiciones experimentales habituales en la práctica industrial, el valor para cada factor paramétrico es igual a 1.0.

La fórmula de diferencia de color CIEDE2000 viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right) \right]^{1/2}$$

donde $\Delta L'$, $\Delta C'$ y $\Delta H'$ son las diferencias en luminancia, croma y tono para un par de muestras en CIEDE2000, y R_T es una función, llamada término de rotación que da cuenta de la interacción entre las diferencias en croma y tono en las región de los azules. $\Delta L'$, $\Delta C'$ y $\Delta H'$ se calculan según las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \Delta L' &= L_2^* - L_1^* \\ \Delta C' &= C_2' - C_1' \\ \Delta h' &= \begin{cases} 0 & C_1' C_2' = 0 \\ h_2' - h_1' & C_1' C_2' \neq 0, |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ (h_2' - h_1') - 360 & C_1' C_2' \neq 0, (h_2' - h_1') > 180^\circ \\ (h_2' - h_1') + 360 & C_1' C_2' \neq 0, (h_2' - h_1') < -180^\circ \end{cases} \\ \Delta H' &= 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \end{aligned}$$

Las coordenadas h' , C' y L' son valores transformados del ángulo de tono, croma y luminosidad y se designan con una prima. Su cálculo se realiza a partir de a' , b' y L' de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} C_{i,ab}^* &= \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2} \quad i = 1, 2 \\ \bar{C}_{ab}^* &= \frac{C_{1,ab}^* + C_{2,ab}^*}{2} \\ G &= 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + (25)^7}} \right) \\ a_i' &= (1 + G)a_i^* \quad i = 1, 2 \\ C_i' &= \sqrt{(a_i')^2 + (b_i')^2} \\ h_i' &= \begin{cases} 0 \\ \tan^{-1}(b_i'/a_i') \end{cases} \quad i = 1, 2 \\ L' &= L^* \\ a' &= a^*(1 + G) \\ b' &= b^* \end{aligned}$$

Como se observa, a' es una modificación del eje a^* de CIELAB, con el fin de lograr un mejor acuerdo con las diferencias de color percibidas para los colores de bajo croma, colores neutros. La modificación incrementa la magnitud de valores a' comparados con los valores de a^* para dichos colores. Cabe

hacer notar que esta transformación de a^* en a' , no supone una redefinición de CIELAB, sólo tiene efectos en cuanto al cálculo posterior de la diferencia de color.

Por otro lado, los otros términos de la ecuación CIEDE2000 se definen con las siguientes expresiones matemáticas:

$$\bar{L}' = (L_1' + L_2')/2$$

$$\bar{C}' = (C_1' + C_2')/2$$

$$\bar{h}' = \begin{cases} \frac{h_1' + h_2'}{2} & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ; \quad C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h_1' + h_2' + 360^\circ}{2} & |h_1' - h_2'| > 180^\circ; \quad (h_1' + h_2') < 360^\circ \quad C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h_1' + h_2' - 360^\circ}{2} & |h_1' - h_2'| > 180^\circ; \quad (h_1' + h_2') \geq 360^\circ \quad C_1' C_2' \neq 0 \\ (h_1' + h_2') & C_1' C_2' = 0 \end{cases}$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$\Delta\theta = 30 \exp \left\{ - \left[\frac{\bar{h}' - 2.75^\circ}{25} \right]^2 \right\}$$

$$R_c = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$$

$$S_c = 1 + 0.045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C$$

Actualmente existe en la literatura estudios sobre la correlación entre los valores de diferencia de color obtenidos con ΔE^*_{ab} y CIEDE2000, así Lee Y.K. (2005) y Pérez MM et al. (2007) encontraron, después de la fotopolimerización de los materiales dentales ($r^2=0.95$ y $p<0.0001$), una significativa correlación entre ΔE^*_{ab} y ΔE_{00}

1.2. Fórmulas de blancura

La blancura es un atributo de color de alta reflectancia luminosa y baja pureza situado en una región relativamente estrecha del espacio de color a lo largo de las longitudes de onda dominante entre 570 nm y 470 nm aproximadamente.

Aunque los colores percibidos como tales blancos, constituyen un conjunto en un espacio tridimensional, la mayoría de los observadores son capaces de clasificar muestras de blanco de diferente reflexión luminosa, pureza y/o longitudes de onda dominante en un orden unidimensional de acuerdo con su blancura.

A lo largo de la historia muchos han sido los estudios realizados para encontrar un índice unidimensional en color para cuantificar de forma común la blancura como atributo importante en color (Ganz, 1972), de hecho son numerosas las fórmulas de blancura que hoy en día están aún en empleo para evaluar la blancura de materiales blancos, como son el índice WI (ASTM E-313-73), índice WI de Ganz (Ganz, 1979) o el índice WIC (CIE, 1986) entre otros.

Muchos son los objetos blancos que nos rodea y ser percibido como blanco a menudo desempeña un papel importante en el aumento de su valor como productos comerciales. Desde la década de 1930, aproximadamente, muchos han sido los estudios realizados para mejorar la blancura percibida y su evaluación cuantitativa. Las medidas instrumentales de blancura han reemplazado a la evaluación visual, que se ve afectada por las preferencias individuales, ya que ésta evaluación de blancura instrumental es superior si supera la incertidumbre de medición y de evaluación. No obstante, hoy en día se ha demostrado que dichas fórmulas no están bien correlacionadas con la

estimación visual, incluyendo fórmulas de blancura muy usadas actualmente como WIC (Uchida, 1990,1994 y 1998; Katayama et al, 2010).

Los primeros intentos por definir blancura se basaron en cuantificarla como una cantidad de luminosidad en relación con un blanco de referencia, así la fórmula $W = Y$, donde Y es el factor de luminancia de la superficie del blanco con respecto a un blanco estándar y dado para el observador estándar CIE, intenta cuantificar la blancura solo en relación a la luminosidad (ASTM Method E97-53T, 1953). La fórmula $W = B$, donde B es la reflectancia de la superficie blanca cuando se ilumina con luz azul, con radiancia espectral del iluminante A estándar CIE, y que trata de relacionar blancura con una reflexión azul definida ya sea por la función CIE $z(\lambda)$ o para cualquier otra especial definida. Esto era un valor puramente de luminancia y no informaba si los objetos observados eran azulados o amarillentos. Esto se pudo corregir utilizando los usualmente denominados índices de “amarilleo”, índices que tenía en cuenta las cantidades relativas de luz azul y amarilla reflejada (Hunter, 1958).

El empleo de filtros de paso de banda no estandarizados contribuyó a una pérdida de popularidad de este tipo de fórmulas, especialmente después de la introducción de los colorímetros de filtro que se basaban en los filtros G (verde), B (azul) y A (ámbar) que están relacionados con $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ CIE, y la porción de rojo de las funciones de color $\bar{x}(\lambda)$, ponderado por un iluminante estándar CIE (Hunter, 1958). Dentro de este formalismo las fórmulas se empiezan a expresar como índices de amarilleo y toman la siguiente forma general:

$$W = \frac{A - B}{G}$$

Dentro de este grupo se encuentra la enunciada por Tauber (Hunter, 1960) que tomó la forma siguiente:

$$W = G - 4(G - B) = 4B - 3G$$

donde $(G - B)$ expresa índice de amarillez, mientras que G es el factor de luminancia que representa un índice de luminosidad.

Hoy en día siguen en funcionamiento ciertos índices de amarillez o amarillo (YI), que describen el cambio de color de una muestra de claro o blanco, a amarillo. Se utiliza con mayor frecuencia para evaluar los cambios de color en un material causado por la exposición al aire libre, ya sean reales o simulados y se limitan a materiales que tienen longitudes de onda dominantes en el intervalo de 570-580nm. Entre estos podemos citar dos índices de amarillez o amarillo desarrollados y normalizados por la ASTM (American Society for Testing Materials) que se utilizan con frecuencia y que atienden a las siguientes expresiones:

$$-YI = [100 \times (1.28X - 1.06Z) / Y]$$

desarrollado específicamente para plásticos por la ASTM y denominado YI ASTM D 1925 y

$$-YI = 100 \times [1 - 0.847Z / Y]$$

denominado YI ASTM E 313 y utilizado con éxito para una gran variedad de materiales blancos o cercanos al blanco, incluido revestimientos, plásticos y textiles. Muy pronto se reconoció que las fórmulas de amarillez o las basadas en las diferencias relativas de luz azul y amarilla no eran suficientes para describir la blancura.

La luminancia fue reconocida como una importante contribución a la percepción de lo blanco destacando la fórmula enunciada por Hunter que atiende a la siguiente expresión:

$$W_{Hunter} = L - 3 b$$

donde L y b son coordenadas Hunter (Hunter, 1960). La sencillez de la fórmula de Hunter es notable y tiene claramente en cuenta la importancia de contar con la luminancia y un valor b azul neutro.

Con el fin de conseguir un aumento de la percepción de la blancura se empezaron a adicionar a los materiales blancos los denominados agentes blanqueadores fluorescentes (FWAs). A partir de su incorporación se reconoció que las fórmulas lineales para medir la blancura percibida en blanco se podían construir en cualquiera de los espacios colorimétricos, lo que representó una primera racionalización de las fórmulas de blancura existentes (Ganz, 1976).

Tanto los problemas planteados por la fotometría de muestras fluorescentes y sus requisitos colorimétricos, como la experiencia en la evaluación de los requisitos de blancura industriales, delimitaron la selección de las fórmulas de blancura.

Gran parte del estudio y desarrollo de fórmulas de blancura lineales fue realizada por Ganz entre los años 1976 y 1979. En el año 1979 propone una fórmula estándar de blancura para muestras acromáticas. Además propone dos fórmulas suplementarias de blancura para el caso de que la muestra, aun siendo acromática, tenga un tinte con preferencia hacia los verdes y rojo, respectivamente. A su vez comienza a plantearse la caracterización de las muestras blancas en cuanto a blancura, tinte, y luminancia (Ganz, 1979). Así la fórmula propuesta, en su forma general, toma la siguiente expresión:

$$W_{Ganz} = Y + P(x_0 - x) + Q(y_0 - y)$$

donde el valor de P y Q , fueron determinados mediante un procedimiento de ajuste utilizando un conjunto de muestras de calibración, por lo que no tenía un

carácter universal y se aplicaban únicamente para el instrumento específico calibrado y donde (x_0, y_0) eran las coordenadas del punto acromático para el iluminante D_{65} .

En esta etapa fue reconocida claramente la importancia de la cantidad de UV que actúa en la muestra; las condiciones de luz día fueron escogidas como la referencia para el trabajo sobre la determinación de blancura, y por tanto las fórmulas modernas eran estrictamente válidas para D_{65} .

La CIE reconoce la importancia de un enfoque unificado para la medición de la blancura y a finales de los años sesenta estableció el Subcomité de Blancura comenzando, así, un estudio conjunto internacional de blancura para buscar una solución a este problema. El objetivo principal era desarrollar un índice que pudiera ser utilizado para establecer las tolerancias en producción industrial. Los principales factores que influían en las ecuaciones eran: los datos experimentales visuales desarrollados, la exactitud y precisión de los espectrofotómetros utilizado en la medición de materiales con blanqueo óptico, la uniformidad de la distribución espectral de las fuentes de luz utilizadas para las evaluaciones visuales en las cabinas de visualización y la precisión del modelo de correlación entre la medida y los datos de percepción visual.

Por todo ello, y en base a los estudios anteriormente realizados por Ganz, la CIE desarrolló en 1986 una fórmula conocida como índice de blancura CIE (WIC) (CIE, 1986). La fórmula de blancura es un modelo lineal con una línea base de 470nm de longitud de onda dominante en el diagrama cromático xy. Desde ese momento la fórmula de blancura WIC es considerada norma y adoptada por muchas instituciones como la ISO, Tappi, AATCC, DIN, ASTM, etc, como método de evaluación de los materiales blancos.

Esta fórmula se utiliza ampliamente, y se muestra en la siguiente ecuación:

$$WIC = Y + 800 (x_0 - x) + 1700 (y_0 - y)$$

$$T_{CIE} = 900 (x_0 - x) - 650 (y_0 - y)$$

donde se describen la blancura y el factor de tinte para el iluminante D₆₅ y observador 10°; para el observador de 2° el factor de tinte se obtiene por la siguiente expresión:

$$T_{CIE} = 1000 (x_0 - x) - 650 (y_0 - y)$$

En sentido estricto las fórmulas WIC son válidas sólo para el iluminante D₆₅ y para cantidades de UV similares a la luz día, destacando algunas instituciones que permiten el uso de las fórmulas WIC en conjunción con el alumbrado que no sea D₆₅.

La CIE adoptó como recomendación para la evaluación de muestras blancas las fórmulas de blancura y tinte WIC10 y T10 (Observador estándar suplementario colorimétrico CIE 1964 e Iluminante estándar CIE D65) ya que este valor es representativo de muestras blancas comerciales, denominándose sistema $L^*a^*b^*$ y siendo publicado en 1986 (CIE, 1986). Desde entonces el sistema $L^*a^*b^*$ se utiliza como método rutinario en la colorimetría industrial.

En 1995 Ganz realiza una aproximación lineal a las fórmulas de blancura y tinte de la CIE en el sistema de color CIE $L^*a^*b^*$ (Ganz, 1995) siendo las siguientes:

$$W_{Lab} = 2.41L^* - 4.45b^*[1 - 0.0090 (L^* - 96)] - 1.141$$

$$T_{Lab} = -1.58a^* - 0.38b^*$$

donde los parámetros que aparecen en la fórmula fueron los que mejor ajuste proporcionaron en el área de representación de las muestras que se denominaban comercialmente blancas.

Aunque la llegada de los agentes blanqueadores fluorescentes (FWA`s), cambió la idea general de blancura y se propusieron numerosas fórmulas de blancura para la evaluación de la blancura de materiales blancos numerosos estudios pusieron de manifiesto la insatisfactoria correlación entre las respuestas visuales y los modelos de blancura CIE (Griesser, 1996; Uchida, 1994).

En 1998 y tras un intensa investigación, H. Uchida propuso una fórmula de blancura como modificación a la establecida por la CIE que tenía en cuenta tanto el matiz como la pureza (Uchida, 1998). La fórmula propuesta por Uchida proporcionó una muy significativa correlación con la estimación visual en contraposición con la fórmula de blancura WIC. El nuevo índice de blancura atendía a la siguiente expresión:

- para CIE1931:

$$W = W_{CIE} - 2(T_W)^2$$

- para CIE1964:

$$W_{10} = W_{CIE,10} - 2(T_{W,10})^2$$

Hoy en día se reconoce que la blancura es un atributo de color especial y hay muchas industrias en las que el índice de blancura es una medida útil de la calidad de los productos manufacturados. Los tres índices más utilizados actualmente son el índice blancura CIE (WIC), el índice de blancura WI y el índice Z%, ambos propuestos por la ASTM (ASTM E-313-73) y donde WI y Z% atienden a las siguientes expresiones:

$$WI = 4Z\% - 3\frac{Y}{Y_n}100$$

$$Z\% = \frac{Z}{Z_n}100$$

Ahora bien, para que un índice de blancura sea válido, debe ser utilizado en el tipo de material para el que fue concebido o al menos similar en brillo, textura, translucidez, y otros atributos físicos.

Aunque estas fórmulas caracterizan satisfactoriamente la apariencia comercial de blancura tienen pobres correlaciones con la evaluación visual y a menudo fracasan en la evaluación de muestras blancas tintadas. Por ello y debido a la gran aplicabilidad en la práctica industrial del espacio uniforme de color CIELAB, en el año 2007 se desarrolló una fórmula de blancura (WLAB) que se correlacionaba bien con la evaluación visual del observador y que obtenía, también, mejores resultados en uniformidad y aplicabilidad que la fórmula de blancura WIC (Guoxin et al, 2007).

1.2.1 Blancura de los dientes. Estética dental

En el campo de la Odontología, en los últimos años y de forma paralela, el blanqueamiento de los dientes se ha convertido en una rutina dental popular entre pacientes y consumidores, favoreciendo el aumento dramático de la manufactura de productos y procedimientos clínicos para el blanqueamiento dental.

La mezcla de ciencia y arte es algo para lo que hoy en día la industria dental está preparada. Los pacientes están exigiendo una odontología estética contemporánea, lo que ha llevado a la industria a elevar continuamente el listón, en lo que respecta a los detalles estéticos, produciéndose un

considerable aumento en el desarrollo y evaluación de nuevos métodos de blanqueamiento y en consecuencia un foco de estudio para el desarrollo de tecnologías y técnicas de medida del blanqueamiento dental, hecho que están siendo de gran valor para el campo de la odontología estética.

El continuo interés por parte de investigadores y clínicos en el blanqueamiento dental, tanto en lo relativo a su comprensión mecánica como a la optimización del proceso de control del blanqueamiento dental, ha hecho necesaria una evaluación más cuidadosa a fin de mejorar los productos y procedimientos de blanqueamiento de dientes, dando significativos beneficios a este campo.

Uno de los métodos más comunes para la evaluación del blanqueamiento dental era la comparación simultánea de los dientes con una guía de colores estándar donde el blanqueamiento dental se medía por cambios, a lo largo de la guía, en el color del diente. Se trataba de un método subjetivo y en él podían influir un gran número de factores (Van Der Burgt et al, 1990).

Con el fin de mejorar las técnicas de evaluación a la hora de realizar estudios de blanqueamiento dental se elaboraron una serie de recomendaciones, a tener en cuenta, para estandarizar y controlar estos factores. Entre ellas destacaban la mejora de los observadores por medio de entrenamiento y experiencia en la capacidad discriminativa del color de diente y ejercicios de calibración de color y de formación con las guías de colores de los investigadores implicados (Joiner, 2006).

La consecuencia inmediata de este auge de la odontología estética fue una creciente demanda por la predicción y cuantificación de la blancura de dientes. En esta línea algunos investigadores propusieron que para la

evaluación del blanqueamiento dental los factores más importantes eran los cambios en la amarillez (Barlow et al, 2003) ya que existían evidencias de que se podía aplicar un índice de blancura para la predicción de la blancura de los dientes. Pero todavía hay cierta incertidumbre sobre la aplicabilidad de dichas fórmulas, ya que muchas fueron designadas para ser utilizadas sólo con muestras cuyas coordenadas cromáticas están dentro de un estrecho rango y en el cual el color de los dientes, descrito en numerosas investigaciones, parece estar fuera (Joiner, 2004 y Luo et al, 2005). Además estas fórmulas caracterizan satisfactoriamente la apariencia comercial de blancura, sin embargo tienen pobres correlaciones con las evaluaciones de los observadores.

La percepción de la blancura tiene dos componentes, la luminancia, es decir, es más blanco lo que parece más brillante, y el 'tinte': En general los tonos que se alejan demasiado del blanco modelo se consideran menos blancos aunque posean una misma luminancia. Pero los seres humanos tienen una marcada preferencia por los blancos "azulado". Esta preferencia está limitada ya que al aumentar el tono azulado de una muestra ésta dejará de ser descrita como "blanca". Los índices de blancura tienen en cuenta estos componentes, ahora bien, sólo son válidos para un intervalo de valores de tinte y fuera de este intervalo no se deben utilizar.

El uso de índices de blancura para describir la blancura de dientes en la odontología ha recibido, en general, una atención limitada en la literatura. Así el índice de blancura CIE (WIC) se ha utilizado "in vitro" para describir la blancura de un conjunto de muestras de dientes de porcelana (García et al, 1993); pero también ha sido aplicado "in vitro" en dientes extraídos para investigar los efectos del blanqueamiento de un tratamiento de blanqueo (Guan et al, 2005).

En un estudio más reciente, utilizando técnicas de análisis de imagen digital, fueron clasificadas las tablillas de la guía de colores Vitapan 3D Master de más blanca a la menos blanca en términos de valores WIC (Lath et al, 2007). La aplicación de WIC también se ha tenido en cuenta en odontología forense para la determinación de la edad de restos esqueléticos dentales (Martin de las Heras et al, 2003).

Por otro lado, y basándose en el espacio de color CIELAB, se ha descrito un índice de blancura (W^*) basado en la distancia del color a un blanco modelo, representados como $L^*=100$, $a^*=0$ y $b^*=0$, y que se definió como:

$$W^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2 + (L^* - 100)^2]^{1/2}$$

y donde los cambios en cercanía al blanco (ΔW^*), tras el uso de un tratamiento de blanqueamiento dental, podía ser calculado por la siguiente expresión (Gerlach, 2002):

$$\Delta W^* = W^* (\text{tratamiento}) - W^* (\text{base})$$

Este índice de blancura, junto con los valores ΔL^* , Δa^* y Δb^* , ha sido usado para describir los cambios en el color del diente en un gran número de estudios de blanqueamiento dental (Hernández Guerrero et al, 2007; Xu et al, 2007). En un estudio reciente realizado en el Laboratorio de Óptica de Biomateriales (Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada) se ha empleado este índice de blanqueamiento para realizar una valoración del cambio cromático (ΔW^*) experimentado por el diente mediante un único valor numérico (Santana, 2010).

W. Luo et al propusieron en el año 2005 una versión modificada del índice de blancura CIE (Luo et al, 2005), denominada WIO y basado

directamente en una ordenación de blancura realizada por observadores sobre la guía de colores dental Vitapan 3D Master y definida como:

$$WIO = Y + 1075.012 (x_n - x) + 145.516 (y_n - y),$$

Este índice tiene la misma forma funcional que el índice WIC (CIE, 1986), pero las constantes de la fórmula son diferentes, ya que están optimizadas específicamente para la ordenación de la blancura en dientes realizada por observadores, según la formulación genérica dada por Ganz (Ganz, 1979)

En dicho estudio (Luo et al, 2005), se comparó el rendimiento del nuevo índice WIO con los índices más utilizados para la valoración de la blancura de los dientes en la literatura actual (WIC, Z%, WI y el valor b* CIELAB). Como medida de bondad de ajuste entre los datos visuales obtenidos y los valores de los índices, se calculó el coeficiente de determinación entre los z-scores lineales obtenidos en los experimentos psicofísicos visuales realizados bajo condiciones de iluminación clínica, y los valores de índices.

En otro estudio (Luo et al, 2009), partiendo de la optimización del índice de blancura WIO sobre los juicios visuales de la guía dental Vitapan 3D Master[®] en condiciones de iluminación de laboratorio, se presentó un segundo experimento en el que se evaluó el rendimiento de este índice con juicios visuales bajo condiciones típicas clínicas (no de laboratorio) y realizadas por un ampliado panel de observadores, en este caso, pacientes clínicos y utilizando para ello la guía dental Vita Classical[®].

Utilizando el coeficiente de determinación (R^2) se probó la relación lineal entre los datos obtenidos de cada observador individual y la media de los resultados del panel de observación. Además se realizó un análisis adicional basado en la medida estadística del “% de decisiones incorrectas -DI” (“%

wrong decisions” -WD) para comprobar cual de las fórmulas de blancura era la más adecuada. Los resultados confirmaron que WIO superaba a la fórmula de blancura WIC y que era tan fiable, en términos prácticos, como el observador humano, además de ser apropiada para la predicción de la percepción de la blancura de los dientes.

Hoy en día WIO, desarrollado específicamente para el ámbito odontológico (Luo et al., 2009), está aumentando su importancia en la evaluación y predicción de la blancura en dientes.

1.3 BIBLIOGRAFÍA.

- ASTM, Federal Specification TT-P-141b. 1953, Method 612.1, Method 412.1, Method 613.1
- Barlow AP, Brennan K, Desai AP “Clinical comparison of two self-directed at-home bleaching systems. Proceeding of the 81st general session of the International Association for Dental Research. 2003: 900.
- CIE Publication No. 15.2. Colorimetry. Viena: Central Bureau of the CIE; 1986. Chap. 5.3, 36-38.
- CIE Pub No. 142-2001, “Technical Report: improvement to industrial color-difference equation”. 2001, CIE Central Bureau. Vienna, Austria.
- CIE Publication No. 15.3. Colorimetry. (Technical Report). 2004, CIE Central Bureau. Vienna. Austria.
- Ganz E. “Whiteness measurement“ J. Color Appear. 1972; 1(5): 33-41.

- Ganz, E "Whiteness: photometric specification and colorimetric evaluation" Applied Optics. 1976; 15(9): 2039-2058.
- Ganz E. "Whiteness formulas: a selection" Applied Optics. 1979; 18(7): 1073-1078.
- Ganz, E. "Whiteness and tint formulas of the Commission Internationale de L'Eclairage: approximation in the $L^*a^*b^*$ color space" Applied Optics. 1995; 34: 2998-2999.
- Garcia JA, Rubiño M, Romero J, Hita E. "Measuring the whiteness of human teeth". Color Research and Application. 1993; 18: 349–52.
- Gerlach RW, Zhou X, McClanahan SF. "Comparative response of whitening strips to a low peroxide and potassium nitrate bleaching gel" American Journal of Dentistry. 2002; 15: 19A–23A.
- Griesser R. "CIE whiteness and tint: possible improvements" Appita. 1996; 49: 105-112.
- Guan YH, Lath DL, Lilley TH, Willmot DR, Marlow I, Brook AH. "The measurement of tooth whiteness by image analysis and spectrophotometry: a comparison". Journal of Oral Rehabilitation. 2005; 32: 7–15.
- Guoxin H, Mingxun Z "Whiteness formula in CIELAB uniform color space". Chinese Optics Letters. 2007; 5(7): 432-434.
- Hernández Guerrero JC, Jimenez-Farfán MD, López-Salgado A, Barker ML, Gerlach RW. "Professional whitening strips in a university population" American Journal of Dentistry. 2007; 20: 15A–8A.

- Hunter RS "Description and measurement of white surfaces" J. Opt. Soc. Am. 1958; 48(9): 587-605.
- Hunter, RS "New reflectometer and its use for whiteness measurement". J Opt. Soc. Am. 1960; 49: 830-831.
- Joiner A. "Tooth colour, a review of the literature" Journal of Dentistry, 2004; 32(1): s3-s12.
- Joiner A "The bleaching of teeth: a review of the literature" Journal of Dentistry, 2006; 34: 412-419.
- Joiner A, Hopkinson I, Deng Y, Westland S "A review of tooth colour and whiteness". Journal of Dentistry. 2008; 36s: s2-s7.
- Katayama I, Fairchild MD "Quantitative evaluation of perceived whiteness based on a color vision model" Color Res. Appl. 2010; 35: 410-418.
- Lee Y.K. "Comparison of CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 color-differences after polymerization and thermo cycling of resin composites". Dental Materials. 2005; 21(7): 678-682.
- Lath DL, Wildgoose DG, Guan YH, Lilley TH, Smith RN, Brook AH. "A digital image analysis system for the assessment of tooth whiteness compared to visual shade matching". Journal of Clinical Dentistry. 2007; 18: 17-20.
- Luo MR, Cui G, Rigg B. "The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000". Col. Res. Appl. 2001; 26(5): 340-350

- Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I. "Evaluation of Whiteness Formulae for Teeth" AIC Colour 05- 10th Congress of the International Colour Association. 2005: 839-842.
- Luo W, Westland S "Testing the performance of a modified whiteness formula for dentistry" 13th Color Imaging Conference Final Program and Proceeding. 2005: 59-62.
- Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I, Cheung V "Development of a whiteness index for dentistry" Journal of Dentistry. 2009; 37s: e21-e26.
- Martin de las Heras S, Valenzuela A, Bellini R, Salas C, Rubiño M, Garcia JA. "Objective measurement of dental color for age estimation by spectroradiometry". Forensic Science International. 2003; 132: 57–62.
- Pérez MM, Saleh A, Yebra A, Pulgar R. "Study of the variation between CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 color-differences of resin composites". Dent. Mater. 2007; 26(1): 21-28.
- Santana, J "Blanqueamiento dental: estudio clínico para el desarrollo de métodos estadísticos e inteligentes para la predicción del cambio cromático". (Tesis Doctoral). Granada: Departamento de Estomatología. Universidad de Granada. 2010.
- Van Der Burgt TO, Ten Bosch JJ, Borsboom PCF, Kortsmit WJPM "A comparison of new and conventional method for quantification of tooth color" Journal of Prosthetic Dentistry, 1990; 63: 155-162.
- Uchida H "A study on the CIE whiteness formula". J. Col Sci. Asso. Jpn. 1990; 14: 106–113.

- Uchida H. "Whiteness formula dealing with tint and purity" J. Color Sci. Asso. Jpn. 1994; 17: 226–233.
- Uchida H. "A new whiteness formula" Color Res. Appl. 1998; 23: 202–209.
- Xu X, Zhy L, Tang Y, Wang Y, Zhang K, Li S, et al. "Randomized clinical trial comparing whitening strips, paint-on gel and negative control" American Journal of Dentistry. 2007; 20: 28A–31A.

CAPÍTULO II

2.- MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En la actualidad, el desarrollo de índices de blancura adaptados a la región del espacio cromático en la que se encuentran los dientes y materiales dentales es una realidad que despierta gran interés clínico e industrial y en la que concentran sus esfuerzos una parte importante de la comunidad científica. En este contexto, profundizar en el estudio de las características colorimétricas de estos tipos de materiales es una línea de investigación de especial relevancia.

Con la presente tesis se pretende contribuir al avance del conocimiento del campo de la estética dental y en el desarrollo de nuevos índices de blancura basados en el espacio de color CIELAB aplicados a dicho campo, así como su aplicación tanto en la práctica clínica como en el ámbito industrial.

En odontología, la posibilidad de medir y especificar el índice de blancura en ciertos procesos, como el blanqueamiento, siguiendo los criterios y estándares más rigurosos y de recién implantación, es sin duda de gran utilidad, pero esta utilidad sería considerablemente mayor siempre que dicho índice de blancura y la percepción visual de los observadores estuviera fuertemente correlacionadas.

Por ello, en la presente Tesis Doctoral nos planteamos los siguientes objetivos:

Objetivo general

Desarrollar nuevos índice de blancura para dientes y materiales odontológicos, incluyendo una formulación específica al espacio de color CIELAB, que esté correlacionado con la percepción visual.

Objetivos específicos

1.- Establecer un marco de trabajo para una óptima correlación entre medidas instrumentales colorimétricas (mediante instrumental adecuado) y valoraciones subjetivas obtenidas mediante una experiencia psicofísica para un grupo de observadores, para el diseño y validación óptimos de índices de blancura.

2.- Proponer formulaciones lo suficientemente flexibles y potentes para la obtención de índices de blancura de aplicación en el ámbito de la odontología, basándonos en los índices ya existentes en la literatura, y en el espacio CIELAB y sus fórmulas de diferencia de color asociadas.

3.- Optimizar y proponer nuevos índices de blancura para materiales dentales.

4.- Analizar y validar el rendimiento de los índices de blancura obtenidos, junto con un conjunto completo de índices de blancura extraídos de la literatura, por medio de la obtención del coeficiente de determinación R^2 y el “% de decisiones incorrectas” %DI en los conjuntos de datos colorimétricos y psicofísicos disponibles.

CAPÍTULO III

3.- MATERIAL Y MÉTODO

En este capítulo se describe, en primer lugar, el material odontológico empleado, el dispositivo de medida de coordenadas cromáticas para las muestras consideradas, las condiciones experimentales para su registro y el panel de observadores que han participado en la experiencia psicofísica diseñada.

En segundo lugar, se describe detalladamente la metodología seguida para el desarrollo del estudio, así como también los procedimientos matemáticos que han sido aplicados para la obtención de los índices propuestos en esta tesis.

3.1.- MUESTRAS

3.1.1. Guías Dentales.

El material odontológico empleado en este estudio consiste en dos guías de color dentales, herramienta que se utiliza usualmente en la práctica clínica para la medición subjetiva del color, además de un conjunto de 25 muestras de resinas de composites dentales manufacturadas por mezcla de diferentes colores en nuestro laboratorio. A continuación se describen cada uno de ellos:

- **Guía Vitapan Classical[®]**: Consta de un total de 16 tablillas de espesor entre 4 y 5 mm, divididas en cuatro grupos de tonalidades: A (marrón), B

(amarillo), C (gris) y D (rojizo). Para cada uno de los grupos de tono hay varios niveles de croma. Por ejemplo para el tono A hay A1, A2, A3, A3,5 y A4, siendo A1 menos saturado que A4 disminuyendo, además, la luminosidad con el número, es decir, A4 menos luminoso que A1. Esta guía, por tanto, consta de las siguientes tablillas: A1, A2, A3, A3.5, A4, B1, B2, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D2, D3 y D4. La figura 3.1 muestra una imagen de la guía dental Vitapan Classical[®] con sus 16 tablillas ordenadas por tonalidad y nivel de croma.



Figura 3.1: Guía Vitapan Classical[®].

- **Guía Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached[®]:** Esta guía dental contiene 26 tablillas que están divididas en 5 grupos de acuerdo con su luminosidad. Dentro de cada grupo, las tablillas se ordenan según el croma creciente (vertical hacia abajo, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3) y según el tono o matiz (horizontalmente, amarillento (L), medio (M) y rojizo (R)). En esta guía hay una mayor distribución sistemática en el espacio cromático que ocupan los dientes naturales frente a la guía Vita Classical[®]. Por tanto en cada tablilla se aprecia la siguiente nomenclatura:

- Un número en la parte superior que nos indica el grupo de valor en luminosidad al que pertenece la tablilla, del 1 al 5, en orden decreciente.
- Una letra que indica el tono; medio (M), amarillento (L) y rojo (R).
- Un número detrás de la letra que indica el croma (1, 1.5, 2, 2.5 3) en orden creciente.

Esta guía, además, incorpora tres colores de blanqueamiento, el 0M1, 0M2, 0M3; el 0 indica alta luminosidad, el 1, 2 y 3 el nivel de croma y la M el tono, que corresponde al medio. En la figura 3.2 se muestra la guía dental Vitapan 3D Master[®] donde se puede observar la distribución de las tablillas en la guía atendiendo a su tono luminosidad y croma. A la izquierda de la carcasa soporte se pueden distinguir las tres tablillas correspondientes a la guía de colores Vita Bleached[®], para blanqueamiento.



Figura 3.2: Guía dental Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached

3.1.2 Resinas de composites dentales

3.1.2.1 Estudio sobre tolerancia para la selección de resinas de composites

Para la elección de las muestras a utilizar se realizó un estudio previo a fin de establecer la tolerancia del observador en cuanto a diferencias de color entre muestras de resinas de composite dental (Guinea et al, 2010).

Para ello sobre un panel de 13 observadores, 7 mujeres y 6 hombres, de edades comprendidas entre 20 y 48 años, se realizaron juicios de perceptibilidad y de aceptabilidad, en observaciones independientes, sobre un conjunto de 105 pares de discos de cerámica dental (14 mm de diámetro y 3

mm de espesor). Las diferencias de color de los pares de discos se calcularon utilizando dos fórmulas de diferencia de color: CIEDE2000 (ΔE_{00}) y CIELAB (ΔE^*_{ab}). La figura 3.3 muestra la distribución de las diferencias de color CIEDE2000 entre pares de discos de cerámica, las cuales presentan un ΔE_{00} con rango entre 0,10 y 9,91.

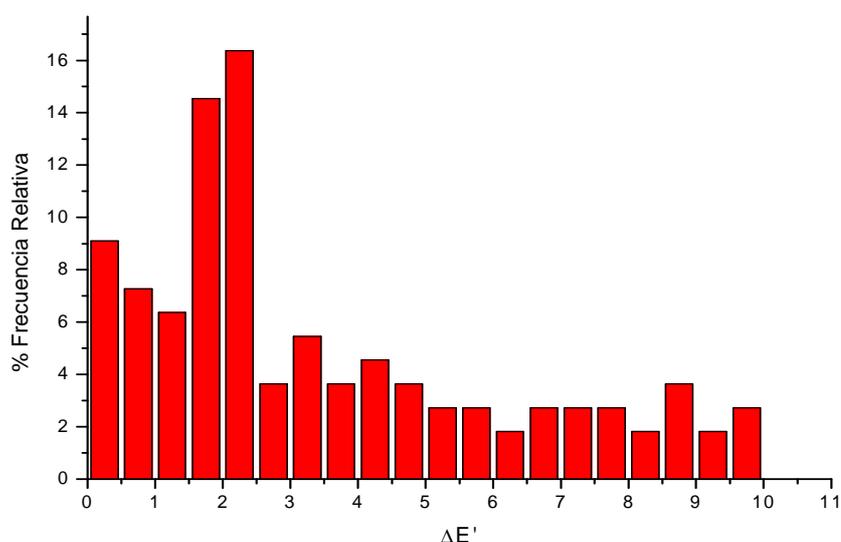


Figura 3.3: Distribución relativa de las diferencias de color CIEDE2000 entre pares de cerámica.

Se utilizaron dos procedimientos de ajuste: curva en forma de S y aproximación TSK Fuzzy. Para ambos procedimientos, y a partir de las curvas resultantes del ajuste, se estimaron los intervalos de confianza del 95% y se calcularon los umbrales 50:50% (50% de respuestas positivas y 50% de respuestas negativas).

Para el umbral de aceptabilidad 50:50% y con el procedimiento de ajuste de curvas en forma de S se obtuvo que $\Delta E_{00} = 2.25$ ($r^2 = 0.88$) y $\Delta E^*_{ab} = 3.46$ ($r^2 = 0.85$). Los valores correspondientes para el procedimiento con aproximación TSK Fuzzy fueron $\Delta E_{00} = 2.23$ ($r^2 = 0.89$) y $\Delta E^*_{ab} = 3.48$ ($r^2 =$

0,86). La figura 3.4 muestra los resultados obtenidos del ajuste por los dos procedimientos.

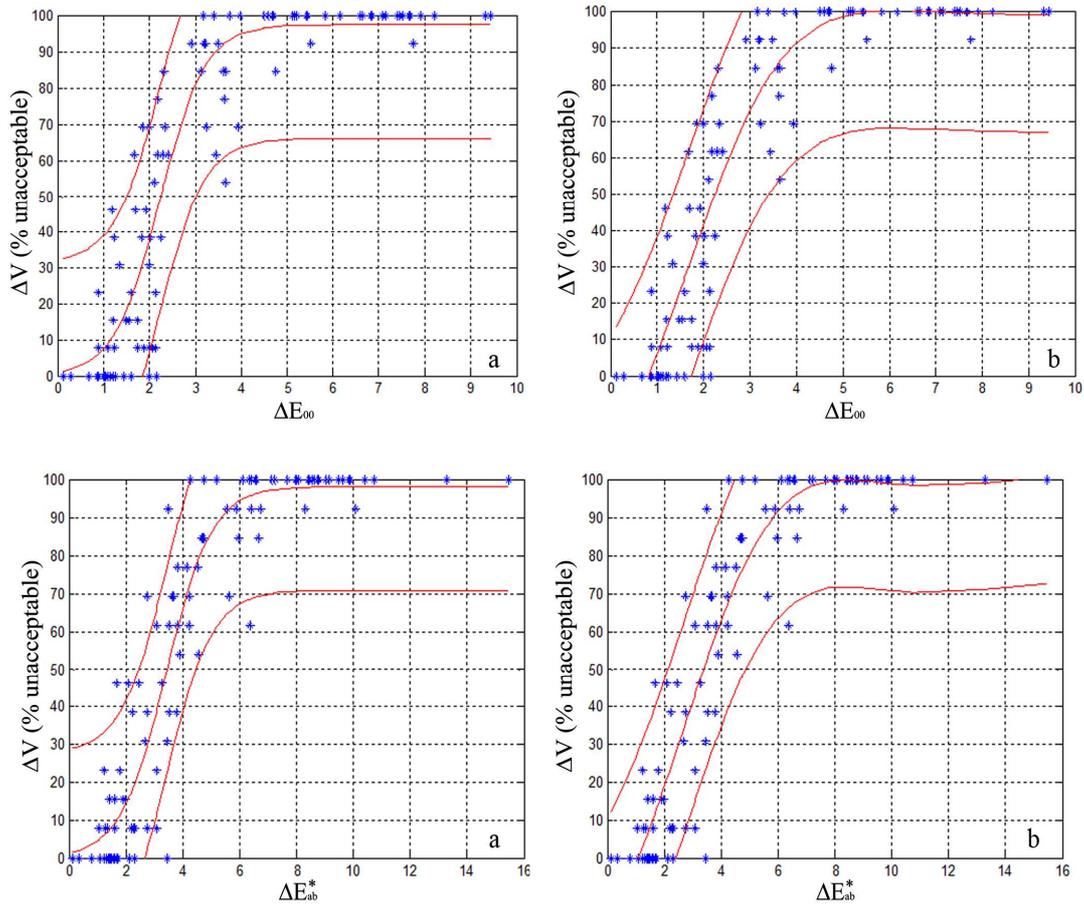


Figura 3.4: Diferencias de color asociadas de umbrales de aceptabilidad 50:50%; (a) ajuste por curvas en forma de S y (b) por TSK fuzzy.

Los valores obtenidos de diferencias de color asociada de los umbrales de perceptibilidad para las curvas en forma de S ajustadas fueron $\Delta E_{00} = 1.30$ ($r^2 = 0.74$) y el $\Delta E^*_{ab} = 1.80$ ($r^2 = 0.70$) y para la aproximación con TSK fuzzy $\Delta E_{00} = 1.25$ ($r^2 = 0.75$) y $\Delta E^*_{ab} = 1.74$ ($r^2 = 0.71$). La figura 3.5 muestra los resultados de los ajustes para ambos procedimientos.

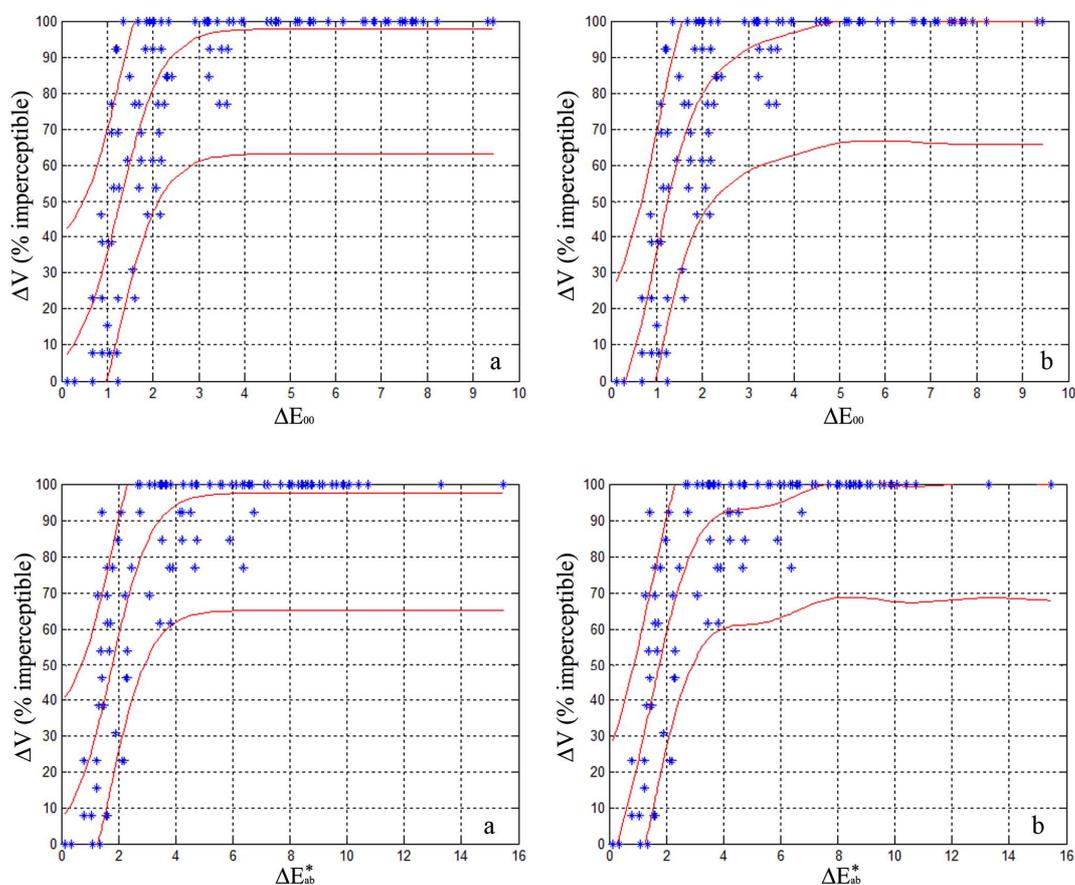


Figura 3.5: Diferencias de color asociada de los umbrales de perceptibilidad; (a) ajuste por curvas en forma de S y (b) por TSK fuzzy.

Los valores de $\Delta L'$, $\Delta C'$, $\Delta H'$ correspondientes al umbral de aceptabilidad 50% fueron $\Delta L' = 2.44$, $\Delta C' = 3.15$ y $\Delta H' = 3.24$, respectivamente.

Se comprobó que la fórmula de diferencia de color CIEDE2000 proporcionaba un mejor ajuste que la fórmula CIELAB en la evaluación de los umbrales de diferencia de color de cerámicas dentales. También había una diferencia estadísticamente significativa entre los umbrales de perceptibilidad y de aceptabilidad para cerámicas dentales. La aproximación TSK Fuzzy demostró ser una alternativa fiable de enfoque para el procedimiento de cálculo del umbral de color.

3.1.2.2 Resinas de composites dentales de manufacturación propia seleccionadas:

A partir de los resultados de este estudio se generaron y eligieron las diferentes muestras de resina de composite utilizadas en este trabajo. Así las muestras fueron formuladas como mezcla de matriz orgánica, relleno inorgánico, fotoactivador y otros componentes en menores cantidades como acelerador, inhibidor, agente fluorescente y cuatro tipos de pigmentos (en diversas mezclas), de acuerdo con la literatura y normas disponibles, y siguiendo los procedimientos estándar de fabricación (Guinea, 2013).

En la tabla 3.1 se enumeran los nombres químicos de los componentes utilizados para formular las muestras de resinas de composite, así como sus correspondientes fabricantes.

Componentes	Nombre Químico	CAS	Lote	Fabricante	
Matriz Orgánica	BisGMA	Bisfenol A Glicerolato dimetacrilato	1565-94-2	MKBJ3076V	SIGMA-ALDRICH Química S.L. Madrid, España
	TEGDMA	Trietilenglicol dimetacrilato	109-16-0	STBC5193V	
	UDMA	Diuretano Dimetacrilato	72869-86-4	MKBH6234V	
Relleno inorgánico	SiO ₂ esfera de vidrio (Φ:9-13μm)	65997-17-3	MKBC8823V		
Agente de acoplamiento	3-(Trimetoxisilil)propil metacrilato	2530-85-0	SLBC0787V		
Fotoactivador	Canforquinona	10373-78-1	S12442V		
Acelerador	2-(Dimetilamino)etil metacrilato	2867-47-2	BCBF8391V		
Inhibidor	Hidroxitolueno butilado	128-37-0	MKBH3026V		
Agente Fluorescente	1.4-Bis(2-benzoxazolil)naftaleno	5089-22-5	XGVZG-CL	CYMIT Química S.L. Madrid, España	
Pigmento	Pigmento 1 (P1)	FeO-OH			Lab. Química Inorgánica UGR, España
	Pigmento 2 (P2)	FeO			
	Pigmento 3 (P3)	TiO ₂	13463-67-7	SZB890340V	SIGMA-ALDRICH Química S.L. Madrid, España
	Pigmento 4 (P4)	Fe ₂ O ₃	1309-37-1	10012LEV	

Tabla 3.1: Componentes químicos y sus correspondientes fabricantes utilizados para la formulación de las muestras de resinas de composite dental utilizado en este estudio.

En total se generaron 25 muestras de resina de composite por mezcla de diferentes pigmentos mediante variación de la cantidad relativa de cada uno de los cuatro pigmentos, de acuerdo a proporciones específicas y procurando cubrir el espacio cromático dental.

Debido a que el espesor es una de las variables a considerar cuando se realizan mediciones de color en composites dentales (Vichi A. et al, 2007), se utilizaron portaobjetos de vidrio con un espesor de 1mm que permitieran preparar muestras del material con idéntico espesor, en concreto el espesor determinado por el portaobjetos.

A los portaobjetos se realizaron perforaciones con una fresa de diamante tungsteno hasta alcanzar una dimensión de 8x8mm, a fin de simular las tablillas de las guías. Una vez hecho esto se unió este portaobjetos perforado a uno sin perforar con el fin de obtener un pocillo donde posteriormente se insertaría el material. Para la condensación de los composites dentales se utilizó una espátula adecuada para este fin.

La preparación y manipulación de resinas de composites se realizaron en oscuridad para evitar la polimerización por efecto de la luz ambiental de los composites y evitar también luces parasitarias que pudieran afectar la medida.

Con una espátula se mezcló el material y se condensó en el pocillo del portaobjetos correspondiente. Tras rellenar el pocillo se colocaba otro portaobjeto y mediante presión se eliminaba el material sobrante. La técnica descrita asegura un acabado superficial de material homogéneo y que no interfiere con los resultados de la medida (Pérez M.M. et al, 2010).

Para la polimerización de las muestras se utilizó una lámpara LED (Bluesphase, Ivoclar-Vivadent). Su potencia es de 8W y la irradiancia, según el fabricante, es de $1100\text{mw}/\text{cm}^2 \pm 10\%$.

Con el fin de simular una situación clínica y antes del almacenamiento, todas las muestras fueron pulidas usando un sistema de micro-pulido con diamante de un solo paso (Pogo, Dentsply, USA), mediante la aplicación de luz a presión intermitente y velocidad moderada durante 40s, para crear un acabado altamente satinado, como el cristal, y de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Como resultado se obtuvieron un conjunto de 25 muestras de resinas de composite que se muestran en la figura 3.6.

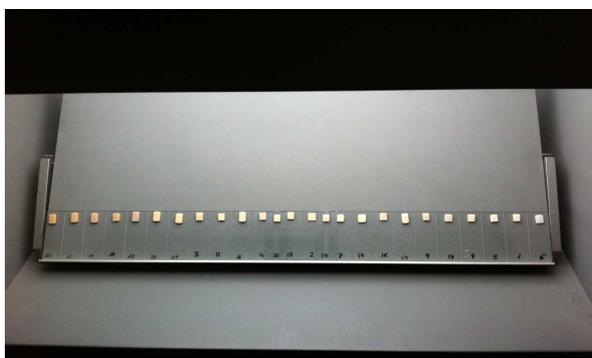


Figura 3.6: *Muestras de resinas de composites dentales.*

3.2. DISPOSITIVO Y MEDIDA DE COLOR.

Para la realización de las medidas experimentales de este trabajo se utilizaron los dispositivos de medida, el instrumental, material e instalaciones del Laboratorio de Óptica de Biomateriales (<http://www.ugr.es/local/labioptic>) del Departamento de Óptica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada.

3.2.1. Espectrorradiómetro.

Para registrar de forma objetiva las coordenadas cromáticas de las guías dentales y resinas de composite utilizamos un espectrorradiómetro (SpectraScan PR-704[®], PhotoResearch, USA) con su correspondiente software. Este instrumento consta de un cabezal óptico con un espejo de apertura tipo Pritchard que dirige la radiación óptica incidente hacia una red de difracción o hacia el ocular. A continuación de la red de difracción se halla una matriz lineal de fotodiodos detectores que tiene 256 pixels, enfriados termoeléctricamente a 0°C en la cámara, sellada para eliminar virtualmente la contaminación por el polvo y las fluctuaciones de temperatura, estando, además, presurizada con nitrógeno para prevenir la condensación. La figura 3.7 muestra el espectrorradiómetro utilizado así como un esquema de sus elementos.

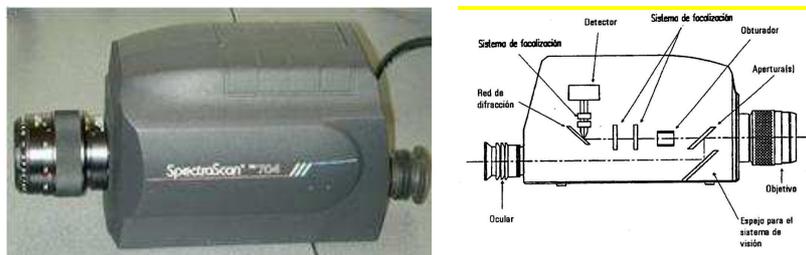


Figura 3.7: Esquema de los elementos de espectrorradiómetro PR-704/PC

Teniendo en cuenta que el rango espectral de este instrumento es de 380-780nm, cada píxel mide en incrementos de 1,6nm aunque los resultados se expresan en incrementos de 2nm por conveniencia. Antes de realizar una medida cada detector se carga eléctricamente disminuyendo dicha carga al incidir la radiación sobre el detector y generándose una señal analógica que se transmite a la tarjeta controladora instalada en el ordenador. Un convertidor analógico digital de 12 bits transforma la señal analógica a su equivalente digital proporcionando datos que permiten realizar la medida deseada.

En lo referente al software se dispuso del programa SpectraView 2.10 (SpectraView, PhotoResearch, USA) que incluye, entre otras, las siguientes opciones:

- Cálculo de Luminancia, Iluminancia, Radiancia, Irradiancia y Temperatura de color.
- Valores triestímulos X, Y, Z, coordenadas de cromaticidad en los sistemas CIE 1931, CIE 1960, CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) y CIE 1976 (L^* , u^* , v^*), longitud de onda dominante y pureza colorimétrica.

En cuanto al error asociado a las medidas, el fabricante indica que, en el caso de medidas fotométricas absolutas, es menor de 4.1% y si son relativas, del 1 al 2%. En cuanto al error asociado para coordenadas de cromaticidad (x , y) se indica un ± 0.003 .

Al medir el color, para calcular las coordenadas en el sistema CIELAB, el blanco de referencia ha de medirse bajo las mismas condiciones que la muestra correspondiente. En nuestro caso el blanco de referencia utilizado es el proporcionado por el fabricante. Se trata de una superficie normal de sulfato de bario presurizado de 50x50mm situada en una caja con cierre para evitar todo contacto con la luz o de otros agentes exteriores y garantizar una buena conservación. Las medidas espectralradiométricas de este blanco de referencia proporcionan información sobre la fuente de luz utilizada.

3.2.2. Cabina de iluminación.

Para la medida del color de cada una de las muestras objeto de estudio así como para la realización de los juicios visuales, se utilizó una cabina estandarizada de observación/iluminación VeriVide CAC60 (VeriVide Ltd., United Kingdom), con el objeto de iluminar las muestras en condiciones estandarizadas y que se muestra en la figura 3.8.



Figura 3.8: *Cabina de Observación/Iluminación.*

Esta cabina dispone de cuatro fuentes luminosas: D65, F, TL85, UVB. En este estudio sólo utilizaremos la fuente D65 que es una lámpara fluorescente de espectro visible cercano al de luz día. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) recomienda esta fuente de luz ya que entra en las tolerancias fijadas por el British Standard BS 950.Par1 (CIE, 2004). La figura 3.9 muestra la radiancia espectral correspondiente a esta fuente, medida en el centro de la cabina CAC60 con el espectrorradiómetro SpectraScan PR 704.

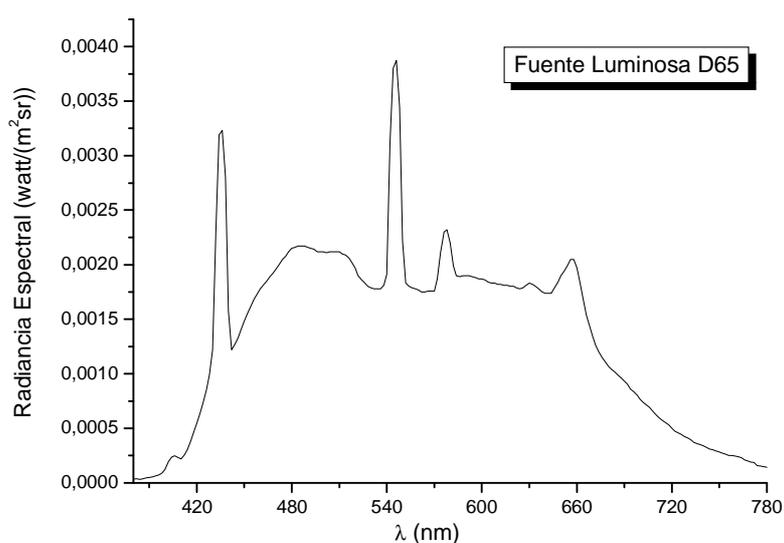


Figura 3.9 *Radiancia espectral de la lámpara D65*

3.2.3. Medida del color.

En la medida del color es bien conocido que las condiciones experimentales de medida influyen de forma significativa. Así para la realización de nuestro estudio hemos empleado, como se ha señalado anteriormente, una fuente simuladora del iluminante D65 de 6500° K. La geometría de iluminación/medida fue CIE d/0° y el Observador Patrón CIE 1964, 10°. Empleamos este iluminante y geometría por ser uno de los recomendados por la CIE (CIE, 2004). Esta configuración y fuente iluminadora fueron las empleadas tanto para las medidas de las resinas de composites de manufacturación propia como para la medida de las tablillas de las guías dentales empleadas en este estudio.

A fin de evitar la reflexión especular de la superficie brillante tanto de las muestras como de las tablillas y así obtener la geometría anteriormente descrita en la medida éstas se situaron con una inclinación de 45° sobre un atril accesorio de fondo gris como la propia cabina. El atril se situó en todo momento en la parte central de la cabina de iluminación para evitar posibles cambios de iluminación en los diferentes puntos de la cabina (Huertas R. y cols., 2002). Una vez situada la muestra sobre el atril se colocó el espectrorradiómetro frente a la muestra y se realizaba la medida del color en el centro de ésta. La figura 3.10 muestra el esquema de la posición tanto del dispositivo de medida como del atril dentro de la cabina durante la realización de las medidas colorimétricas.

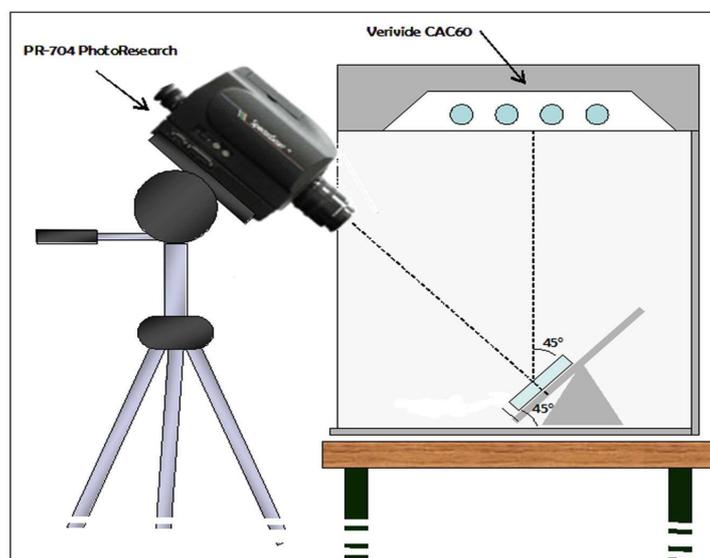


Figura 3.10: Geometría de medida

Cabe resaltar que para mantener las condiciones de medida descritas para cada muestra y tablilla el atril se fijó a la cabina de iluminación así como la posición del espectrorradiómetro respecto a la cabina.

En total fueron objeto de estudio un conjunto de 45 tablillas y 25 muestras de resinas de composites de manufacturación propia. Cada muestra y tablilla fue medida tres veces y para evitar la variabilidad del estudio todas ellas fueron realizadas por el mismo operador.

Para los datos colorimétricos primeramente se calcularon, a partir de los valores triestímulo X, Y, Z, las coordenadas cromáticas x,y y los valores L*, a* y b* en CIELAB. Una característica importante de CIELAB es la posibilidad que ofrece de realizar una especificación del color en coordenadas L*, croma C* y ángulo de tono h⁰, muy bien correlacionadas con los atributos cromáticos de la percepción visual.

En el campo odontológico, la gama de colores y la distribución de color en distintas regiones del diente han sido descritos por un gran número de investigadores (Joiner, 2004). Existen estudios que tratan de establecer un espacio cromático de referencia en odontología, a menudo considerado como el "espacio de color dental", en el espacio de color CIELAB (Rubiño et al, 1994; Zhao et al, 1998; Hasegawa et al, 2000). El espacio de color dental tiene que incluir el color natural de todas las estructuras dentales así como el color de todos los materiales de restauración diseñados para sustituirlos (Odioso et al, 2000).

En el año 2004 Beltzer estableció que los valores promedio de las coordenadas cromáticas $L^*a^*b^*$ en el espacio de color dental para el sistema CIELAB, son los siguientes: $L^* = 62-78$; $a^* = 1-6$; $b^* = 12-31$ (Baltzer, 2004) y como se muestra en la figura 3.11:

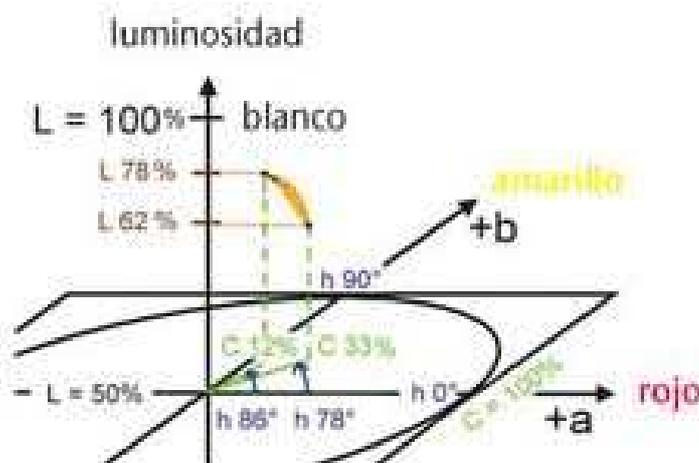


Figura 3.11: *Espacio dental CIELAB*

Gozalo-Díaz y colaboradores midieron el color de varias estructuras craneofaciales (central, incisivo lateral y canino, encía, labios y piel de la cara) de 120 sujetos con un espectroradiómetro y fuente de luz externa configurada con geometría 45°/0°. De acuerdo a los resultados, las coordenadas de color

del central e incisivo lateral y canino osciló entre $L^* = 38-89.5$, $a^* = 0.3-12.2$ y $b^* = 5.7 - 35.7$ (Gozalo-Díaz et al., 2007).

Pues bien, las coordenadas en el espacio CIE 1931 (x,y) y las coordenadas en el sistema CIE 1976 (L^*,a^*,b^*) obtenidas para cada una de las guías dentales y muestras de resinas de composite de manufacturación propia, a partir de los valores triestímulo X,Y,Z de las medidas colorimétricas realizadas, se muestran en la tablas 3.2 y 3.3, respectivamente:

Vitapan 3D Master®	x	y	Muestras	x	y	Vitapan Classical®	x	y
OM1	0,335	0,356	1	0,328	0,357	A1	0,356	0,379
OM2	0,337	0,360	2	0,347	0,371	A2	0,365	0,384
OM3	0,341	0,363	3	0,345	0,370	A3	0,378	0,393
1M1	0,348	0,367	4	0,350	0,372	A3,5	0,386	0,399
2M1	0,352	0,373	5	0,347	0,372	A4	0,389	0,398
1M2	0,360	0,382	6	0,362	0,383	B1	0,349	0,375
2L 1,5	0,359	0,381	7	0,363	0,384	B2	0,363	0,386
2R 1,5	0,360	0,378	8	0,361	0,379	B3	0,381	0,398
2M2	0,362	0,382	9	0,358	0,380	B4	0,397	0,394
3M1	0,360	0,377	10	0,358	0,379	C1	0,356	0,378
3L 1,5	0,366	0,384	11	0,368	0,381	C2	0,374	0,386
2M3	0,375	0,394	12	0,373	0,389	C3	0,371	0,390
3R 1,5	0,368	0,381	13	0,377	0,392	C4	0,384	0,392
4M1	0,365	0,379	14	0,370	0,389	D2	0,359	0,379
2R 2,5	0,373	0,390	15	0,369	0,389	D3	0,370	0,387
2L 2,5	0,375	0,396	16	0,375	0,389	D4	0,372	0,394
3M2	0,374	0,389	17	0,385	0,394			
4L 1,5	0,376	0,389	18	0,371	0,383			
4R 1,5	0,376	0,385	19	0,376	0,383			
3L 2,5	0,382	0,397	20	0,381	0,390			
3R 2,5	0,383	0,395	21	0,387	0,390			
3M3	0,383	0,398	22	0,399	0,400			
5M1	0,379	0,385	23	0,365	0,376			
4M2	0,384	0,393	24	0,360	0,379			
4R 2,5	0,393	0,398	25	0,376	0,388			
4M3	0,397	0,403						
4L 2,5	0,398	0,405						
5M2	0,397	0,398						
5M3	0,415	0,411						

Tabla 3.2: Coordenadas cromáticas x,y para los tres conjuntos de muestras

Vita 3D Master	L*	a*	b*	Muestras	L*	a*	b*	Vitapan Classical	L*	a*	b*
OM1	71,97	0,07	5,42	1	73,05	-2,31	4,00	A1	61,38	0,29	13,53
OM2	73,88	-0,12	6,98	2	76,56	-0,10	11,73	A2	66,39	1,56	17,40
OM3	70,79	-0,14	8,22	3	79,38	-0,56	11,00	A3	64,65	2,82	21,53
1M1	71,62	1,20	10,47	4	74,42	0,83	12,14	A3,5	64,01	3,72	24,26
2M1	67,63	0,76	12,40	5	69,44	-0,42	10,82	A4	57,98	4,33	22,87
1M2	69,12	0,42	16,50	6	76,08	1,50	17,88	B1	68,57	-1,06	12,62
2L 1,5	67,28	0,42	15,84	7	74,30	1,61	17,92	B2	67,06	0,27	17,75
2R 1,5	65,92	1,73	14,77	8	71,37	2,41	15,46	B3	62,74	2,19	22,89
2M2	67,01	1,10	16,66	9	67,43	0,70	14,69	B4	61,67	7,88	24,31
3M1	62,57	2,11	13,94	10	66,17	1,06	14,15	C1	63,72	0,67	13,64
3L 1,5	63,67	1,61	16,92	11	68,88	3,82	16,99	C2	60,61	3,50	17,80
2M3	71,43	1,62	23,04	12	72,78	3,17	21,03	C3	60,91	1,56	18,52
3R 1,5	63,38	2,93	16,30	13	72,39	3,29	22,50	C4	56,67	4,56	20,04
4M1	59,55	2,97	14,67	14	71,49	2,27	20,08	D2	65,60	1,03	14,73
2R 2,5	66,79	2,16	20,57	15	71,09	1,67	19,60	D3	63,07	2,29	18,05
2L 2,5	67,42	1,00	22,56	16	66,40	3,36	19,75	D4	63,18	0,57	20,52
3M2	62,76	2,55	19,32	17	62,88	5,16	21,98				
4L 1,5	60,25	3,10	19,22	18	73,98	4,30	19,65				
4R 1,5	59,21	4,40	17,74	19	65,61	5,86	18,49				
3L 2,5	63,83	2,65	23,23	20	70,96	5,37	22,80				
3R 2,5	63,15	3,55	22,47	21	66,92	6,93	22,73				
3M3	63,24	2,95	23,48	22	66,30	7,52	27,81				
5M1	54,72	4,87	17,18	23	65,31	4,47	14,81				
4M2	60,63	4,41	21,68	24	75,41	2,09	16,63				
4R 2,5	59,94	5,45	24,29	25	74,82	4,57	22,01				
4M3	60,48	5,10	26,27								
4L 2,5	57,06	4,89	25,69								
5M2	54,75	6,12	23,14								
5M3	51,06	7,12	27,76								

Tabla 3.3: Coordenadas L*a*b* correspondientes a las tres series de muestras

Las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 muestran la representación de las coordenadas en el sistema CIELAB para las guías dentales Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached, Vitapan Classical[®], y muestras de resina de composite de manufacturación propia.

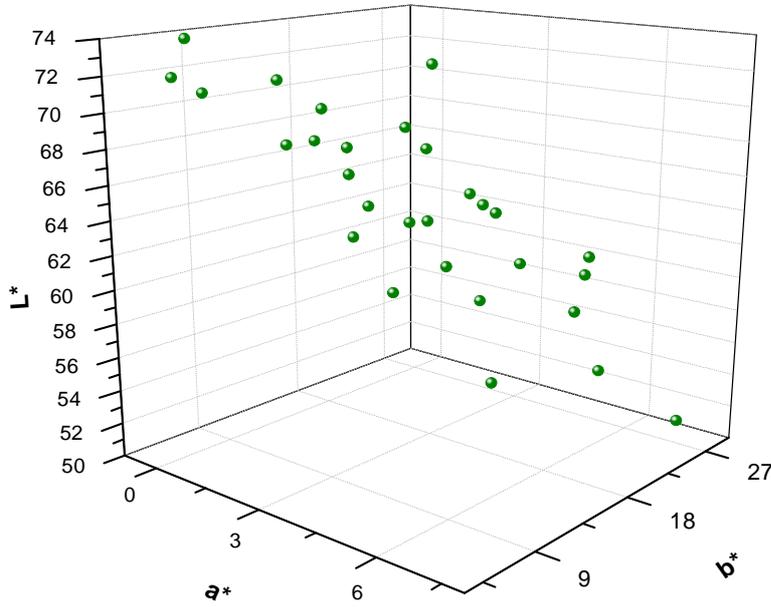


Figura 3.13: *Coordenadas L*a*b* para Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached*

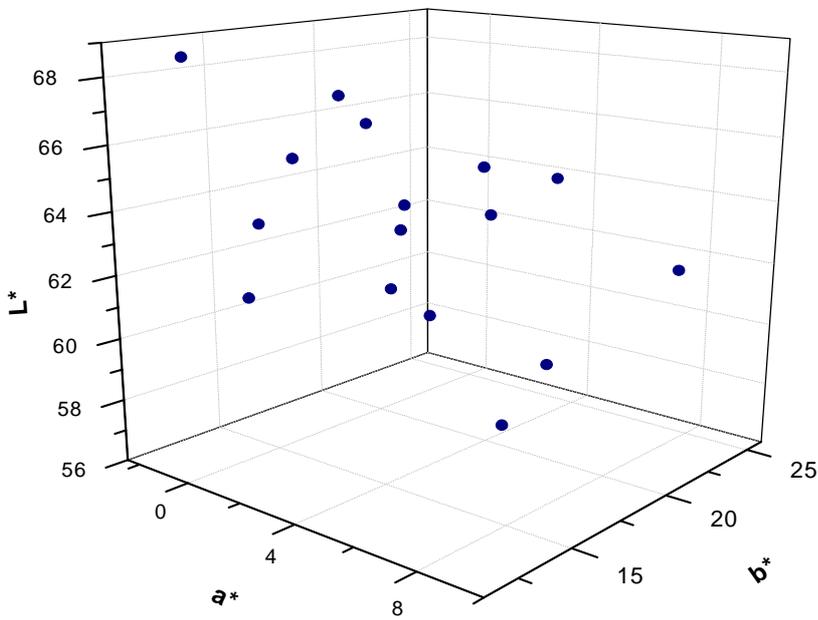


Figura 3.14: *Coordenadas L*a*b* para Vitapan Classical[®]*

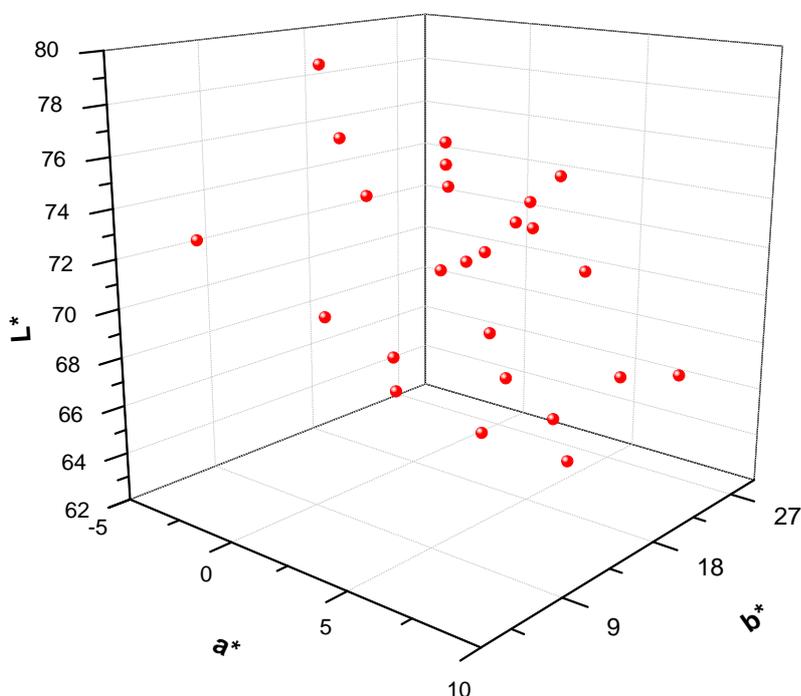


Figura 3.15: Coordenadas $L^*a^*b^*$ para muestras resinas de composite

Así los rangos de las coordenadas $L^*a^*b^*$ obtenidos para cada una de las guías y conjunto de muestras de resina de composite de manufacturación propia fueron los siguientes:

- Vitapan 3D Master[®]: $L^*=54.72-1.97$, $a^*=-0.14-6.12$, $b^*=5.42-26.27$
- Vitapan Classica[®]: $L^*=56.66-68.57$, $a^*=-1.06-7.88$, $b^*=12.62-24.26$
- Resina de composite: $L^*=62.88-79.38$, $a^*=-2.31-7.52$, $b^*=4.00-27.81$.

Como se puede apreciar los resultados obtenidos, tanto para las guías dentales utilizadas como para el conjunto de muestras manufacturadas, se encuentran dentro del espacio cromático dental, tal y como se puede observar en la figura 3.11 mostrada anteriormente.

3.3. EXPERIMENTO PSICOFÍSICO.

3.3.1. Panel de Observadores.

Previa información de las condiciones de las experiencias a realizar, se llevó a cabo la selección de observadores entre los voluntarios que deseaban participar. El criterio de inclusión se basó en presentar visión normal del color para lo cual se les realizaron los tests de Ishihara y Farnsworth D-15 y pruebas con el anomaloscopio de Pickford-Nicolson para detectar posibles anomalías en la visión del color.

Previamente a la realización de los juicios visuales, se realizaron tres sesiones de entrenamiento en dichos juicios. Un panel de observadores fue seleccionado para cada una de las tres experiencias diseñadas:

- **Primera experiencia:** panel formado por 16 observadores, 10 mujeres y 6 hombres, con edades comprendidas entre 20 y 55 años. En este panel el 100% de los observadores poseían experiencia o en el campo de la visión del color o en el campo de los materiales odontológicos, el 55% de ellos en ambos.

- **Segunda experiencia:** panel ampliado a un total de 50 observadores, incluyendo a los 16 observadores que realizaron la primera experiencia. Dicho panel quedó compuesto por 20 mujeres y 30 hombres, con edades comprendidas entre 20 y 60 años. En este caso, más del 75% de ellos poseían experiencia o bien en el campo de la visión del color o bien el campo de los materiales odontológicos, el 20% lo era en ambos.

- **Tercera experiencia:** un panel compuesto por 31 observadores, 21 mujeres y 10 hombres con edades comprendidas entre 20 y 55 años. En esta experiencia el panel estaba compuesto al 100% por observadores inexpertos

con una cierta vinculación al campo de la odontología (estudiantes, personal sanitario, etc).

La pautas a seguir para las dos primeras experiencias consistía, primeramente, en ordenar cada una de las muestras de cada guía y conjunto de resinas de composite de manufacturación propia, de “más blanco a menos blanco”, valorando la blancura en función del croma y la luminancia de cada muestra en cuestión y no sobre el tono. Una vez ordenadas la segunda operación era dar una estimación del grado de diferencia en blancura de 0 a 4, para cada par consecutivo de muestras, una vez ordenadas, y siendo el 0 exactamente iguales de blancos y el 4 absolutamente diferentes en blancura.

Para la tercera experiencia la misión fue única y exclusivamente dar una ordenación en blancura de la guía dental Vitapan Classical[®] siguiendo los mismos criterios que en las dos experiencias anteriores.

3.3.2. Experiencias psicofísicas.

El experimento psicofísico se estructuró en tres experiencias, la primera y segunda bajo condiciones de iluminación de laboratorio y una tercera bajo condiciones de iluminación típicamente clínicas.

Para los juicios visuales en esta primera experiencia se utilizó la guía dental Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached. Cada uno de los 16 observadores que componían este panel debía fijar su atención en el centro de cada una de las tablillas y realizar una ordenación de las mismas de “más blanco a menos blanco”. Una vez ordenadas dar una estimación del grado de diferencia en blancura entre pares consecutivos tal y como se les indicó en las sesiones de entrenamiento.

Una vez terminados los juicios visuales correspondientes a la guía Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached se realizó una segunda experiencia usando para ello la guía Vitapan Classical[®] y el conjunto de muestras de resinas de composite de manufacturación propia.

Hay que destacar que la guía Vitapan Classical[®] no cubre todo el espacio cromático dental, es decir, no representa todos los posibles colores de los dientes naturales humanos ya que las variaciones de sus tablillas no están sistemáticamente distribuidas en el espacio cromático que ocupan los dientes naturales. A pesar de estas deficiencias aún es ampliamente utilizada en clínica.

Cada uno de los 50 observadores del panel tenían como misión, primeramente, la ordenación de las tablillas de la guía dental Vitapan Classical[®] por orden decreciente en blancura y posterior estimación del grado de diferencia en blancura entre pares consecutivos en escala de 0 a 4.

Una vez finalizados todos los juicios visuales con la guía Vitapan Classical[®] el mismo panel de observadores repitió el experimento pero usando esta vez el conjunto de 25 muestras de resinas de composite de manufacturación propia.

A cada una de las tablillas de cada serie se les ocultó la referencia grabada de fábrica y fueron numeradas al azar de tal modo que el observador las ordenara y figurara en ésta el número de la muestra en cuestión. La razón de esta ocultación fue el no influir en las respuestas de aquellos observadores que ya poseían experiencia en el manejo de las guías dentales utilizadas.

A fin de reproducir las mismas condiciones experimentales que en la medida del color, en el centro de la cabina de observación/iluminación se colocó el atril con una inclinación de 45° para eliminar la reflexión especular y donde los observadores debían ir colocando las tablillas o muestras para su ordenación.

Los juicios visuales se realizaron en la oscuridad y con un periodo de adaptación a ésta de aproximadamente 60 segundo para cada una de las observaciones realizadas. Una vez realizada la adaptación se le informó al sujeto que no había restricción de tiempo y que la observación y juicio se realizaran por comparación del centro de cada una de las muestras a comparar y en el centro de la cabina de iluminación en las mismas condiciones experimentales en las que se realizaron las medidas de color.

En la tercera y última experiencia el panel de observadores tenía como misión la ordenación de las tablillas de la guía Vitapan Classical[®] pero esta vez bajo condiciones típicas de clínica.

Se citó, para ello, a cada uno de los 31 observadores de forma individual en la clínica. Bajo la iluminación proporcionada por el equipo dental y con el mismo atril que en las experiencias anteriores, inclinado igualmente 45° para eliminar la reflexión especular, los observadores debían ir colocando las tablillas para su ordenación de “más blanco a menos blanco”. Para la ordenación se les recomendó concentrar su atención únicamente en el centro de la tablilla e indicándoles que los juicios se realizarían sin ningún tipo de limitación de tiempo.

Al igual que en las dos experiencias anteriores a las tablillas se les ocultaron las referencias grabadas de fábrica a fin de no interferir en la decisión del observador, en este caso conocedor y manipulador de dicha guía dental.

Para la toma de resultados de los juicios visuales de cada una de las tres experiencias se confeccionó una hoja que constaba de una columna para registrar los resultados del ordenamiento de las muestras de mas blancas a menos blancas. Adicionalmente, y para las dos primeras experiencias, la hoja presentaba una columna para registrar los resultados de la estimación del grado de diferencia en blancura entre pares de muestras consecutivas con una nota aclaratoria, al final, donde se especificaba el valor numérico a dar de 0 al 4 en el grado de diferencia en blancura y donde se especificaba que 0 correspondía a pares exactamente iguales, 1 poco diferentes, 2 diferentes, 3 muy diferentes y 4 absolutamente diferentes en blancura. La misión del observador era sólo dar la respuesta, siendo el operario el que iba apuntando la respuesta a fin de no exponer al observador a cambios de iluminación no deseados.

3.4. FÓRMULAS DE BLANCURA.

Para especificar la percepción de blancura en dientes, y con el objetivo de poder realizar una comparativa amplia sobre el rendimiento de los índices propuestos, se han utilizado en este trabajo siete índices de blancura (WI , $Z\%$, WIC , WIO , $W_{Uchida31}$ y $W_{Uchida64}$, W_{Lab} , W^*), dos índices de amarillez (YID , YIE) y el índice de tinte en el sistema de color $L^*a^*b^*$ (T_{Lab}). La tabla 3.4 muestra la descripción de cada una de ellos.

Formulas	Identificación	Nota
$WIC = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y)$	CIE (CIE, 1986)	Índice de blancura CIE donde x_n e y_n son las coordenadas de cromaticidad del difusor perfecto bajo el iluminante CIE D65.
$WI = 4Z\% - 3 \frac{Y}{Y_n} 100$	ASTM E-313-73 (ASTM, 1993)	Índice de blancura CIE reformulado por la ASTM.
$Z\% = \frac{Z}{Z_n} 100$	ASTM E-313-73 (ASTM, 1993)	Evalúa el avance en el blanqueo y la eficiencia del proceso de blanqueo.
$W_{31} = WIC - 2(T_{W31})^2$ $T_{W31} = 1000(x_n - x) - 650(y_n - y)$	UCHIDA (Uchida, 1998)	T_{W31} es el índice de tinte CIE1931 $40 < WIC_{31} < 5Y_{31} < 275$.
$W_{64} = WIC - 2(T_{W64})^2$ $T_{W64} = 900(x_n - x) - 650(y_n - y)$	UCHIDA (Uchida, 1998)	T_{W64} es el índice de tinte CIE1964 $40 < WIC_{64} < 5Y_{64} < 275$.
$WIO = Y + 1075(x_n - x) + 145.516(y_n - y)$	LUO (Luo y cols, 2005)	Versión modificada de la fórmula de blancura WIC y específica para Odontología.
$W_{Lab} = 2.41L^* - 4.45b^*[1 - 0.0090(L^* - 96)] - 141.4$	GANZ (Ganz y cols, 1995)	Aproximación en el espacio de color $L^*a^*b^*$ de la fórmula de blancura CIE.
$T_{Lab} = -1.58a^* - 0.38b^*$	GANZ (Ganz y col, 1995)	Aproximación en el espacio de color $L^*a^*b^*$ de la fórmula del tinte de la CIE.
$W^* = [(L^* - 100)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$	GERLACH (Gerlach y cols, 2002)	Índice de blancura descrito en base a la distancia de un valor de color a un punto blanco nominal, representado en el espacio de color CIELAB como $L^*=100$, $a^*=0$ y $b^*=0$.
$YID = \left[\frac{100(1.3013X - 1.1498Z)}{Y} \right]$	ASTM D1925 (ASTM, 1993)	Desarrollado para la evaluación del índice de amarilleamiento de plásticos.
$YIE = 100 \left[1 - \frac{0.847Z}{Y} \right]$	ASTM E313 (ASTM, 1993)	Utilizado para la evaluación del índice de blancura y amarillez de materiales casi blancos o materiales opacos.

Tabla 3.4: Índices de blancura seleccionados.

Para la selección de estos índices el primer criterio que se tuvo en cuenta fue la cobertura de las necesidades industriales en cuanto a la cuantificación de la blancura. Así los índices que actualmente y de forma general y habitual se utilizan para la evaluación y predicción de la blancura, según la literatura, son los índices WIC, WI y Z% (Luo et al, 2009; García et al, 1993; Joiner, 2008), índices que han sido propuestos por la CIE o reformulados por la ASTM E-313-73.

Otro factor que se tuvo en cuenta para la elección de fórmulas fue la correlación de éstas con la estimación visual, circunstancia que cumplen las fórmulas de blancura de H. Uchida que, además de tener en cuenta la pureza y el factor tinte presentan buena correlación con la estimación visual. Sin embargo, estos índices se definen a partir de las coordenadas cromáticas de los espacios CIE1931 y CIE1964, de menor repercusión y empleo en la industria hoy en día en comparación con CIELAB.

El uso generalizado en el campo de la Odontología del espacio de color CIELAB ha hecho necesario disponer de fórmulas de diferencia de color e índices de blancura basados en dicho espacio. Por ello, en nuestro estudio, se seleccionaron el índice W_{Lab} , propuesto por Ganz en 1995, y el índice W^* y su correspondiente tinte T_{Lab} propuesto por Gerlach en 2002 como aproximación en $L^*a^*b^*$ de la fórmula WIC, y descrito en base a la distancia euclídea de un color a un punto blanco nominal $L^*=100$, $a^*=0$ y $b^*=0$.

Algunos autores proponen los cambios en amarillez como el factor más importante para la evaluación del diente blanqueado (Joiner, 2004; Lou et al, 2005, Joiner et al, 2008a) por lo que se seleccionaron también los índices de amarilleo YID y YIE que son los más utilizados en el campo de la estética dental.

Consideramos, por tanto, que las fórmulas de blancura seleccionadas como candidatas son suficientes, además de necesarias, para cubrir plenamente tanto el ámbito industrial como la evaluación y predicción de la blancura de materiales como son los biomateriales dentales.

Por otra parte, es posible evaluar los cambios de blancura de algunos materiales utilizados en odontología mediante el cálculo de la diferencia de color. Las fórmulas de diferencia de color se han diseñado para proporcionar

una representación cuantitativa (ΔE) de la diferencia de color percibida (ΔV) entre un par de muestras de colores, bajo unas condiciones experimentales dadas y han sido utilizadas ampliamente en investigación y aplicaciones dentales como en la cuantificación del cambio de color causado por procesamiento de materiales dentales (Rosenstiel et al, 1989) o para describir los errores de cobertura de las guías de color dentales (Bayindir et al, 2007). En la mayoría de los estudios en odontología, el cambio en blancura se cuantifica utilizando la diferencia de color ΔE^*_{ab} asociada al espacio de color CIELAB.

Con objeto de mejorar la corrección entre las diferencias de color calculadas y percibidas se han desarrollado nuevas fórmulas basadas en CIELAB (M. Melgosa et al ,2001), entre otras, y la más reciente fórmula de diferencia de color CIEDE2000 (Luo et al, 2001), así la CIE recomienda actualmente su uso porque utiliza los conceptos de croma y tono, reforzando la importancia de los desarrollos conceptuales de Munsell (CIE, 2004). En la literatura están presentes estudios comparativos del uso tanto de las fórmulas de diferencia de color CIELAB como CIEDE2000 y, aunque algunos investigadores han demostrado deficiencias en la uniformidad del espacio de color CIELAB (Pointer, 1981) actualmente existe en la literatura odontológica estudios sobre la correlación entre los valores de diferencia de color obtenidos con ΔE^*_{ab} y ΔE_{00} (Lee et al, 2005b; Pérez et al, 2007) donde encontraron una correlación significativa entre ΔE^*_{ab} y ΔE_{00} tras la fotopolimerización de las muestras utilizadas ($r^2=0.95$ y $p<0.0001$).

En la fórmula CIEDE2000 se incorporan correcciones específicas para la falta de uniformidad del espacio de color CIELAB por medio de las denominadas funciones de ponderación S_L , S_C y S_H , y un término de rotación que da cuenta de la interacción entre diferencias de croma y matiz en la región azul (R_T).

Realiza una modificación de la coordenada a^* , que afecta principalmente a colores con bajo croma. Para las aplicaciones en el campo de la odontología, esta corrección es muy importante, ya que la mayoría de los materiales dentales presentan bajos valores de croma. Además, incorpora tres factores paramétricos (K_L , K_C y K_H) que tienen en cuenta la influencia de las condiciones experimentales en la evaluación de diferencia de color (Luo et al, 2001).

En un estudio reciente se ha demostrado que la fórmula de diferencia de color CIEDE2000 está mejor correlaciona con la percepción visual que la formula de diferencia de color CIELAB, recomendando su uso en odontología así como para medida del color dental in vivo (Guinea, 2013).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y que ciertos índices de blancura existentes en la actualidad están basados en la fórmula de diferencia de color CIELAB y siendo, sin embargo, la fórmula de diferencia de color CIEDE2000 la recomendada actualmente por la CIE, creemos sería recomendable el estudio de un índice de blancura basado en esta reciente fórmula de diferencia de color.

Una vez determinados los índices de blancura y amarillez seleccionados como candidatos para nuestra comparación se procedió a la obtención de los valores de los diferentes índices seleccionados a partir de las coordenadas cromáticas x e y , y de las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* .

Así los valores de los diferentes índices propuestos para el conjunto de tablillas de la guía dental Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached correspondiente a la primera experiencia se muestran en la tabla 3.5

Vita 3D	WIC	WIO	Z%	WI	W*	Tw₃₁	Tw₆₄
OM1	13,585	29,342	39,109	25,578	28,545	-3,704	-2,541
OM2	8,660	28,896	40,520	22,506	17,894	-4,189	-2,760
OM3	-4,301	20,387	35,349	15,759	20,353	-5,098	-3,355
1M1	-14,714	13,558	34,746	9,6746	20,399	-9,805	-7,361
2M1	-34,276	2,114	28,616	2,030	23,631	-10,478	-7,575
1M2	-54,124	-5,482	27,623	-8,038	23,685	-12,173	-8,499
2L 1,5	-54,875	-7,167	26,062	-6,779	24,741	-11,978	-8,370
2R 1,5	-51,422	-9,275	25,288	-4,514	25,473	-14,979	-11,295
2M2	-59,909	-11,173	25,281	-8,810	25,155	-14,399	-10,469
3M1	-54,046	-13,678	22,431	-3,490	27,753	-16,061	-12,339
3L 1,5	-69,446	-19,156	21,836	-9,845	27,584	-16,633	-12,378
2M3	-82,845	-19,750	26,034	-24,321	24,078	-19,173	-14,026
3R 1,5	-65,871	-20,567	21,904	-8,518	27,742	-19,947	-15,552
4M1	-64,944	-22,843	19,308	-5,659	30,280	-19,808	-15,581
2R 2,5	-82,027	-24,113	22,794	-17,882	26,334	-20,040	-15,039
2L 2,5	-91,946	-25,831	22,294	-22,404	26,371	-18,050	-12,886
3M2	-85,406	-29,492	19,746	-14,905	28,837	-21,285	-16,238
4L 1,5	-91,055	-35,191	17,678	-14,503	30,687	-23,568	-18,266
4R 1,5	-83,982	-35,576	17,534	-11,643	31,291	-26,636	-21,339
3L 2,5	-104,919	-38,278	18,726	-22,897	28,961	-24,106	-18,233
3R 2,5	-102,014	-39,441	18,520	-21,239	29,321	-26,382	-20,445
3M3	-107,885	-40,803	18,103	-23,208	29,444	-25,333	-19,301
5M1	-91,396	-43,365	14,370	-10,502	34,799	-29,386	-23,796
4M2	-103,955	-44,221	16,836	-19,143	31,021	-29,257	-23,130
4R 2,5	-120,484	-55,199	15,164	-23,545	32,122	-34,733	-27,724
4M3	-130,555	-58,826	14,712	-27,120	32,096	-34,944	-27,606
4L 2,5	-137,725	-64,247	12,603	-24,539	34,474	-35,486	-28,005
5M2	-128,279	-64,485	12,068	-19,787	35,924	-38,610	-31,233
5M3	-167,350	-89,044	8,479	-24,057	39,721	-48,492	-39,313

Vita 3D	W _{uchida31}	W _{uchida64}	YID	YIE	W _{Lab}	T _{Lab}
OM1	-13,859	0,669	22,661	26,622	2,726	-2,166
OM2	-26,443	-6,575	25,336	28,722	-0,562	-2,467
OM3	-56,282	-26,820	28,293	30,920	-15,685	-2,901
1M1	-206,995	-123,094	33,818	34,027	-25,613	-5,878
2M1	-253,849	-149,026	38,154	37,511	-47,676	-5,917
1M2	-350,496	-198,605	44,958	42,781	-66,034	-6,943
2L 1,5	-341,826	-195,009	44,400	42,367	-67,960	-6,684
2R 1,5	-500,181	-306,593	44,253	41,241	-66,047	-8,354
2M2	-474,570	-279,123	46,691	43,538	-73,375	-8,069
3M1	-569,964	-358,547	44,299	40,917	-71,322	-8,629
3L 1,5	-622,782	-375,864	49,0520	44,837	-85,190	-8,978
2M3	-818,095	-476,299	56,246	50,240	-94,441	-11,322
3R 1,5	-861,610	-549,619	49,432	44,0581	-82,493	-10,824
4M1	-849,693	-550,483	47,944	42,810	-84,562	-10,264
2R 2,5	-885,229	-534,388	54,782	48,683	-96,024	-11,236
2L 2,5	-743,537	-424,069	56,635	50,943	-105,119	-10,153
3M2	-991,540	-612,779	54,887	48,363	-101,876	-11,376
4L 1,5	-1201,962	-758,320	56,560	49,065	-109,256	-12,211
4R 1,5	-1502,956	-994,722	55,794	47,358	-103,760	-13,699
3L 2,5	-1267,119	-769,846	61,242	52,990	-120,831	-13,022
3R 2,5	-1494,067	-937,997	61,3057	52,296	-118,757	-14,153
3M3	-1391,379	-852,928	62,301	53,517	-124,280	-13,583
5M1	-1818,427	-1223,885	57,702	48,101	-114,352	-14,216
4M2	-1816,088	-1173,973	62,292	52,205	-122,503	-15,215
4R 2,5	-2533,271	-1657,717	68,387	55,783	-140,112	-17,842
4M3	-2572,711	-1654,785	70,927	57,982	-149,956	-18,041
4L 2,5	-2656,313	-1706,297	71,949	58,716	-158,279	-17,494
5M2	-3109,725	-2079,292	70,612	56,464	-150,685	-18,463
5M3	-4870,299	-3258,363	82,718	64,089	-191,848	-21,807

Tabla 3.5: Valores de los índices seleccionados para Vitapan 3D Master®

Igualmente se calcularon los valores de los diferentes índices seleccionados como candidatos para nuestra comparación para cada una de las tablillas de la guía dental Vitapan Classical® utilizadas tanto en la segunda como en la tercera experiencia psicofísica y que se muestran en la tabla 3.6.

Vita Classical	WIC	WIO	Z%	WI	W*	TW ₃₁	TW ₆₄
A1	-54,885	-10,813	21,531	-2,912	40,927	-10,810	-7,506
A2	-65,355	-15,165	24,213	-10,649	37,876	-16,239	-12,033
A3	-92,802	-32,275	20,284	-19,678	41,492	-23,103	-17,633
A3,5	-109,399	-42,719	18,371	-24,965	43,558	-27,830	-21,535
A4	-118,362	-52,819	14,338	-20,471	48,037	-30,984	-24,386
B1	-33,975	6,6367	29,543	1,895	33,879	-5,788	-3,215
B2	-66,243	-12,362	24,685	-11,408	37,417	-12,873	-8,873
B3	-106,234	-38,588	17,976	-21,939	43,781	-22,798	-17,026
B4	-113,743	-56,390	16,466	-24,217	46,060	-41,180	-33,817
C1	-50,138	-7,893	23,721	-2,484	38,766	-11,597	-8,290
C2	-81,247	-31,150	18,655	-11,793	43,369	-23,485	-18,464
C3	-85,785	-28,617	18,565	-13,195	43,278	-18,239	-13,477
C4	-104,554	-47,630	14,574	-15,463	47,958	-29,974	-23,898
D2	-52,156	-8,352	24,976	-4,516	37,439	-13,086	-9,537
D3	-77,151	-24,732	20,679	-12,290	41,172	-19,483	-14,805
D4	-92,222	-27,927	19,508	-17,375	42,158	-16,298	-11,418

Vita Classica	W _{uchida31}	W _{uchida64}	YID	YIE	W _{Lab}	T _{Lab}
A1	-288,609	-167,579	49,008	40,809	-72,482	-5,608
A2	-592,771	-354,931	55,156	44,869	-79,4579	-9,077
A3	-1160,324	-714,648	63,591	50,751	-108,475	-12,648
A3,5	-1658,499	-1036,960	68,694	54,325	-126,148	-15,095
A4	-2038,350	-1307,721	69,919	54,904	-138,286	-15,536
B1	-100,971	-54,647	44,087	37,810	-46,140	-3,119
B2	-397,671	-223,691	54,732	45,1452	-79,3481	-7,176
B3	-1145,726	-685,990	66,352	53,113	-122,542	-12,163
B4	-3505,348	-2400,953	72,023	55,258	-134,332	-21,690
C1	-319,108	-187,600	48,674	40,368	-66,166	-6,2357
C2	-1184,336	-763,110	59,427	47,158	-99,806	-12,290
C3	-751,132	-449,063	59,381	48,039	-103,022	-9,505
C4	-1901,460	-1246,759	65,925	51,636	-125,590	-14,822
D2	-394,629	-234,083	50,339	41,454	-66,818	-7,230
D3	-836,320	-515,516	58,072	46,723	-93,562	-10,479
D4	-623,472	-352,991	61,290	49,952	-107,438	-8,705

Tabla 3.6: Valores de los índices seleccionados para Vitapan Classical[®]

Finalmente, la tabla 3.7 muestra los valores de los diferentes índices propuestos para el conjunto de muestras de resina de composite de manufacturación propia.

Muestras	WIC	WIO	Z%	WI	W*	T _{w31}	T _{w64}
1	22,980	38,968	41,800	31,451	27,338	2,839	3,274
2	-10,551	22,141	40,408	9,205	26,209	-6,918	-4,592
3	-0,407	30,240	45,166	13,886	23,376	-5,262	-3,220
4	-17,334	15,377	37,140	6,452	28,323	-9,582	-6,954
5	-21,475	11,915	31,788	7,252	32,418	-6,078	-3,814
6	-42,818	3,511	34,956	-10,241	29,897	-14,535	-10,704
7	-47,624	-0,528	32,691	-10,765	31,369	-15,116	-11,183
8	-41,632	-1,731	30,879	-4,672	32,625	-16,059	-12,359
9	-47,369	-4,013	26,936	-3,882	35,731	-11,750	-8,374
10	-47,057	-5,5414	25,923	-2,935	36,685	-12,547	-9,168
11	-55,465	-13,216	27,058	-9,323	35,658	-21,286	-16,884
12	-67,138	-14,206	28,777	-19,394	34,542	-21,351	-16,437
13	-75,766	-18,891	27,397	-23,138	35,768	-22,695	-17,444
14	-66,0783	-12,9625	27,950	-16,921	34,946	-18,711	-14,087
15	-65,070	-11,646	27,734	-15,707	35,029	-16,944	-12,505
16	-77,219	-24,625	22,877	-16,033	39,119	-22,670	-17,623
17	-98,153	-41,408	18,532	-20,206	43,444	-30,576	-24,440
18	-56,780	-10,423	31,092	-15,654	32,886	-22,779	-18,095
19	-71,524	-27,928	22,815	-13,198	39,487	-28,684	-23,464
20	-80,877	-26,861	25,685	-23,648	37,309	-28,562	-22,863
21	-90,921	-38,552	21,723	-22,673	40,734	-34,267	-28,001
22	-119,471	-54,295	18,562	-32,893	44,335	-39,954	-32,440
23	-51,856	-15,673	24,640	-4,7638	37,980	-22,186	-18,050
24	-38,353	3,908	35,020	-6,730	29,760	-15,097	-11,475
25	-66,449	-14,825	30,468	-22,122	33,754	-24,785	-19,625

Muestra	W _{uchida31}	W _{uchida64}	YID	YIE	W _{Lab}	T _{Lab}
1	6,859	1,5457	18,608	25,613	13,160	2,125
2	-106,268	-52,718	34,741	35,958	-18,218	-4,296
3	-55,792	-21,141	32,466	34,577	-6,365	-3,300
4	-200,965	-114,045	36,847	36,864	-26,568	-5,932
5	-95,362	-50,564	34,406	35,953	-33,720	-3,441
6	-465,362	-271,962	46,768	43,727	-51,849	-9,164
7	-504,608	-297,731	47,538	44,199	-57,638	-9,350
8	-557,405	-347,124	45,129	41,806	-53,429	-9,685
9	-323,503	-187,617	43,347	41,706	-61,043	-6,682
10	-361,927	-215,163	43,144	41,268	-61,786	-7,0567
11	-961,638	-625,639	50,141	44,395	-69,468	-12,493
12	-978,850	-607,512	54,667	48,314	-79,140	-13,006
13	-1105,931	-684,335	57,258	50,134	-88,341	-13,743
14	-766,290	-462,981	52,776	47,545	-78,188	-11,218
15	-639,246	-377,818	51,588	47,096	-77,100	-10,088
16	-1105,075	-698,394	55,503	48,609	-92,691	-12,823
17	-1967,924	-1292,777	62,979	52,542	-116,798	-16,508
18	-1094,569	-711,660	52,295	45,770	-67,864	-14,262
19	-1717,127	-1172,619	55,598	46,658	-88,093	-16,295
20	-1712,518	-1126,336	59,753	50,368	-94,703	-17,154
21	-2439,374	-1659,030	63,306	51,5787	-107,767	-19,587
22	-3312,090	-2224,189	72,288	57,687	-138,450	-22,449
23	-1036,303	-703,454	47,471	41,759	-68,092	-12,687
24	-494,221	-301,706	44,682	41,743	-47,393	-9,629
25	-1295,024	-836,764	55,984	48,3234	-77,704	-15,593

Tabla 3.7: Valores de los índices seleccionados para cada muestra de resinas de composite.

3.5. NUEVOS ÍNDICES.

3.5.1 Índices propuestos.

En esta Tesis doctoral se proponen los siguientes índices de blancura:

- **Índice de blancura W_{UGR}** : este nuevo índice de blancura (W_{UGR}) sigue la misma forma funcional de las fórmulas WIC y WIO y atiende a la siguiente ecuación:

$$W_{UGR} = Y_i 100 + P(x_n - x_i) + Q (y_n - y_i)$$

donde x_n e y_n son las coordenadas cromáticas del iluminante patrón. Y_i , x_i e y_i son las coordenadas cromáticas de la muestra en cuestión y P y Q los coeficientes optimizados de acuerdo a los resultados de las observaciones visuales.

El nuevo índice de blancura W_{UGR} propuesto corresponde, por tanto, a una reformulación de los índices de blancura WIC y WIO, desarrollado mediante la optimización de los parámetros P y Q para una adecuada evaluación de la blancura de los dientes, en base a los resultados obtenidos en experiencias psicofísicas realizadas en laboratorio.

- **Índice de blancura $W_{LAB-UGR}$** : El segundo índice de blancura propuesto en este trabajo ($W_{LAB-UGR}$) es una versión optimizada del índice de blancura W_{LAB} formulado por la CIE en el espacio de color CIELAB que atiende a la siguiente ecuación:

$$W_{Lab-UGR} = P a^* + Q b^* + R L^*$$

donde a^* , b^* L^* son las coordenadas cromáticas de la muestras en cuestión. P, Q y R son los coeficientes optimizados de acuerdo a los resultados de las observaciones visuales en los experimentos psicofísicos.

- **Índice de blancura W^*_{00}** : por último, se propone el índice de blancura W^*_{00} que hemos desarrollado en base a la diferencia de color CIEDE2000, desde un punto blanco nominal a partir de $L^* = L^* = 100$, $a^* = (1 + G) a^* = 0$ y $b^* = b^* = 0$ (Luo et al, 2001). El nuevo índice se desarrolla de forma similar al índice de blancura W^* pero utilizando, para ello, la fórmula de diferencia de color CIEDE2000.

Por tanto este índice de blancura quedaría expresado por la siguiente expresión:

$$W^*_{00} = \left[\left(\frac{L^* - 100}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{C^*}{K_C S_C} \right)^2 \right]^{1/2}$$

donde S_L , S_C son las funciones de ponderación y K_L , K_C son los factores paramétricos que indican la influencia de las condiciones experimentales en la evaluación de diferencia de color y que para nuestro caso serán consideradas como $K_L = K_C = 1$. Como se puede observar esta nueva fórmula del índice de blancura propuesta es independiente del tono (H').

3.5.2 Optimización de índices propuestos.

Para la optimización de los nuevos índices de blancura W_{UGR} y $W_{LAB-UGR}$ se partió de los resultados de los juicios visuales realizados por el panel de observadores correspondiente a la primera experiencia psicofísica realizada sobre la guía dental Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached.

La elección de esta guía dental para la optimización de los nuevos índices se basó, fundamentalmente, en que ésta presenta una distribución sistemática de las tablillas en el espacio cromático dental y como consecuencia hay una mejor distribución de muestras dentro de los colores de dientes naturales existentes, siendo por tanto una de las guías más completas en

número de colores incluyendo no solo las muestras correspondientes a la guía Vitapan Classical[®] sino que se amplía, además, con tres tablillas específicas (OM1, OM2 y OM3) para la evaluación del blanqueamiento dental.

Con el objeto de obtener la magnitud de las diferencias entre el orden de clasificación de las tablillas dadas por los observadores, se utilizó la técnica del escalamiento estadístico lineal o normalización. Este procedimiento de escalamiento aplica la ley de juicios comparativos que convierte el orden de las clasificaciones en *unidades de desviantes normalizados o z-scores*.

Los z-scores obtenidos representan, por tanto, los valores para cada una de las tablillas en una escala distinta, que proporciona una indicación de las diferencias relativas entre el orden de las tablillas. Así diferencias mayores en esta escala representan diferencias mayores en el atributo de interés, en este caso la blancura, y viceversa.

Así, para la optimización de los parámetros de los índices de blancura propuestos W_{UGR} y $W_{LAB-UGR}$ se procedió a la obtención de los z-scores correspondientes a esta experiencia psicológica a partir del orden de las clasificaciones obtenidas por los observadores para cada una de las tablillas de la guía dental por medio del Choice Score Method y partiendo de la suposición de que el escalado lineal de las fórmulas de blancura WIC y WIO es correcto, lo cual requirió, además, un escalado logarítmico de la escala obtenida (Luo et al., 2009).

Dado que nuestra experiencia psicofísica consta de dos tipos de observaciones, una primera consistente en la ordenación en blancura de cada una de las tablillas de la guía dental y una segunda consistente, una vez ordenadas, en la estimación del grado de diferencia en blancura entre pares consecutivos, se utilizaron dos metodologías diferentes para la obtención de los z-scores correspondientes.

En el primer método, que denominaremos como *Método de ordenación*, para la obtención de los z-scores se partió de los datos obtenidos de los juicios visuales correspondientes sólo a la ordenación en blancura realizada por el panel. Para el segundo método de obtención de z-scores, que denominaremos como *Método de ordenación y grado*, se partió del orden de la clasificación obtenida tanto de la ordenación en blancura como del grado de diferencia en blancura entre pares consecutivos. (Ver anexo 1: formulario de las experiencias psicofísicas).

La tabla 3.8 muestra los valores de los órdenes medios obtenidos y la desviación estándar obtenidos con el primer y segundo método.

Muestras	Método de ordenación		Método de ordenación y grado	
	Orden Medio	DE	Orden Medio	DE.
OM1	1,0	0	1,0	0
OM2	2,2	0,4	1,7	0,4
OM3	2,8	0,4	1,8	0,9
1M1	4,0	0	3,1	0,9
2M1	5,0	0	3,8	1,0
1M2	6,6	0,8	5,3	1,8
2L 1,5	7,5	1,3	6,3	1,8
2R 1,5	8,0	1,4	6,1	1,6
2M2	9,3	1,6	8,1	2,5
3M1	9,2	1,4	7,6	1,8
3L 1,5	12,9	2,3	1,2	2,2
2M3	12,9	2,0	1,6	2,5
3R 1,5	13,4	2,2	1,3	2,4
4M1	14,9	1,9	1,4	4,3
2R 2,5	14,9	2,2	11,8	2,8
2L 2,5	15,3	2,4	13,5	2,9
3M2	14,6	2,7	13,7	2,6
4L 1,5	18,5	2,4	17,2	3,2
4R 1,5	20,9	1,4	20,8	2,9
3L 2,5	19,7	2,5	18,4	3,2
3R 2,5	21,4	1,9	18,0	2,5
3M3	20,5	2,5	19,9	2,9
5M1	22,7	2,0	21,7	3,1
4M2	23,5	1,9	22,8	2,4
4R 2,5	25,7	1,1	25,0	1,6
4M3	25,5	3,3	25,8	2,0
4L 2,5	25,7	2,2	25,3	1,6
5M2	27,3	1,5	27,2	1,2
5M3	28,9	0,3	28,9	0,3

Tabla 3.8: Ordenes medio y desviación estandar para guía dental Vitapan 3D Master®

Vitapan 3D Master ®	z-scores	
	Método de ordenación	Método de ordenación y grado
OM1	2,679	2,679
OM2	1,830	2,066
OM3	1,615	2,013
1M1	1,308	1,525
2M1	1,115	1,356
1M2	0,861	1,062
2L 1,5	0,733	0,914
2R 1,5	0,766	0,941
2M2	0,487	0,684
3M1	0,586	0,741
3L 1,5	0,308	0,452
2M3	-0,103	0,031
3R 1,5	0,183	0,341
4M1	0,006	0,145
2R 2,5	0,158	0,299
2L 2,5	0,018	0,135
3M2	-0,024	0,113
4L 1,5	-0,314	-0,198
4R 1,5	-0,677	-0,560
3L 2,5	-0,459	-0,311
3R 2,5	-0,399	-0,278
3M3	-0,586	-0,469
5M1	-0,800	-0,656
4M2	-0,835	-0,763
4R 2,5	-1,163	-1,118
4M3	-1,414	-1,260
4L 2,5	-1,239	-1,171
5M2	-1,752	-1,612
5M3	-2,592	-2,572

Tabla 3.9: Z-scores correspondientes a cada tablilla de la guía Vitapan 3D Master® por los dos métodos.

La tabla 3.9 muestran los z-scores obtenidos para cada una de las tablillas de la guía dental por los dos métodos.

A partir de este escalado lineal y a fin de comprobar la bondad de los índices de blancura estudiados (propuestos y seleccionados) se procedió al cálculo del coeficiente de determinación R^2 para cada caso.

El coeficiente de determinación R^2 es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Es una medida cuantitativa usada en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis. En nuestro caso, el modelo construido es una regresión lineal entre los z-scores y los valores del índice estudiado, la hipótesis planteada es comprobar que el índice se correlaciona perfectamente con la información de blancura dada por los observadores en el experimento psicofísico. Este coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por éste. Puede adquirir valores entre 0 y 1.

Para completar la adecuación de cada uno de los índices de blancura, seleccionados y propuestos, se calculó el porcentaje de decisiones incorrectas (%DI) de los observadores. Este parámetro (%DI) consiste en la obtención del porcentaje de comparaciones en blancura por pares incorrectamente detectados por el índice concreto, con respecto a todas las posibles comparaciones por pares del conjunto de muestras dado. Es decir, el porcentaje de veces que un índice de blancura erra en el valor comparativo de dos muestras según el orden dado por los observadores. A este respecto destacar que para la guía dental Vitapan 3D Master[®] hay 406 posibles comparaciones por pares (29 tablillas).

Mientras que el coeficiente de determinación R^2 mide la relación lineal entre los dos conjuntos de datos, la medida del porcentaje de decisiones incorrectas ayuda a identificar la variabilidad, además de evaluar la opinión de los observadores.

3.5.3 Validación de índices propuestos.

Con el objeto de validar el rendimiento de los nuevos índices formulados WI_{UGR} y $W_{LAB-UGR}$, se procedió a realizar el mismo procedimiento de obtención de z-scores, empleando, esta vez, como datos de partida los obtenidos de los juicios visuales correspondientes a la segunda experiencia psicofísica realizada por dicho panel, tanto con la guía dental Vitapan Classical[®] como con las muestras de resina de composite de manufacturación propia.

Aunque la guía dental Vitapan Classical[®] no cubre todo el espacio cromático dental debido a que las variaciones de sus tablillas no están sistemáticamente distribuidas en el espacio cromático que ocupan los dientes naturales, la elección de ésta para la medida de rendimiento de fórmulas se debió a que es ampliamente utilizada en clínica.

Al igual que en la optimización de índices de blancura propuestos, los z-scores fueron obtenidos tanto para el método de ordenación como para el método de ordenación y grado. Así, siguiendo el mismo procedimiento, se realizó el tratamiento de datos para cada una de las tablillas de la guía dental y conjunto de muestras.

Las tablas 3.10 y 3.11 muestran los valores de los ordenes medios y desviación estándar para las tablillas de la Vitapan Classical[®] y conjuntos de muestras de manufacturación propia, respectivamente y para cada uno de los métodos empleados.

Vitapan Classical [®]	Método de ordenación		Método de ordenación y grado	
	Orden Medio	DE	Orden Medio	DE
A1	2,0	0	1,7	0,4
A2	5,2	0,9	10,1	1,3
A3	10,6	1,0	4,3	1,5
A3,5	13,8	0,8	13,7	1,1
A4	15,7	0,5	15,7	0,4
B1	1,0	0	1,0	0
B2	4,6	0,9	4,0	1,2
B3	11,8	0,8	11,5	1,5
B4	13,3	0,7	13,1	1,3
C1	3,1	0,5	2,5	0,8
C2	7,2	0,6	6,7	1,3
C3	9,2	1,2	8,4	1,9
C4	14,9	0,8	14,7	0,9
D2	4,9	0,8	4,2	1,2
D3	8,5	1,2	7,8	1,7
D4	9,5	1,0	8,7	1,7

Tabla 3.10: Orden medio y desviación estándar de tablillas de Vitapan Classical[®]

Muestras	Método de ordenación		Método de ordenación y grado	
	Orden Medio	DE.	Orden Medio	DE
1	6,	0	14,3	3,3
2	1,2	0,9	12,4	2,2
3	5,1	2,0	6,5	2,4
4	10,0	4,0	14,4	2,3
5	14,3	4,6	12,4	2,8
6	10,4	3,6	8,5	2,4
7	14,6	4,6	3,0	1,0
8	13,9	5,9	2,4	0,6
9	13,9	6,4	4,0	1,3
10	14,3	6,5	8,3	2,6
11	13,9	5,8	15,4	3,1
12	10,7	6,1	22,4	1,7
13	10,5	6,1	4,4	1,1
14	11,3	6,0	1,0	0
15	11,2	6,0	8,1	2,4
16	8,8	6,3	12,8	2,6
17	10,7	6,8	8,1	2,6
18	15,5	9,3	14,4	2,5
19	15,8	9,4	20,6	1,6
20	17,9	6,0	18,5	1,9
21	20,6	3,7	23,0	1,5
22	18,8	3,8	24,9	0,2
23	17,8	4,8	20,4	1,4
24	16,7	5,3	8,5	2,4
25	21,8	1,5	16,7	2,1

Tabla 3.11: Orden medio y desviación estándar de conjunto de muestras.

Las tablas 3.12 y 3.13 muestran las unidades de desviantes normales o z-scores obtenidos para cada uno de los dos conjuntos de muestras que componían esta segunda experiencia y por los dos métodos utilizados.

Vitapan Classical®	z-scores	
	Método de ordenación	Método de ordenación y grado
A1	1,503	1,654
A2	0,575	0,752
A3	-0,355	-0,265
A3,5	-1,078	-1,033
A4	-1,959	-2,046
B1	2,297	2,297
B2	0,690	0,839
B3	-0,591	-0,535
B4	-0,937	-0,874
C1	1,066	1,254
C2	0,206	0,298
C3	-0,126	0,010
C4	-1,455	-1,389
D2	0,623	0,781
D3	-0,010	0,112
D4	-0,179	-0,049

Tabla 3.12: Z-scores obtenidos para Vitapan Classical®

Muestras	Z-scores	
	Método de ordenación	Método de ordenación y grado
1	-0,069	0,059
2	0,137	0,240
3	0,814	0,888
4	-0,064	0,057
5	0,133	0,237
6	0,555	0,636
7	1,561	1,552
8	1,891	1,739
9	1,241	1,303
10	0,577	0,662
11	-0,184	-0,040
12	-0,828	-0,742
13	1,136	1,219
14	2,679	2,679
15	0,579	0,676
16	0,095	0,201
17	0,601	0,681
18	-0,049	0,057
19	-0,644	-0,538
20	-0,481	-0,329
21	-0,873	-0,815
22	-1,108	-1,108
23	-0,621	-0,515
24	0,564	0,636
25	-0,280	-0,158

Tabla 3.13: Z-scores obtenidos para muestras de manufacturación propia

A igual que para Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached se calculó el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de decisiones incorrectas (%DI). En este caso y para el conjunto de tablillas de la guía dental Vitapan Classical[®] se establecen 120 comparaciones por pares (16 tablillas) y para las muestras de resina de composite 300 comparaciones por pares (25 muestras).

Tanto el coeficiente de determinación R^2 como el porcentaje de decisiones incorrectas %DI fueron calculados para los nuevos índices propuestos y para los índices elegidos como candidatos.

3.5.4 Validación en clínica de los índices de blancura propuestos.

A partir de los datos obtenidos por el panel de observadores de la tercera experiencia, y con el fin de testar la efectividad de los índices de blancura propuestos en condiciones clínicas, en lugar de laboratorio, se procedió a la obtención de unidades tipificadas o z-scores a partir del orden medio establecido por el panel de observadores, respecto a la ordenación en blancura, realizada con la guía dental Vitapan Classical[®].

La tabla 3.14 muestra los resultados obtenidos para los órdenes medio y desviación estándar.

Muestras	Orden Medio	D E
A1	1,9	0,4
A2	5,0	0,9
A3	10,0	1,7
A3,5	13,4	1,0
A4	15,6	0,6
B1	1,1	0,3
B2	5,1	1,6
B3	11,4	1,1
B4	13,3	1,5
C1	3,3	1,0
C2	7,0	0,9
C3	10,3	1,7
C4	15,0	0,8
D2	5,2	1,1
D3	8,5	1,6
D4	9,7	1,4

Tabla 3.14: Orden medio y desviación estándar.

Para los z-scores los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.15.

Vitapan Classical®	z-scores
A1	1,535
A2	0,619
A3	-0,256
A3,5	-0,956
A4	-1,859
B1	2,132
B2	0,606
B3	-0,511
B4	-0,921
C1	1,027
C2	0,256
C3	-0,306
C4	-1,519
D2	0,587
D3	-0,003
D4	-0,206

Tabla 3.15: Z-score obtenidos.

A continuación se realizó el cálculo del coeficiente de determinación R^2 y el porcentaje de decisiones incorrectas %DI para los índices de blancura propuestos y para los índices seleccionados.

3.6 SOFTWARE.

Para el cálculo de las coordenadas cromáticas a partir de los valores triestímulo y valores de índices de blancura se ha empleado hojas de cálculo tipo Excel, programa informático Origin 8[®].

Para la optimización de los nuevos índices se ha utilizado el lenguaje y entorno de programación MATLAB (7.12.0.635(R2011a), The Mathworks, US.

3.7 BIBLIOGRAFÍA.

- Bayindir F, Kuo S, Johnston WM, Wee AG. "Coverage error of three conceptually different shade guide systems to vital unrestored dentition". *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2007;98:175–85.
- Beltzer, AK-J, V. "The determination of tooth colors". *Quintessenz Zahntech*. 2004; 30(7): 726-740.
- CIE. Technical Report: Colorimetry. CIE Pub N° 15.3 CIE Central Bureau, Viena, Austria, 2004.
- Ganz E, Pauli HKA "Whiteness and tint formulas of the Commission Internationale de L'Eclairage: approximations in the L*a*b* color space". *Appl. Optics*. 1995; 34: 2998-2999.
- García JA, Rubiño M, Romero J, Hita E " Measuring the whiteness of human teeth. *Col. Res. Appl*. 1993; 18: 349-352.
- Gerlach RW, Zhou X, McClanahan SF. "Comparative response of whitening strips to a low peroxide and potassium nitrate bleaching gel". *American Journal of Dentistry* 2002; 15: 19A–23A.
- Gozalo-Díaz DJ, Lindsey DT, Johnston WM, Wee AG. "Measurement of color for craniofacial structures using a 45/0 degree optical configuration" *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2007; 97(1): 45-53.
- Guinea R, Pérez MM, Herrera LJ, Rivas MJ, Yebra A, Paravina RD. "Color difference thresholds in dental ceramics" *Journal of Dentistry*. 2010; 38s: e57-e64.

- Guinea R. "Evaluation of the CIEDE2000 ($K_L:K_C:K_H$) color difference metrics and development of color prediction algorithms: application to dental materials" Tesis Doctoral. Laboratorio de Biomateriales. Departamento de Óptica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. 2013.
- Guoxin H, Zhou M. "Whiteness formula in CIELAB uniform color space" Chinese Optics Letters. 2007; 5(7): 432-434.
- Hasegawa, A "Color and translucency of in vivo natural central incisors" Journal of Prosthetic Dentistry. 2000; 83(4): 418-423.
- Huertas R, Rivas MJ, Melgosa M, Sánchez-Marañón M, Boschle S, Damelincourt JJ "Uniformity of Lighting in Color Assessment Cabinets". Proceedings of 19 Congress of the International Commission for Optics (ICO). SPIE (The International Society for Optical Engineering). 2002; 4829: 879-880.
- Joiner A "Tooth colour: a review of the literature". J. Dent. 2004; 32 (1): S3-S12.
- Joiner A, Hopkinson I, Deng Y, Westland S "A review of tooth colour and whiteness". J. Dent. 2008a; 36: 2-7.
- Lee YK, Lim BS, Kim CW "Difference in the color and color change of dental resin composites by the background". J. Oral Rehabil. 2005b; 32: 227-233.
- Luo MR, Cui G, Rigg B., "The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000". Col. Res. Appl. 2001; 26: 340-350.

- Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I. "Evaluation of whiteness formulae for teeth", Proceedings of 10th Congress of the International Color Association. 2005: 839-842.
- Luo W, Luo W, Westland S, Brunton P, Ellwood R, Pretty IA, Mohan M. "Comparison of the ability of different colour indices to assess changes in tooth whiteness". J. Dent. 2007; 35:109–116
- Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I, Choung U. "Development of a whiteness index for dentistry". J. Dent. 2009.; 37 (1): e21-e26.
- Odioso LL, Gibb RD, Gerlach RW. "Impact of demographic, behavioural, and dental care utilization parameters on tooth color and personal satisfaction". Compendium of continuing education in dentistry. 2000. Supplement 29:S35-41.
- Pérez MM, Saleh A, Yebra A, Pulgar R "Study of the variation between CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 color differences of resin composites". Dental Material Journal. 2007; 26(1): 21-28.
- Melgosa M, Pérez MM, Yebra A, Huertas, R "Some reflections and recent international recommendations on color-difference evaluation". OPA 2001, 34(1): 1-10.
- Pérez MM, Guinea R, Ugarte-Alván LI, Pulgar R, Paravina RD. "Color and translucency in silorane-based resin composite compared to universal and nanofilled composites". J. Dent. 2010; 38s: e110-e116.
- Pointer MR "A comparison of the CIE 1976 color space". Col. Res. Appl. 1981; 6: 108-118.

- Rosenstiel SF, Porter SS, Johnston WM. Color measurements of all-ceramic crown systems. *Journal of Oral Rehabilitation*. 1989;16:491–501
- Rubiño, M, Garcia JA, Jiménez del Barco L, Romero J. “Colour measurement of human teeth and evaluation of a colour guide”. *Col. Res. Appl.* 1994; 19(1): 19-22.
- Siegel S. “Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences”. McGraw-Hill, New York, 1956.
- Uchida, H. “A new whiteness Formula”. *Col. Res. Appl.* 1998; 23, 4, 202-209.
- Vichi A, Fraioli A, Davidsonc C, Ferrari M. “Influence of thickness on color in multi-layering technique”. *Dent. Mater.* 2007; 23: 1584-1589.
- Zhao Y, Zhu J. “In vivo color measurement of 410 maxillary anterior teeth” *The Chinese Journal of Dental Research*. 1998, 1(3): 49-51.

CAPÍTULO IV

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Nuevos índices de blancura W_{UGR} y $W_{Lab-UGR}$

De acuerdo a los objetivos planteados y la metodología descrita en el Capítulo III, la tabla 4.1 muestra los coeficientes optimizados de acuerdo a los resultados obtenidos de los juicios visuales de los observadores y para cada uno de los dos métodos utilizados: método de ordenación y método de ordenación y grado.

Métodos de optimización	W_{UGR}		$W_{Lab-UGR}$		
	P	Q	P	Q	R
Método de ordenación	31.050	- 7.837	0.586	-2.348	-1.201
Método de ordenación y grado	35.136	- 9.887	0.511	-2.324	-1.104

Tabla 4.1: Valores de coeficientes optimizados.

Por tanto los índices de blancura propuestos quedan formulados a partir de las siguientes expresiones:

- Índice de blancura W_{UGR} :

$$W_{UGR1} = Y_i 100 + 31.050 (x_n - x_i) - 7.837 (y_n - y_i)$$

$$W_{UGR2} = Y_i 100 + 35.136 (x_n - x_i) - 9.887 (y_n - y_i)$$

donde los índices W_{UGR1} y W_{UGR2} son los obtenidos para el método de ordenación y ordenación y grado, respectivamente, y

- Índice de blancura $W_{\text{LAB-UGR}}$:

$$W_{\text{Lab-UGR1}} = 0.586 L^* - 2.348 a^* - 1.201 b^*$$

$$W_{\text{Lab-UGR2}} = 0.511 L^* - 2.324 a^* - 1.10 b^*$$

donde los índices $W_{\text{Lab-UGR1}}$ y $W_{\text{Lab-UGR2}}$ son los obtenidos para el método de ordenación y ordenación y grado, respectivamente.

La tabla 4.2 muestra los coeficientes de determinación R^2 para los nuevos índices de blancura propuestos (W_{UGR1} , W_{UGR2} , $W_{\text{Lab-UGR1}}$, $W_{\text{Lab-UGR2}}$ y W^*_{00}) y para los índices seleccionados para comparación descritos en la sección 3.4 del capítulo de material y método.

Índices	R^2	Indices	R^2
W_{UGR1}	0.978	W_{UGR2}	0.986
$W_{\text{Lab-UGR1}}$	0.977	$W_{\text{Lab-UGR2}}$	0.986
WIC	0.947	WIC	0.953
WIO	0.974	WIO	0.982
Z%	0.911	Z%	0.915
WI	0.748	WI	0.749
W*	0.933	W*	0.941
W*₀₀	0.901	W*₀₀	0.907
TW₃₁	0.961	TW₃₁	0.918
TW₆₄	0.949	TW₆₄	0.898
W_{Uchida31}	0.844	W_{Uchida31}	0.761
W_{Uchida64}	0.829	W_{Uchida64}	0.803
YID	0.956	YID	0.963
YIE	0.917	YIE	0.923
W_{Lab}	0.959	W_{Lab}	0.966
T_{Lab}	0.968	T_{Lab}	0.977

Tabla 4.2: Coeficientes de determinación R^2 para los diferentes índices.

Las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran el ajuste final obtenido tras la optimización para los índices W_{UGR1} , $W_{\text{Lab-UGR1}}$ y el ajuste del índice W^*_{00}

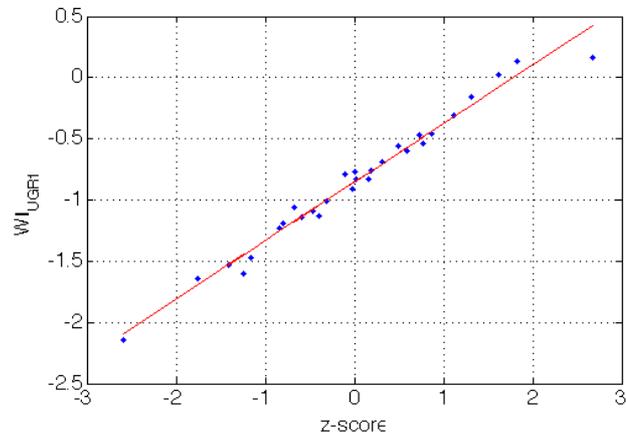


Figura 4.1: R^2 para WI_{UGR1} .

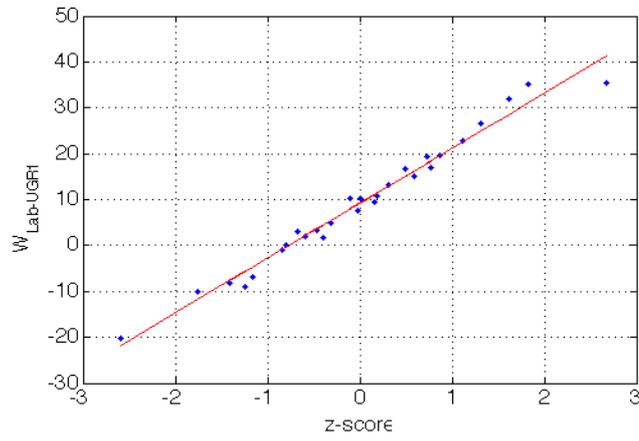


Figura 4.2: R^2 para $W_{Lab-UGR1}$

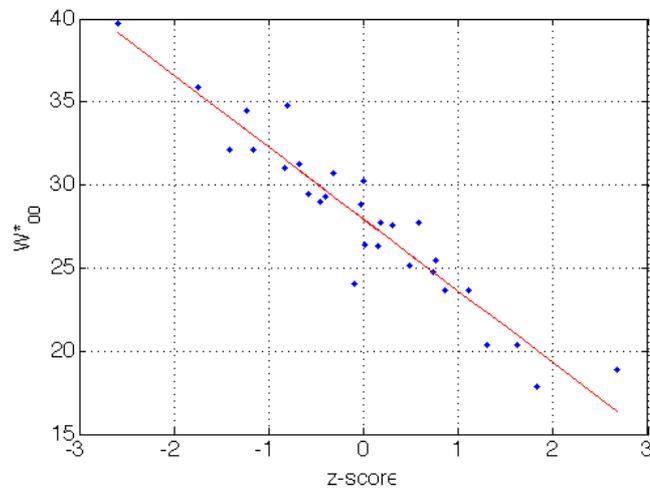


Figura 4.3: R^2 para W^*_{00}

Hasta la actualidad, en el ámbito industrial se reconoce que la blancura es un atributo de color especial y hay muchas industrias en las que el índice de blancura es una medida útil de la calidad de los productos manufacturados.

Los más utilizados actualmente son índices de blancura basados en el espacio CIE 1931. También basado en este espacio, y dentro del ámbito odontológicos, Luo et al. propusieron en el año 2009 el índice WIO, versión modificada del índice de blancura WIC de la CIE, (Luo et al, 2009), basado directamente en una ordenación en blancura de observadores sobre la guía dental Vitapan 3D Master[®]. Este índice presenta la misma forma funcional que el índice de blancura WIC, pero las constantes en la fórmula son diferentes, ya que están optimizadas específicamente para la ordenación de la blancura en dientes y realizada por observadores.

Para la evaluación del diente blanqueado algunos autores proponen como el factor más importante los cambios en amarillez (Joiner, 2004; Lou et al., 2005, Joiner et al., 2008a) siendo los más utilizados en el campo de la estética dental los índices de amarillez YID y YIE.

El espacio cromático CIE 1976 ó CIELAB es el usualmente empleado en la evaluación cromática de biomateriales dentales (Pérez et al, 2007; Guoxin et al, 2007; Joiner et al, 2008; Guinea et al, 2010), sin embargo no existen índices de blancura desarrollados en base a este espacio que, de manera análoga al índice WIO estén correlacionados con los juicios visuales desarrollados a partir de experiencias psicofísicas de laboratorio y con aplicación al ámbito dental.

En la presente Tesis doctoral, se han desarrollado cuatro nuevos índices de blancura; dos de ellos, WI_{UGR1} y WI_{UGR2} , con la forma funcional de WIC y WIO y los índices $W_{Lab-UGR1}$ y $W_{Lab-UGR2}$ basados en el sistema de

representación de color CIELAB que siguen la misma forma funcional que la propuesta por Ganz (Ganz, 1995) pero utilizando material y método análogo al empleado por Luo et al. para el desarrollo del índice WIO (Luo y cols, 2009).

También se ha propuesto el índice W^*_{00} que, al igual que $W_{\text{Lab-UGR1}}$ y $W_{\text{Lab-UGR2}}$, está basado en CIELAB y desarrollado en base a la fórmula de diferencia de color CIEDE2000, desde un punto blanco nominal a partir de $L^* = 100$, $a^* = 0$ y $b^* = 0$ (Luo et al, 2001).

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 4.2, se puede observar que los valores más altos del coeficiente de determinación R^2 corresponden a los obtenidos para las fórmulas de blancura propuestas W_{UGR1} , W_{UGR2} , $W_{\text{Lab-UGR1}}$ y $W_{\text{Lab-UGR2}}$ y los valores más bajos obtenidos de R^2 corresponden a los índices de blancura WI, reformulado por la ASTM, W_{Uchida31} y W_{Uchida64} . En concreto, para WI se obtiene un valor de R^2 de 0.748 para el método de ordenación y 0.749 para el método de ordenación y grado. Partiendo de la base que para obtener WI es necesario el cálculo de Z%, los valores de R^2 obtenidos para éste fueron de 0.911 para el método de ordenación y 0.915 para el método de ordenación y grado, valores que aunque superiores a WI son inferiores a los obtenidos para las fórmulas propuestas. Cabe destacar los bajos resultados obtenidos para éstos índice teniendo en cuenta que actualmente y de forma general y habitual se utilizan para la evaluación y predicción de la blancura en el ámbito industrial (Joiner et al, 2008).

Con respecto al índice formulado por H. Uchida los valores de R^2 obtenidos para W_{Uchida31} fueron de 0.844 para el método de ordenación y 0.761 para el de ordenación y grado. Para W_{Uchida64} los valores obtenidos de R^2 fueron 0.829 para el método de ordenación y 0.803 para el de ordenación y grado. Cabe destacar los bajos valores de los coeficientes de determinación para este

índice, más aún teniendo en cuenta que este índice fue formulado como modificación a WIC, establecido por la CIE, y que tenía en cuenta tanto el matiz como la pureza, aparte de proporcionar una muy significativa correlación con la estimación visual en contraposición con éste (Uchida, 1998). Para ello, en este estudio se analizó la correlación entre el valor del índice de blancura calculado por la fórmula propuesta y los obtenidos a partir de los juicios visuales realizados por la Asociación de Tecnología de Color de Japón (74 observadores sobre 18 muestras de tela blanqueadas y 29 muestras de papeles blanqueados), (CSAJ, 1986 y 1988), junto con los realizados por este autor en un estudio previo (26 observadores sobre 49 muestras de telas blanqueadas) (Uchida, 1990). Para la nueva fórmula de la blancura propuesta por Uchida se obtuvo una correlación significativa tanto para las 18 muestras de tela ($r_o = 0,801$) y las 29 muestras de papel blanqueados ($r_o = 0.784$) como para las 49 muestras de tela blanqueada ($r_o = 0.710$). Respecto a la fórmula de blancura CIE, obtuvo una correlación inversa ($r_o = -0,768$) para las 18 muestras de tela, una correlación significativa ($r_o = 0.399$) para las 29 muestras de papel blanqueados y no obtuvo rango de correlación significativo ($r_o = 0.252$) para las 49 muestras de telas blanqueadas. La nota importante de este experimento fue la utilización de 49 muestras de blancos, incluyendo muchas muestras con diversos y fuertes matices.

Comparando los resultados obtenidos en su trabajo con los obtenidos por aplicación de su índice, en nuestro estudio para muestras dentales, con los índices WI_{UGR1} y WI_{UGR2} , se puede observar que éstos últimos presentan un R2 mayor. Este resultado se puede atribuir, en principio, a una inadecuada utilización de estos índices de blancura para la evaluación de biomateriales dentales ya que éstos fueron desarrollados empleando la evaluación visual de materiales con textura diferente a la que presentan los materiales dentales, como hemos indicado anteriormente.

Por otra parte, y teniendo en cuenta que el desarrollo del índice $W_{Uchida31}$ y $W_{Uchida64}$ conlleva la estimación del índice de tinte Tw_{31} y Tw_{64} ($R^2_{ordenación} = 0.961$ y $R^2_{ordenación \text{ y grado}} = 0.918$ y $R^2_{ordenación} = 0.949$ y $R^2_{ordenación \text{ y grado}} = 0.898$, respectivamente) cuyos R^2 son claramente superiores a los encontrados para el índice desarrollado por Uchida, cabe pensar, en primera instancia, en la idoneidad del índice de tinte frente a los índices de blancura, desarrollados hasta la actualidad, para la evaluación de biomateriales dentales. No obstante, y a pesar de que también son elevados los valores obtenidos para los índices de amarillez YID ($R^2_{ordenación} = 0.956$ y $R^2_{ordenación \text{ y grado}} = 0.963$) y YIE ($R^2_{ordenación} = 0.917$ y $R^2_{ordenación \text{ y grado}} = 0.923$) los resultados de éstos son inferiores a los obtenidos para nuestras fórmulas de blancura, mas aún si tenemos en cuenta que los índices de amarillez YID y YIE son utilizados para evaluar el proceso de blanqueamiento de diente (Joiner, 2004; Lou et al, 2005, Joiner et al, 2008a). Ya que los resultados obtenidos para nuestras fórmulas superan a éstos podemos decir, en primera instancia, que los nuevos índices WI_{UGR1} , WI_{UGR2} presentan mayor rendimiento para la evaluación de tratamientos de blanqueamiento dental.

Para el índice de blancura WIC, que presenta la misma forma funcional que WI_{UGR1} y WI_{UGR2} , los resultados de R^2 fueron para el método de ordenación de 0.947 frente al 0.978 de WI_{UGR1} . Para el método de ordenación y grados el valor de R^2 fue de 0.953 frente al 0.986 obtenido para WI_{UGR2} . Como se puede observar los resultados obtenidos para los índices propuestos son mayores que los obtenidos para WIC para cada uno de los dos métodos. Teniendo en cuenta que la fórmula WIC fue diseñada a partir de investigaciones colorimétricas utilizando sólo un conjunto de muestras de calibración y no a partir de experiencias psicofísicas, era de esperar que este índice presente valores inferiores que los encontrados para los índices propuestos WI_{UGR1} y WI_{UGR2} .

Mención especial merecen los resultados obtenidos para el índice WIO, puesto que fue desarrollado para uso específico en Odontología, de acuerdo a los juicios visuales obtenidos de la clasificación en blancura de las 26 tablillas de la guía dental Vita 3D Master[®] por un conjunto de nueve observadores y que presenta la misma forma funcional que nuestros índices de blancura WI_{UGR1} y WI_{UGR2} . Así el valor del coeficiente de correlación (R^2) fue de 0.87, superando dicho valor a los obtenidos para WIC, WI, Z%, YID y YIE en dicho estudio. Concluyendo que aunque la fórmula de blancura WIC tenía mejor funcionalidad, no es aceptable debido a que la predicción de la blancura de los dientes usando dicha fórmula es menos fiable en las evaluaciones visuales hechas por el observador humano promedio. Por tanto se demostró que la versión desarrollada y modificada WIO puede ser tan fiable como el observador humano (Luo et al. 2005).

Nuestros resultados muestran valores del R^2 ligeramente superiores a los obtenidos para el índice WIO (0.974 frente al 0.978 y 0.982 frente al 0.986 para los dos métodos respectivamente). Este resultado indica, en primera aproximación, una mejor funcionalidad de los índices WI_{UGR1} y WI_{UGR2} frente a WIO en la estimación visual del observador promedio en la evaluación de la blancura de los biomateriales dentales.

Los índices propuesto en la presente Tesis doctoral, basados en CIELAB, $W_{Lab-UGR1}$ y $W_{Lab-UGR2}$, presentan valores mas elevados del coeficiente de determinación, tanto para los índices seleccionados basados en CIELAB (W^* y W_{Lab}) como los basados en el sistema CIE1931 como se puede observar en la tabla 4.2.

Centrándonos en los índices W^* y W_{Lab} , estas fórmulas presentan una forma funcional que difiere de los índices propuestos para este espacio de color. En concreto, la ecuación W_{Lab} propuesta por Ganz et al. en 1995 y

dependiente únicamente de las coordenadas cromáticas L^* y b^* , está desarrollada como una aproximación teórica en el espacio CIELAB de la fórmula de blancura WIC. Por ello, los R^2 son muy similares (0.959 y 0.966 para W_{Lab} y 0.947 y 0.953 para WIC, para los dos métodos respectivamente) como cabría esperar dado que la aproximación teórica se realiza a partir de un índice, WIC, el cual ha sido desarrollado partiendo de investigaciones colorimétricas, las cuales utilizan sólo un conjunto de muestras de calibración y no experiencias psicofísicas, como hemos comentado anteriormente.

Por otra parte, encontramos que la correlación entre el índice W^* y la percepción visual es menor que para el índice W_{Lab} . W^* está definido como la diferencia de color CIELAB respecto a un blanco nominal de coordenadas $a^*=0$, $b^*=0$ y $L^*=100$. Así, esta fórmula indica que a menor distancia euclídea al blanco nominal, mayor blancura presenta el objeto analizado. Aunque consideramos que esta definición es “adecuada”, la falta de uniformidad de CIELAB podría explicar el bajo coeficiente de determinación encontrado para este índice (0.933 y 0.941 para los dos métodos empleados) respecto a los encontrados para los índices propuestos y por tanto la menor correlación con la percepción visual de los biomateriales dentales.

Con el fin de corregir la falta de uniformidad en el espacio CIELAB, la CIE recomienda el uso de la reciente fórmula CIEDE2000 (CIE, 2004). En particular, CIEDE2000 incorpora las funciones de peso (S_L , S_C y S_H) y los factores paramétricos (K_L , K_C y K_H) y un término de rotación, R_T , que tiene en cuenta la interacción entre las diferencias en croma y tono en la región de los azules, la cual afecta principalmente a colores con bajo croma (colores neutrales). La fórmula de diferencia de color CIEDE2000 fue desarrollada por el CIE TC 1-47 (Luo et al., 2001) y para ello se utilizó un conjunto de datos experimentales designados como COM dataset, disponibles por la CIE, con 3657 pares de color de diferentes materiales (no dentales) y posteriormente

recopilados desde cuatro experimentos psicofísicos diferentes: BFD-P (Luo et al., 2001), Leeds (Kim et al., 2004), RIT- DuPont (Berns et al., 1991) y Witt (Witt, 1999). Los resultados visuales de estos cuatro experimentos eran ajustados a una escala común, escala visual de BFD-P como unidad.

Dada la reciente recomendación de la CIE, en nuestro estudio se ha propuesto W^*_{00} con el objeto de definir un nuevo índice de blancura basado en la fórmula de diferencia de color CIEDE2000, de manera análoga a como se desarrolló el índice W^* para la fórmula de diferencia de color CIELAB. Los ajustes realizados para este nuevo índice para el método de ordenación y método de ordenación y grado fueron de 0.901 y 0.907, respectivamente, los cuales son significativamente inferiores a los hallados para el resto de índices definidos en el espacio CIELAB y especialmente para los índices $W_{\text{Lab-UGR1}}$ y $W_{\text{Lab-UGR2}}$, también optimizados en nuestro estudio para este espacio. Este resultado nos lleva a concluir, en primera instancia, la falta de idoneidad de este índice propuesto para biomateriales dentales debido, probablemente, a una inadecuada aplicación de CIEDE2000, en nuestro estudio, para el desarrollo de un índice de blancura en biomateriales dentales.

La menor correlación encontrada respecto a los juicios visuales podría ser explicada en base a la exclusión en el índice W^*_{00} del término de rotación R_T , el cual corrige la falta de uniformidad en la zona del espacio cromático correspondiente a colores de bajo croma y a la necesidad de emplear factores paramétricos diferentes a la unidad para la evaluación de diferencias de color de materiales dentales (Pérez et al., 2011).

A pesar de estos malos resultados, un estudio realizado en nuestro laboratorio (Ghinea et al., 2010) ha demostrado que la fórmula de diferencia de color CIEDE2000 proporciona un mejor ajuste que la fórmula CIELAB en la evaluación de la diferencia de color en umbrales de perceptibilidad y

aceptabilidad para cerámicas dentales y recomendando su uso en investigación dental y análisis instrumental del color dental “in vivo”. Por tanto, dada la complejidad de esta fórmula y las actuales recomendaciones de la CIE nos anima a continuar con futuras investigaciones sobre nuevos índices basados en CIEDE2000 en el campo de los biomateriales dentales.

Los valores del coeficiente de determinación de la mayoría de los índices de blancura utilizados son bastante altos, por lo que se hace difícil concluir si el uso de cualquiera de ellos es más adecuado en términos prácticos. A fin de hacer frente a esta cuestión se utilizó un análisis adicional mediante el cálculo del porcentaje de decisiones incorrectas (%DI), es decir, el porcentaje de veces que un observador toma una decisión equivocada, y a su vez una decisión es equivocada cuando al realizar un juicio visual el observador de forma individual no está de acuerdo con la mayoría de observadores.

La tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos para en porcentaje de decisiones incorrectas obtenidos para cada uno de los índices analizados y para el método de ordenación y métodos de ordenación y grado, respectivamente.

Índices	%DI	Índices	%DI
WI_{UGR1}	5.080	WI_{UGR2}	5.080
W_{Lab-UGR1}	5.265	W_{Lab-UGR2}	5.265
WIC	7.697	WIC	7.697
WIO	5.234	WIO	5.234
Z%	7.481	Z%	7.481
WI	15.025	WI	15.025
W*	8.374	W*	8.374
W*₀₀	9.698	W*₀₀	9.698
TW₃₁	5.850	TW₃₁	5.850
TW₆₄	5.911	TW₆₄	5.911
W_{Uchida31}	5.850	W_{Uchida31}	5.850
W_{Uchida64}	5.911	W_{Uchida64}	5.911
YID	10.0379	YID	10.0379
YIE	8.436	YIE	8.436
W_{Lab}	6.281	W_{Lab}	6.281
T_{Lab}	5.419	T_{Lab}	5.419

Tabla 4.3: Valores de % DI.

El intervalo del porcentaje de decisiones incorrectas está comprendido, para el método de ordenación y método de ordenación y grado, entre el 5.080% para WI_{UGR1} y el 15.025% para el índice WI. En general, los índices con coeficientes de determinación más elevados son los que presentan los valores del %DI menores, como se puede observar en las tablas 4.2 y 4.3. En concreto, los índices propuestos en la presente Tesis doctoral WI_{UGR1} , WI_{UGR2} , $W_{Lab-UGR1}$ y $W_{Lab-UGR2}$ presentan los valores de R^2 más elevados y el porcentaje de decisiones incorrectas más bajo que el resto de los índices seleccionados ($R^2_{WI_{UGR1}} = 0.978$, $R^2_{WI_{UGR2}} = 0.986$, $R^2_{W_{Lab-UGR1}} = 0.977$, $R^2_{W_{Lab-UGR2}} = 0.986$, $\%DI_{WI_{UGR1}} = 5.080$, $\%DI_{WI_{UGR2}} = 5.080$, $\%DI_{W_{Lab-UGR1}} = 5.265\%$ y $\%DI_{W_{Lab-UGR2}} = 5.265\%$).

Cabe destacar que para el índice WIO, el valor obtenido del porcentaje de decisiones incorrectas fue del 5.234%. Los nuevos índices propuestos WI_{UGR1} y WI_{UGR2} presentan valores del %ID más altos que este índice. Si tenemos en cuenta que nuestras fórmulas han sido desarrolladas usando biomateriales odontológicos y empleando la misma metodología que WIO y ambos obtenidos por optimización de los coeficientes de WIC, de acuerdo con los resultados visuales de la guía Vitapan 3D Master[®], podemos interpretar que nuestros nuevos índices proporcionan un mayor rendimiento que WIO, fórmula actualmente propuesta en el campo de la Odontología.

Respecto a los índices diseñados para el espacio de color CIELAB podemos observar que el porcentaje de decisiones incorrectas obtenidos para los índices $W_{Lab-UGR1}$ y $W_{Lab-UGR2}$ fue del 5.265% para ambos, frente al 6.281% obtenido para W_{Lab} , y el 8.374% para W^* , ambos para los dos métodos. Dado que los índices optimizados en nuestro estudio están mejor correlacionados con los juicios visuales (tabla 4.2), podemos señalar, en principio, el mejor rendimiento de estas fórmulas frente a los índices basados en CIELAB ya existentes. Finalmente, destacar que los porcentajes obtenidos para el índice

W^*_{00} propuesto y basado también en el espacio CIELAB, corroboran el bajo rendimiento de esta fórmula para la predicción de la blancura en biomateriales dentales.

Mención aparte merece el los resultados que presenta el índice de tinte CIE T_{LAB} (Ganz et al., 1995). Para esta fórmula, dependiente únicamente de las coordenadas cromática a^* y b^* , se comprueba su alto rendimiento con una alta correlación y valores para el porcentaje de decisiones incorrecta próximos a los obtenidos para WIO y las fórmulas propuestas. Este resultado nos plantea la necesidad de futuras investigaciones que tengan en cuenta los factores de tinte para la evaluación de blancura en los procesos de blanqueamiento dental o caracterización de la blancura de biomateriales empleados en odontología.

Finalmente, cabe plantearse la comparación entre los resultados obtenido para ambos métodos psicofísicos empleados en la obtención de las fórmulas desarrolladas en nuestro laboratorio, es decir, método de ordenación y método de ordenación y grado. A la vista de los valores obtenidos, donde encontramos una gran similitud en el valor del porcentaje de decisiones incorrectas, incluso idéntico para WI_{UGR} , y la proximidad entre los valores del coeficiente de determinación para ambos métodos (0.978 frente al 0.986 para WI_{UGR1} y WI_{UGR2} y 0.977 frente al 0.986 para $W_{Lab-UGR1}$ y $W_{Lab-UGR2}$, respectivamente), nos hace pensar que ambos métodos podrían ser equivalentes.

4.2 Validación de los nuevos índices de blancura propuestos

Una vez analizados los nuevos índices de blancura en comparación con los índices de blancura seleccionados se procedió a la validación de los nuevos índices propuesto, partiendo de los resultados obtenidos en la segunda experiencia psicofísica realizada con la guía dental Vita Classical[®] y el conjunto

de muestras de manufacturación propia. Para ello se utilizó la misma metodología empleada para el desarrollo de los índices propuestos, se procedió nuevamente al cálculo del coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de decisiones incorrectas (%DI) para los dos métodos utilizados y para cada uno de los nuevos índices de blancura obtenidos así como para los seleccionados. Las tabla 4.4 y 4.5 muestran los resultados obtenidos de estos parámetros para cada uno de los índices y para cada uno de los métodos.

Índices	Vita Classical [®]	Muestras	Índices	Vita Classical [®]	Muestras
	R^2	R^2		R^2	R^2
WI _{UGR1}	0.961	0.942	WI _{UGR2}	0.966	0.949
W _{Lab-UGR1}	0.957	0.955	W _{Lab-UGR2}	0.959	0.946
WIC	0.915	0.899	WIC	0.920	0.973
WIO	0.960	0.933	WIO	0.964	0.917
Z%	0.908	0.8049	Z%	0.903	0.696
WI	0.776	0.831	WI	0.775	0.967
W*	0.912	0.771	W*	0.912	0.670
W* ₀₀	0.727	0.743	W* ₀₀	0.726	0.604
TW ₃₁	0.943	0.928	TW ₃₁	0.951	0.644
TW ₆₄	0.941	0.923	TW ₆₄	0.948	0.603
W _{Uchida31}	0.893	0.729	W _{Uchida31}	0.915	0.649
W _{Uchida64}	0.885	0.714	W _{Uchida64}	0.908	0.6080
YID	0.882	0.903	YID	0.886	0.997
YIE	0.882	0.850	YIE	0.887	0.995
W _{Lab}	0.930	0.905	W _{Lab}	0.934	0.953
T _{Lab}	0.909	0.924	T _{Lab}	0.914	0.923

Tabla 4.4: Coeficiente de determinación entre los distintos índices y los z-scores obtenidos de las evaluaciones visuales de los observadores para los dos métodos.

Indices	Vita Classical [®]	Muestras	Indices	Vita Classical [®]	Muestras
	%DI	%DI		%DI	%DI
WI _{UGR1}	5.167	9.040	WI _{UGR2}	5.167	8.827
W _{Lab-UGR1}	5.667	8.280	W _{Lab-UGR2}	5.667	8.180
WIC	6.633	12.320	WIC	6.633	12.320
WIO	5.433	9.200	WIO	5.433	9.200
Z%	10.733	15.313	Z%	10.733	15.313
WI	11.967	17.493	WI	11.967	17.493
W*	10.100	14.620	W*	10.100	14.620
W* ₀₀	20.233	16.260	W* ₀₀	20.233	16.260
TW ₃₁	6.600	8.707	TW ₃₁	6.600	10.927
TW ₆₄	7.367	7.333	TW ₆₄	7.367	11.727
W _{Uchida31}	6.600	8.707	W _{Uchida31}	6.600	10.927
W _{Uchida64}	6.600	7.333	W _{Uchida64}	6.600	11.727
YID	7.933	14.393	YID	8.233	12.873
YIE	8.233	12.873	YIE	7.933	14.393
W _{Lab}	6.433	12.280	W _{Lab}	6.433	12.280
T _{Lab}	9.900	9.200	T _{Lab}	9.900	9.200

Tabla 4.5: Porcentaje de decisiones incorrectas para los diversos índices basados en la serie completa de 120 pares de comparaciones para la guía Vita Classical[®] y 300 pares de comparaciones para el conjunto de muestras para los métodos de ordenación (columnas izquierda) y ordenación y grado (columnas derecha).

Para una mejor comparación las figuras 4.4a, 4.4b y 4.5a,4.5 b muestran el porcentaje de decisiones incorrectas para la guía Vitapan Classical[®] y el conjunto de muestras de resinas de composite, respectivamente.

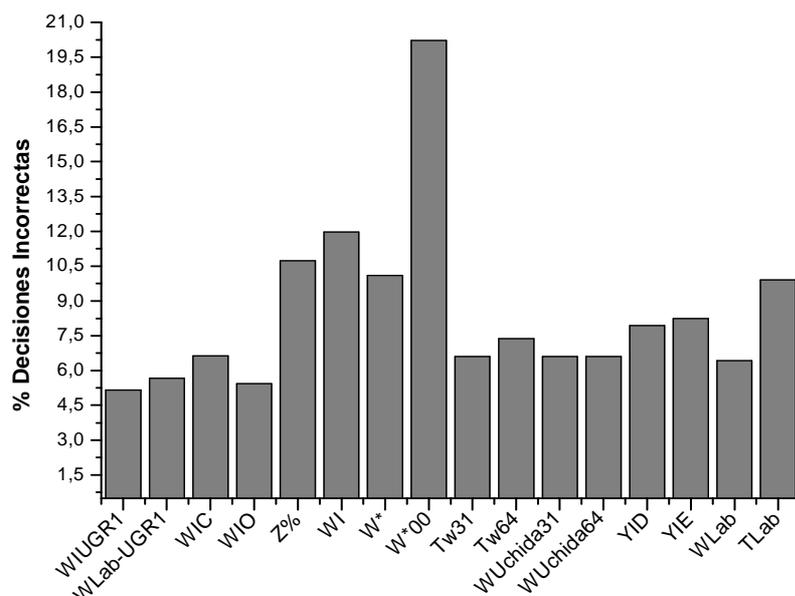


Figura 4.4a: Porcentajes de decisiones incorrectas para los distintos índices con Vitapan Classical[®] para el método de ordenación.

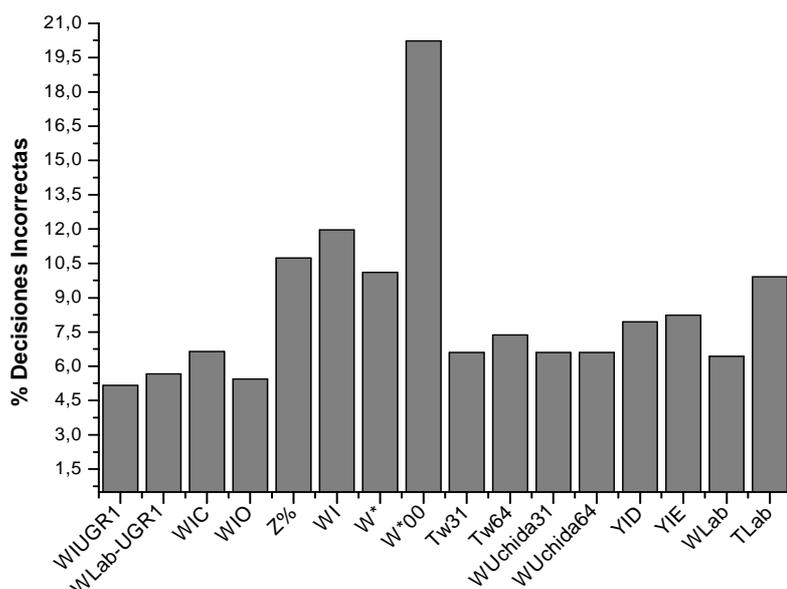


Figura 4.4b: Porcentajes de decisiones incorrectas para los distintos índices con Vitapan Classical[®] para el método de ordenación y grado.

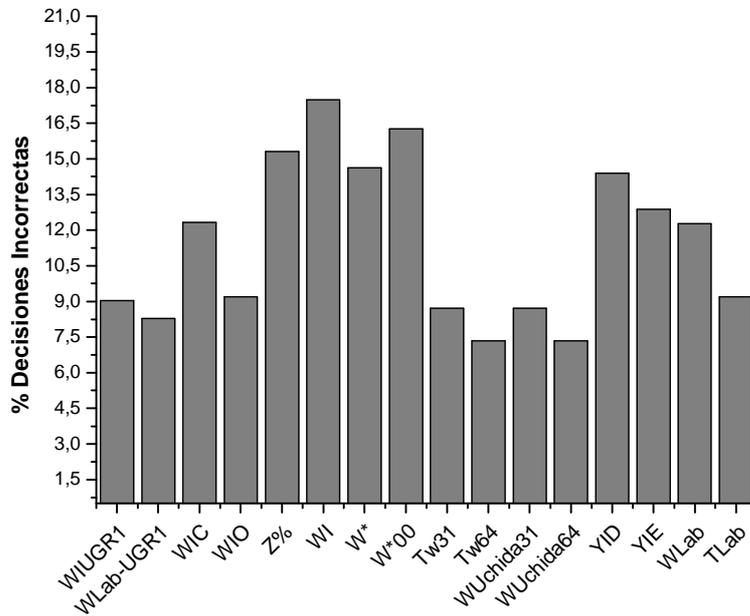


Figura 4.5(a): Porcentajes de decisiones incorrectas para los distintos índices con muestras para el método de ordenación

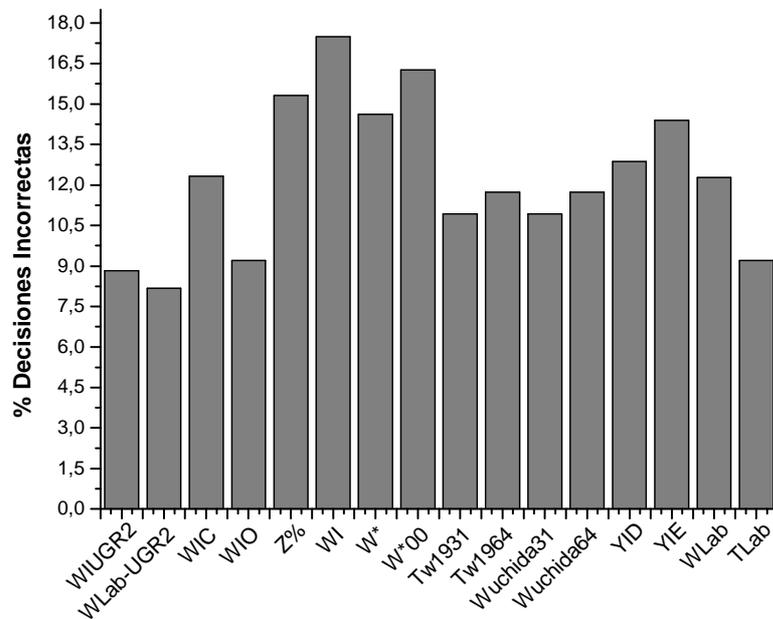


Figura 4.5(b): Porcentajes de decisiones incorrectas para los distintos índices con muestras para el método de ordenación de ordenación y grado.

Tanto para la guía Vitapan Classical[®] como para el conjunto de muestras de resinas de composite de manufacturación propia, se obtienen los valores más elevados del coeficiente de determinación en los índices propuestos (W_{UGR1} , W_{UGR2} , $W_{Lab-UGR1}$ y $W_{Lab-UGR2}$), excepto los obtenidos para los índices de blancura WIC y WI y los de amarillez para el conjunto de muestras de resinas de composite para el método de ordenación y grado. Los valores del coeficientes de determinación de la mayoría de los índices de blancura utilizados son altos por lo que nuevamente, se utilizó el análisis adicional del %DI con el fin de determinar, en términos prácticos, cuál de ellos es el más idóneo.

El porcentaje de decisiones incorrectas para los índices WIC, WI y amarillez es claramente superior al obtenido para los nuevos índices propuestos (8.827% y 8.180% para W_{UGR2} y $W_{Lab-UGR2}$, respectivamente, frente al 12.320% para WIC, el 17.493% para WI, el 12.873% para YID y el 14.393% para YIE). Esto nos indica, en principio, que al igual que hemos planteado anteriormente, los índices propuestos presentan mejor correlación con la percepción visual de biomateriales empleados en el campo de la Odontología.

Cabe señalar que, aunque los índices propuestos son los que presentan mejor correlación con la percepción del observador, tanto para R^2 como para el %DI, los valores obtenidos para los índices W_{UGR} difieren ligeramente con respecto a los de $W_{LAB-UGR}$. Los resultados para el índice W_{UGR} son mejores, excepto los resultados del %DI para el conjunto de muestras de resinas de composite, para ambos métodos. Esto parece indicar, en principio, un mejor rendimiento del índice W_{UGR} .

Sin embargo, el índice W^*_{00} , también propuesto en nuestro estudio, es el que presenta los peores resultados para ambos parámetros. El rendimiento de

correlación de la ecuación optimizada W^*_{00} está comprendido entre 0.60 y 0.74 y produce un alto porcentaje de decisiones equivocadas (20.233% - 16.260%).

Este resultado corrobora la pobre correlación con los resultados visuales y por tanto, el bajo rendimiento del índice propuesto para la evaluación en blancura de biomateriales dentales debido, probablemente, a una inadecuada aplicación en nuestro estudio de CIEDE2000, como ya se ha mencionado anteriormente.

Cabe destacar los resultados obtenidos para el índice WIO ya que éste fue desarrollado específicamente para Odontología y con una metodología similar a la empleada en nuestro estudio. En su desarrollo (Luo. et al., 2005), la correlación de la ecuación optimizada fue de 0.93 y sólo un 5.8% y 8% (para 325 pares y 25 pares, respectivamente) de decisiones incorrectas. Como se observa en las tablas 4.4 y 4.5 los valores de los coeficientes son similares a los obtenidos en nuestro estudio y ligeramente inferiores para el conjunto de muestras de resina de composite, pudiendo ser debido a que la validación de este índice únicamente se realizó con la guía Vita Classical[®].

En resumen y a la vista de resultados de la validación de las fórmulas propuestas sobre la capacidad para predecir la percepción de la blancura de materiales dentales podemos afirmar que la fórmula W_{UGR} , desarrollada por optimización de los coeficientes de WIC de acuerdo con los resultados visuales de la guía Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached[®], tiene un mejor rendimiento que las fórmulas existentes publicadas y que fueron estudiadas, incluida la fórmula de blancura WIO.

Por otra parte, aunque para la fórmula propuesta $W_{LAB-UGR}$ no podamos afirmar que su rendimiento sea superior al encontrado para la fórmula WIO, debido a que sus resultados son ligeramente superiores para la guía Vitapan

Classical[®], el mayor rendimiento encontrado para el conjunto de muestras de resinas de composite y la similitud de los resultados entre éstas, nos anima a concluir que la fórmula desarrollada en nuestro laboratorio y basada en el espacio CIELAB es una excelente alternativa a los índices deducidos/desarrollados a partir del índice de blancura CIE, WIC (CIE, 1986).

4.3 Validación clínica de los índices de blancura propuestos.

Para finalizar el estudio de validación de los índices propuestos nos planteamos realizar la experiencia en condiciones usuales en clínica. Partiendo de la base que, primeramente, los resultados obtenidos en la optimización de los índices para los dos métodos de optimización fueron muy similares y, en segundo lugar, que la experiencia psicofísica es más rápida si ésta se realiza sólo para la ordenación en blancura de la guía dental Vitapan Classical[®], se optó por la validación de la eficacia de nuestros nuevos índices únicamente sobre los datos de los juicios visuales para la ordenación en blancura, de este modo podríamos contar con un mayor número de profesionales a nuestra disposición por el gran ahorro de tiempo en la experiencia psicofísica para cada observador.

Siguiendo la misma metodología empleada se procedió a la obtención del coeficiente de determinación R^2 y porcentaje de decisiones incorrectas %DI para los índices de blancura propuestos para el método de ordenación, W_{UGR1} y $W_{Lab-UGR1}$, así como para los índices seleccionados. La tabla 4.8 muestran los resultados obtenidos.

Indices	R ²	%DI
WI _{UGR1}	0.949	7.688
W _{Lab-UGR1}	0.941	8.091
WIC	0.912	8.414
WIO	0.957	7.769
Z%	0.924	10.672
WI	0.753	14.005
W* _{ab}	0.930	10.323
W* ₀₀	0.732	20.215
Tw ₃₁	0.921	9.005
Tw ₆₄	0.917	9.731
W _{uchida31}	0.873	9.005
W _{uchida64}	0.864	9.005
YID	0.866	10.538
YIE	0.871	10.107
W _{Lab}	0.929	8.387
T _{Lab}	0.878	12.070

Tabla 4.8: Resultados de la evaluación de los índices de blancura respecto a los juicios visuales de la guía Vitapan Classical[®] para experiencia en clínica.

Para una mejor comparación las figuras 4.8 y 4.9 muestran los valores del coeficiente de determinación y del porcentaje de decisiones incorrectas para la guía Vitapan Classical[®].

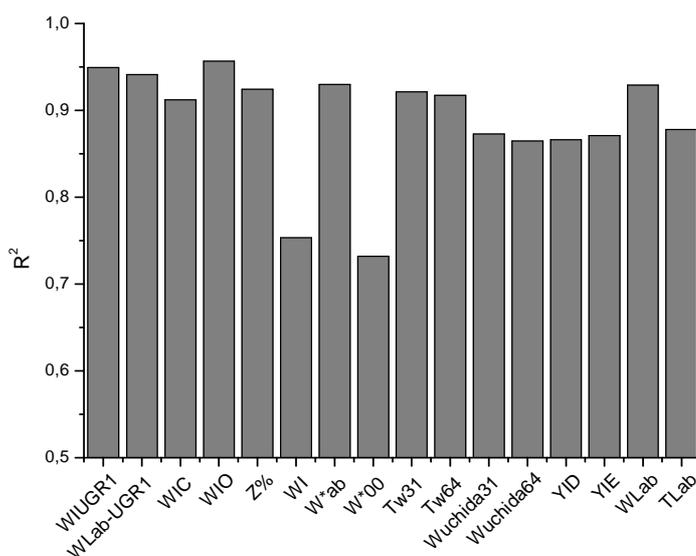


Figura 4.8: Coeficiente de determinación obtenidos para los distintos índices para experiencia en clínica

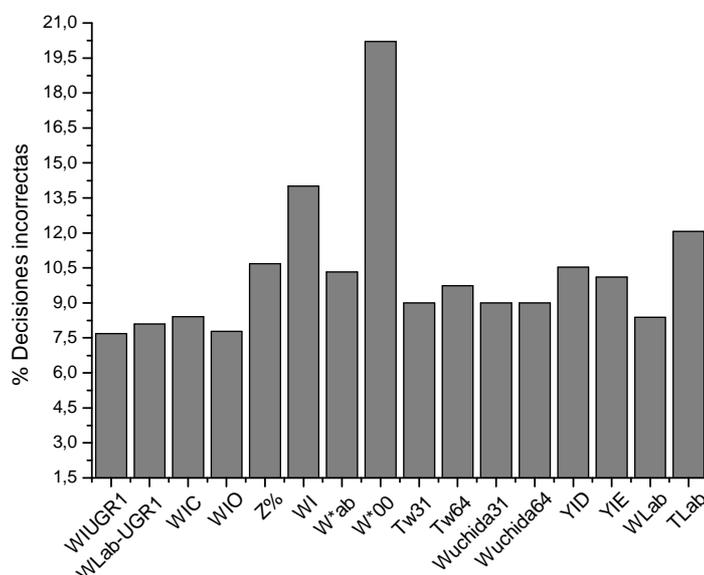


Figura 4.9: Porcentajes de decisiones incorrectas para los distintos índices con Vitapan Classical[®] para experiencia en clínica

Los resultados corroboran los obtenidos usando Vitapan Classical[®] en condiciones típica de laboratorio y desarrolladas por observadores, en su mayoría, ajenos a la clínica odontológica. Sólo cabe destacar el ligero valor superior de R^2 para el índice WIO respecto a WI_{UGR1} (0.957 frente a 0.949). No obstante, dada la similitud entre estos valores con fuertes correlaciones para ambas fórmulas, el ligero menor porcentaje de decisiones incorrectas para el índice propuesto en nuestro laboratorio y que ambas han sido desarrolladas por optimización de los coeficientes de WIC, podemos afirmar que la fórmula propuesta y desarrollada en nuestro laboratorio, WI_{UGR1} , es adecuada para predecir la percepción de la blancura en el ámbito clínico y comparable, en cuanto a rendimiento de evaluación de blancura de biomateriales dentales, a la recientemente publicada con aplicación en este campo (WIO).

Si centramos nuestro estudio en los índices basados en CIELAB, objetivo fundamental de esta Tesis doctoral, los valores obtenidos para W_{Lab} -

UGR1, índice propuesto en este espacio de color, muestran que, aunque su rendimiento es ligeramente peor que para WIO y W_{UGR1} , los valores de R^2 (0.941 frente a 0.957 para WIO y 0.949 para W_{UGR1}) y del porcentaje de decisiones incorrectas (8.094% frente al 7.689% para W_{UGR1} y 7.769% para WIO) en la ordenación en blancura son más elevados que los que presentan estas fórmulas. Por ello, consideramos que los datos obtenidos del estudio psicofísico realizado a un total de 31 observadores bajo condiciones de visión típicas de clínica demuestran que el índice de blancura $W_{Lab-UGR1}$, optimizado a partir de los datos obtenidos de las observaciones realizadas en condiciones de laboratorio y sobre la guía dental Vitapan 3D Máster[®], da un buen rendimiento cuando fue utilizado para predecir la percepción de la blancura en condiciones clínicas.

Basado también en este espacio de color, cabe señalar el bajo rendimiento obtenido para la fórmula propuesta W^*_{00} , por lo que se sigue confirmando la falta de funcionalidad del índice desarrollado a partir de CIEDE2000 para la predicción de la blancura en materiales dentales.

Finalmente, si comparamos el índice obtenido por optimización en nuestro laboratorio y el resto de índices seleccionados basados en CIELAB (W^*_{ab} y W_{Lab}), éstos presentan claramente un menor rendimiento que el índice propuesto $W_{Lab-UGR1}$. Podemos, por ello, manifestar que la fórmula desarrollada en nuestro laboratorio y basada en el espacio CIELAB es una excelente alternativa a los índices empleados, hasta la actualidad, en este espacio de color. Este resultado es de especial relevancia dado que CIELAB es el que actualmente se emplea en el ámbito odontológico como muestra la extensa bibliografía en este campo (Joiner et al, 2008) y es el utilizado en los nuevos dispositivos de análisis del color dental *in vivo*, cada vez más empleado en la práctica clínica.

4.4 Bibliografía.

- Berns RS, Alman DH, Reniff L, Snyder GD, Balonon-Rosen MR. "Visual determination of suprathreshold color-difference tolerances using probit analysis". *Color Res. Appl.* 1991; 16: 297-316.
- CIE Publication No. 15.2. *Colorimetry*. Viena: Central Bureau of the CIE; 1986. Chap. 5.3, 36-38.
- CIE Publication No. 142, "Improvement to industrial colour-difference evaluation" (CIE Central Bureau, Vienna, 2001).
- CIE Technical Report: *Colorimetry*. CIE Publication No. 15.3. CIE Central Bureau; Vienna, 2004.
- Color Science Association of Japan, Materials Committee on Specification Method of Whiteness, 1986: 1-35; 1988:1-19.
- Ganz E, Pauli HKA "Whiteness and tint formulas of the Commission Internationale de L'Eclairage: approximations in the L*a*b* color space". *Appl. Optics*. 1995; 34: 2998-2999.
- Guinea R, Pérez MM, Herrera LJ, Rivas MJ, Yebra A, Paravina RD. "Color difference thresholds in dental ceramics" *Journal of Dentistry*. 2010; 38s: e57-e64.
- Guoxin H, Zhou M. "Whiteness formula in CIELAB uniform color space" *Chinese Optics Letters*. 2007; 5(7): 432-434.
- Joiner A "Tooth colour: a review of the literature". *J. Dent.* 2004; 32 (1): S3-S12.

- Joiner A, Hopkinson I, Deng Y, Westland S “A review of tooth colour and whiteness”. J. Dent. 2008a; 36: 2-7.
- Kim DH, Nobbs JH. “New weighting functions for the weighted CIELAB colour difference formula”. Proceedings of AIC Colour 97, Kyoto, 1997; 1: 446-449.
- Luo MR, Rigg B., “Chromaticity-discrimination ellipses for surfaces colours”. Col. Res. Appl. 1986; 11: 25-42.
- Luo MR, Cui G, Rigg B., “The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000”. Col. Res. Appl. 2001; 26: 340-350.
- Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I. “Evaluation of whiteness formulae for teeth”, Proceedings of 10th Congress of the International Color Association. 2005: 839-842.
- Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I, Choung U. “Development of a whiteness index for dentistry”. J. Dent. 2009.; 37 (1): e21-e26.
- Pérez MM, Saleh A, Yebra A, Pulgar R “Study of the variation between CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 color differences of resin composites”. Dental Material Journal. 2007; 26(1): 21-28.
-
- Perez MM, Ghinea R, Herrera LJ, Ionescu A, Pomares H, Pulgar R, Paravina R. “Dental ceramics: A CIEDE2000 acceptability thresholds for lightness, chroma and hue differences” Journal of Dentistry. 2011; 39s: e37-e44.
- Uchida H. “A new whiteness formula” Color Res. Appl. 1998; 23: 202–209.

- Witt K. "Geometric relations between scales of small colour differences". Color Res. Appl. 1999; 24: 78-92.

CAPÍTULO V

5.- CONCLUSIONES

1. Se ha establecido un marco experimental basado en tres conjuntos de muestras y cuatro experimentos psicofísicos. Los tres conjuntos de muestras corresponden a la guía Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleachedin[®], la guía Vitapan Classical[®] y un conjunto de muestras manufacturadas que seguían una distribución colorimétrica basada en tolerancias de discriminación cromática en el subespacio de color dental. Las tres primeras experiencias psicofísicas se corresponden a una ordenación en condiciones de laboratorio de cada uno de los tres conjunto de muestras. La última experiencia psicofísica se correspondió con la ordenación en condiciones ambientales clínicas de la guía Vitapan Classical[®].

La primera experiencia psicofísica se usó para la optimización de los índices de blancura propuestos, y las tres siguientes para su evaluación en diferentes condiciones ambientales.

2. Se ha propuesto, por un lado, una forma funcional similar a WIC y WIO (CIE, 1986 y Luo et al., 2009) y otra adaptada a CIELAB proveniente de la forma funcional con dependencia lineal de las coordenadas cromáticas en este espacio. Por último se he ha propuesto una formulación basada en la diferencia de color CIEDE2000, como una distancia desde un punto blanco nominal a partir de $L' = L^* = 100$, $a' = (1 + G) a^* = 0$ y $b' = b^* = 0$.

3. Según las formulaciones descritas, se han empleado dos métodos distintos que denominamos Método de Ordenación y Método de Ordenación y Grado para la optimización de índices de blancura a partir de una formulación genérica dada. De acuerdo a estas dos metodologías se han calculado los índices:

$$WI_{UGR1} = Y_i 100 + 31.050 (x_n - x_i) - 7.837 (y_n - y_i)$$

$$WI_{UGR2} = Y_i 100 + 35.136 (x_n - x_i) - 9.887 (y_n - y_i)$$

$$W_{Lab-UGR1} = 0.586 L^* - 2.348 a^* - 1.201 b^*$$

$$W_{Lab-UGR2} = 0.511 L^* - 2.324 a^* - 1.10 b^*$$

y se ha propuesto el índice:

$$W^*_{00} = \left[\left(\frac{L^* - 100}{K_L S} \right)^2 + \left(\frac{C^*}{K_C S_C} \right)^2 \right]^{1/2}$$

4. Se ha realizado una comparativa completa de los índices propuestos, con un total de 11 índices altamente utilizados en la literatura. Esta comparativa se realizó utilizando tres experiencias psicofísicas extras, aparte del utilizado para la optimización de los índice, y las medidas del color de laboratorio de las muestras utilizadas (Vitapan Classical[®] y muestras manufacturadas en condiciones de laboratorio y Vitapan Classical[®] en condiciones ambientales clínicas). La comparación utilizando R² y %DI ha mostrado que los índices propuestos en esta tesis pueden representar una mejor valoración de la blancura de materiales dentales. Según los valores numéricos de estas dos magnitudes, los índices WI_{UGR1} y WI_{UGR2} han resultado ser los más precisos para valorar la blancura. Por otro lado, y debido al uso extendido del espacio CIELAB en instrumentación y gestión del color en Odontología, los índices W_{Lab-UGR1} y W_{Lab-UGR2} representan una excelente y altamente eficaz alternativa para la expresión de la blancura de materiales dentales, obteniendo, además,

un excelente rendimiento en comparación con los otros índices conocidos y utilizados sobre el mismo espacio de color CIELAB.

TRABAJO FUTURO

A la vista de los resultados y conclusiones obtenidas en esta tesis, surgen varias vías de trabajo para la profundización en el conocimiento y expresión de la apreciación subjetiva de la blancura en materiales dentales.

Por un lado, futuros trabajos deben corroborar la aptitud de los índices propuestos W_{UGR} y $W_{Lab-UGR}$ para materiales dentales en condiciones de laboratorio y en condiciones ambientales clínicas. Surgen en cualquier caso la necesidad también de evaluar otras posibles formulaciones de blancura que pudiesen resultar más óptimas. La expresión utilizada por los índices $W_{uchida31}$ y $W_{uchida64}$ abre la puerta a formulaciones más complejas (ecuación de orden 2) para la expresión de la blancura, cuya optimización sobre experimentos de medición y psicofísicos complejos puede proporcionar buenas alternativas a los índices ya propuestos en la literatura, y en esta tesis, para materiales dentales.

Otro de los ámbitos de trabajo sobre los que se desea trabajar, muy relacionado con la temática desarrollada en esta tesis, y en el que el grupo de investigación tiene gran experiencia, es la obtención de umbrales de discriminación de blancura. Esta tarea es enormemente compleja en el subespacio de color dental debido a la dificultad en la identificación y comparación de la blancura. Sin embargo este tipo de medidas pueden ser de gran ayuda en la industria manufacturera de materiales dentales, así como en otras industrias como la textil etc. debido a la importancia, ya comentada, de la blancura en gran cantidad de disciplinas industriales estéticas.

Resultados de juicio visual de un observador del panel de la primera experiencia realizada con la guía dental Vitapan 3D Master[®] con Vita Bleached[®].

Observador 1	
De mas blanco a menos	Grado diferencia en blancura de 0 a 4
OM1	
OM3	1
OM2	1
1M1	2
2M1	1
1M2	2
2M2	1
2L 1,5	1
3M1	1
2R 1,5	1
3L 1,5	1
3M2	2
2M3	1
3R 1,5	2
4M1	1
4L 1,5	1
2R 2,5	1
2L 2,5	1
3L 2,5	2
3M3	2
3R 2,5	1
4M2	1
4R 1,5	2
5M1	1
4M3	1
5M2	1
4R 2,5	0
4L 2,5	1
5M3	3

- 0: exactamente iguales
 1: poco diferentes
 2: diferentes
 3: muy diferentes
 4: absolutamente diferentes