

Mapeo cromático dental a partir de imágenes digitales

Josué González Sandoval

**Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara
peyken20@gmail.com**

Montserrat Stephania Martínez Alvarez

**Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara
monse-mtz21@hotmail.com**

Patricia Alejandra Brand Rubalcava

**Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara
paty.brand55@gmail.com**

Sulema Torres-Ramos

**Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara
sulema.torres@cucei.udg.mx**

Israel Román-Godínez

**Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara
israel.roman@cucei.udg.mx**

E. Gerardo Mendizabal-Ruiz
Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara
gerardo.mendizabal@red.cucei.udg.mx

Resumen: El mapeo cromático dental es una técnica que consiste en la estimación de las características ópticas de la dentadura del paciente. Su objetivo es crear un mapa de tonalidades que facilite, al especialista, la elección de resinas o cerámicas a utilizar en la restauración de piezas dentales. Actualmente, el mapeo cromático se realiza comparando directamente la dentadura del paciente contra una guía de colores. Dicho procedimiento se ve afectado por diferentes factores como: condiciones ambientales, características del paciente, percepción del especialista, entre otras, lo que involucra un alto grado de subjetividad. En el presente trabajo se describe un método para el mapeo cromático dental a partir de imágenes digitales. El principal objetivo de esta propuesta es reducir la subjetividad en la selección de los materiales para la reconstrucción de piezas dentales, y en un futuro, desarrollar una herramienta que realice este trabajo automáticamente.

Palabras Clave: Mapeo cromático dental, visión computacional, escala VITA.

Tooth Shade-Matching from Digital Images

Abstract: The tooth shade-matching is a technique that involves estimating the optical characteristics of the patient's teeth. It aims to create a map of colors that facilitate the specialist, the choice of resins or ceramics used in the restoration of teeth. Currently, the color mapping is performed by comparing directly the patient's teeth against a color guide. This procedure is affected by different factors such as environmental conditions, patient characteristics, perception of the specialist, among others, which involves a high degree of

subjectivity. In this paper a method for mapping tooth color from digital images is described. The main objective of this proposal is to reduce subjectivity in the selection of materials for the reconstruction of teeth, and in the future, develop a tool to do this job automatically.

Keywords: Tooth Shade-Matching, Computer Vision, VITA Scale

1. Introducción

La odontología es la ciencia médica encargada de la prevención, diagnóstico y tratamiento de las enfermedades del aparato estomatognático, el cual está formado por el conjunto de órganos y tejidos que se encuentran en la cavidad oral, incluyendo dientes y encías.

Una de las áreas importantes de la odontología es la restauración dental, que consiste en la reparación total o parcial de piezas dentales dañadas, mediante el uso de diversos materiales como metal, resinas o cerámicas (Moscardó y Alemany, 2006). Para obtener los resultados biológicos, mecánicos y estéticos esperados, además del uso de materiales diseñados específicamente para dicha reconstrucción, es necesaria la determinación adecuada de las propiedades y características ópticas de los dientes (Joiner, 2004), incluyendo su forma, textura y color (Moscardó y Alemany, 2006).

1.1 Mapeo cromático dental

El mapeo cromático dental consiste en la estimación de las características ópticas de la pieza dental que se pretende restaurar, tomando como base la dentadura del paciente, específicamente el diente par de la pieza dañada. El mapa cromático generado es un mapa de tonalidades del diente, que facilita al especialista la elección de resinas o cerámicas a utilizar para la restauración del mismo, y lograr así la mayor naturalidad posible (García, 2011).

Generalmente, el diente par de la pieza a restaurar es dividido en tres secciones principales (cervical, media e incisal) (Fig. 1), y es comparado directamente con una guía de colores que representan las tonalidades disponibles de los materiales. Para cada una de estas secciones se asigna el valor de color en la guía, de acuerdo al promedio de toda el área de la sección (Garcia, 2011). Las guías de color ofrecen al odontólogo una escala para seleccionar las tonalidades de los materiales a emplear, así como una forma eficiente para solicitar estos materiales a los laboratorios. Aunque no existe una guía de colores que reproduzca todas las tonalidades presentes en los dientes naturales, sí están disponibles en el mercado algunas guías de color, que resultan bastante útiles.



Figura 1.

Ejemplo de la división estándar de la superficie del diente en tres secciones.

Crédito: <http://auxiliarodontologia.blogspot.mx/2013/02/la-superficie-dentaria.html>

1.1.1 Escala de color VITA

La escala VITA, con más de cincuenta años de uso, es una guía de color usada en los procedimientos que involucran reconstrucción dental. La mayoría de las resinas dentales comerciales disponibles emplean la clasificación VITA (Fig. 2). Esta escala utiliza dos parámetros para la estimación de los colores:

matiz y valor. El matiz o tono, es una de las propiedades fundamentales de los colores y se refiere a la percepción de las diferentes longitudes de onda de la luz visible. Por otro lado, el valor se refiere a la cantidad de luz que es reflejada por un objeto de un determinado matiz (Vicario, 1999). En los dientes, el matiz y el valor son características que dependen de la dentina, tejido elástico mineralizado con túbulos que albergan odontoblastos y que además, está compuesta en su mayoría por cristales de hidroxiapatita, colágeno, agua, proteínas y lípidos(García, 2011). En la escala VITA, el matiz se codifica con una sola letra; A: amarillo marronado, B: amarillo, C: gris y D: rosa grisáceo). Por otro lado, el valor es un rango que va de 1 a 4, en donde el 1 corresponde al valor más claro, y el 4 al más oscuro (Propdental, 2105). La combinación de los cuatro posibles matices (A, B, C, D) con los cuatro posibles valores (1, 2, 3, 4) nos dan como resultado 16 posibles combinaciones en la guía de colores de VITA (Fig. 2).



Figura 2.

Ejemplo de la escala de color VITA.

Crédito: <http://teethwhiteningperth.net.au/results/take-home/>

1.2 Subjetividad en el mapeo cromático dental

En general, el mapeo cromático dental es un proceso que se realiza de manera subjetiva, ya que la elección de la resina o cerámica a utilizar depende de la percepción del odontólogo, quien es el encargado de determinar cuál de las muestras de la guía se asemeja más al diente en cuestión, con base en la

luminosidad de los colores. Dicha subjetividad, y la necesidad de encontrar métodos que aproximen de una manera más precisa las propiedades cromáticas de los dientes, han impulsado la generación de instrumentos electrónicos que faciliten y agreguen objetividad, en el proceso de elección de los materiales a utilizar para la reconstrucción del diente.

Actualmente existen en el mercado diversos equipos que pueden ser utilizados para la estimación de las características de dichos materiales (Núñez Díaz y del Río Highsmith, 2007). Algunos equipos toman una muestra en puntos específicos del diente, requiriendo así varias lecturas para apreciar las variaciones de color en las diferentes regiones del mismo (ej., Digital Shade Guide, el Easy Shade y el ShadeEye-NCC). Otros equipos realizan una lectura extensa captando toda la superficie del diente, y mediante un software especializado realizan el mapeo cromático, el cual suele ser muy detallado y facilita la selección de resinas a utilizar (ej., IKAM, el Shadescan, el Shadevision y el Spectroshade (Cortez, Caldera, Ramírez, Liliana, y González, 2005)). Sin embargo, una de las principales desventajas de estos equipos es su elevado costo, lo que impide que muchos especialistas cuenten con uno en su consultorio.

En este artículo se presentan los avances en investigación y desarrollo de un método para el mapeo cromático dental, a partir de imágenes digitales tomadas con una cámara digital convencional, que permita reducir la subjetividad en la selección de los materiales para la reconstrucción de piezas dentales, y en un futuro, desarrollar una herramienta que realice este trabajo automáticamente.

2. Método propuesto

El método propuesto consta de dos partes: caracterización de los colores de la escala VITA y clasificación de píxeles de acuerdo con la escala VITA, mismas que se describen a continuación.

2.1 Caracterización de colores de la escala VITA

Debido a que la empresa VITA solo proporciona los muestrarios de resinas disponibles, y no entrega información cuantitativa de los colores en dicha escala, es necesario llevar a cabo la caracterización de cada uno de los colores en el muestrario. Este procedimiento consiste en utilizar la imagen digital de uno de los muestrarios (Fig. 2) y extraer 16 sub-imágenes, una por cada región central de las 16 combinaciones posibles entre matiz y valor (Fig. 3). El resultado son 16 imágenes M_i , $i \in [1, 2, \dots, 16]$ en un espacio de color RGB (8 bits por canal, para un total de 24 bits) que contienen, en sus píxeles, la distribución de color de cada una de las muestras. A cada una de las sub-imágenes se le asigna la etiqueta correspondiente a la clave VITA (ej. A1, B4, C3, etc.). Para cada subimagen se calcula la distribución de niveles de intensidad RGB (R para rojo, G para verde y B para azul), mediante el cómputo de histogramas de intensidad; uno por cada canal de color. El número de intervalos de clase utilizado para el cómputo de cada histograma es $n = 256$, debido a que es el número posible de valores que podemos tener para cada canal. Cada uno de los histogramas es normalizado utilizando como norma el número total de píxeles de cada subimagen. Finalmente, los tres histogramas, correspondientes a cada una de las 16 sub-imágenes, son concatenados para formar un vector $D_i \in R^{(n \times 3)}$ que representa la caracterización de cada una de las opciones de color de resina de la escala VITA. La figura 4 describe el flujo de este proceso de caracterización de manera visual.

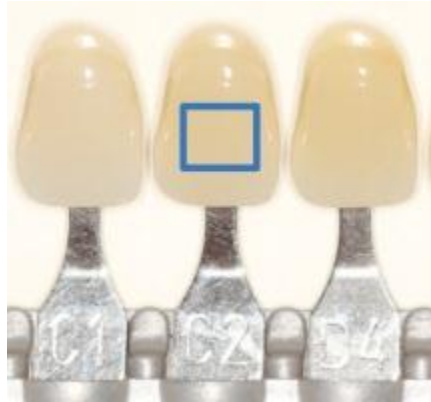


Figura 3.

Ejemplo de área seleccionada para la obtención de muestra a partir de la escala VITA.

Crédito: <http://teethwhiteningperth.net.au/results/take-home/>

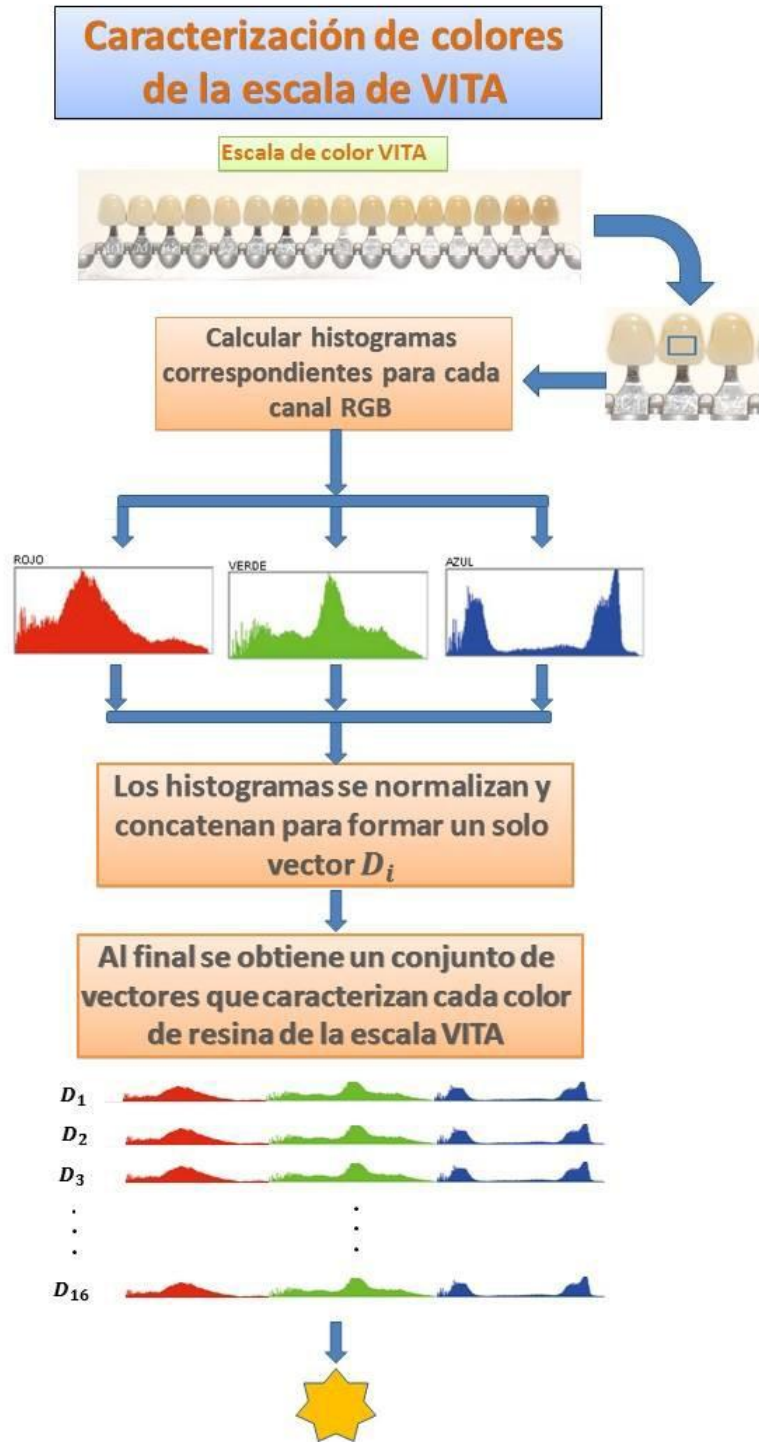


Figura 4.

Descripción del proceso de caracterización de colores de la escala VITA.

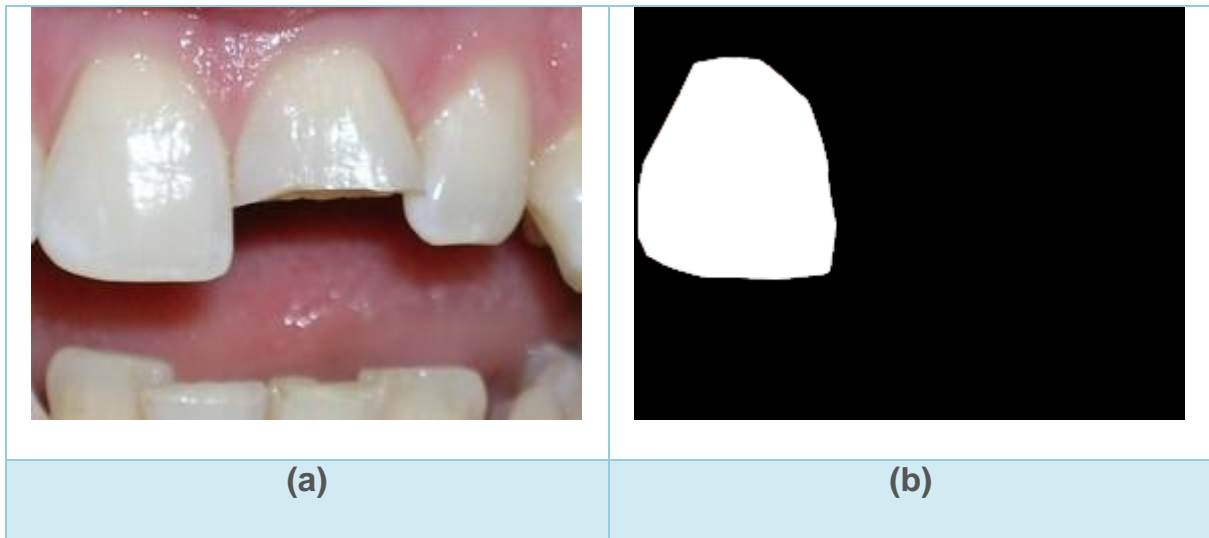


Figura 5.

Ejemplo de (a) fotografía digital de la boca de un paciente y (b) la máscara binaria correspondiente al diente seleccionado para el mapeo cromático.

2.2 Clasificación de píxeles de acuerdo con la escala VITA

Una vez que se cuenta con la caracterización de color de cada resina, el mapeo cromático dental se lleva a cabo a partir de una imagen digital F , que corresponde a una fotografía digital de la dentadura del paciente (Fig.5(a)). De la imagen F se elige el diente par de la pieza dañada, en caso de no existir éste, se elige el más cercano en distancia.

Para realizar el mapeo cromático con el diente elegido es necesario contar con una máscara binaria H , en donde los píxeles en blanco (con valor positivo) indiquen la región del diente seleccionado (Fig. 5(b)). Para cada uno de los píxeles $F(i, j)$ para los cuales $H(i, j) = 1$ se calcula la distribución de intensidad de los píxeles dentro de una ventana cuadrada de tamaño w centrada en el píxel (i, j) . Esto, al igual que en la fase de caracterización de colores de la escala VITA, se lleva a cabo por medio del cómputo de los histogramas normalizados para cada canal de color RGB. Nuevamente, los histogramas son

concatenados para formar un vector $V_x \in R^{(n \times 3)}$ para cada uno de los pixeles $x \in w \times w$ dentro del área seleccionada con la máscara. Para definir cuál es el color de resina de la escala VITA que se asignará a cada uno de los pixeles, se hace un agrupamiento de los vectores V_x resultantes. Para esto se utiliza el método de las *k-medias* o algoritmo de Lloyd (Lloyd, 1982) debido a que es uno de los métodos de agrupamiento no supervisados más sencillos de utilizar y que ha demostrado ser muy útil en diferentes aplicaciones de visión computacional (ej., (Deng y cols., 2009; Lee, Ho, Yang, y Kriegman, 2003; Nowozin, Tsuda, Uno, Kudo, y Bakir, 2007)). El resultado de este procedimiento es un índice para cada uno de los vectores V_x , el cual corresponde al grupo en donde se determinó la pertenencia de dicho vector. Para cada uno de los centroides $C_y \forall y \in \{1, 2, \dots, k\}$, calculados mediante el algoritmo de *k-medias*, se determina cuál de los vectores que describen los colores de la escala VITA D_i es más cercano por medio del cálculo de la distancia Euclidiana:

$$d(C_y, D_i) = \sqrt{\sum_{z=1}^{n \times 3} (C_y(z) - D_i(z))^2}.$$

Ecuación 1.

Finalmente, se genera una imagen en donde a cada uno de los pixeles que cumplen con la condición $H(i, j) = 1$, se le asigna una etiqueta correspondiente a las opciones de la escala VITA, de acuerdo con el resultado de la clasificación. La figura 6 describe el flujo de este proceso de manera visual.

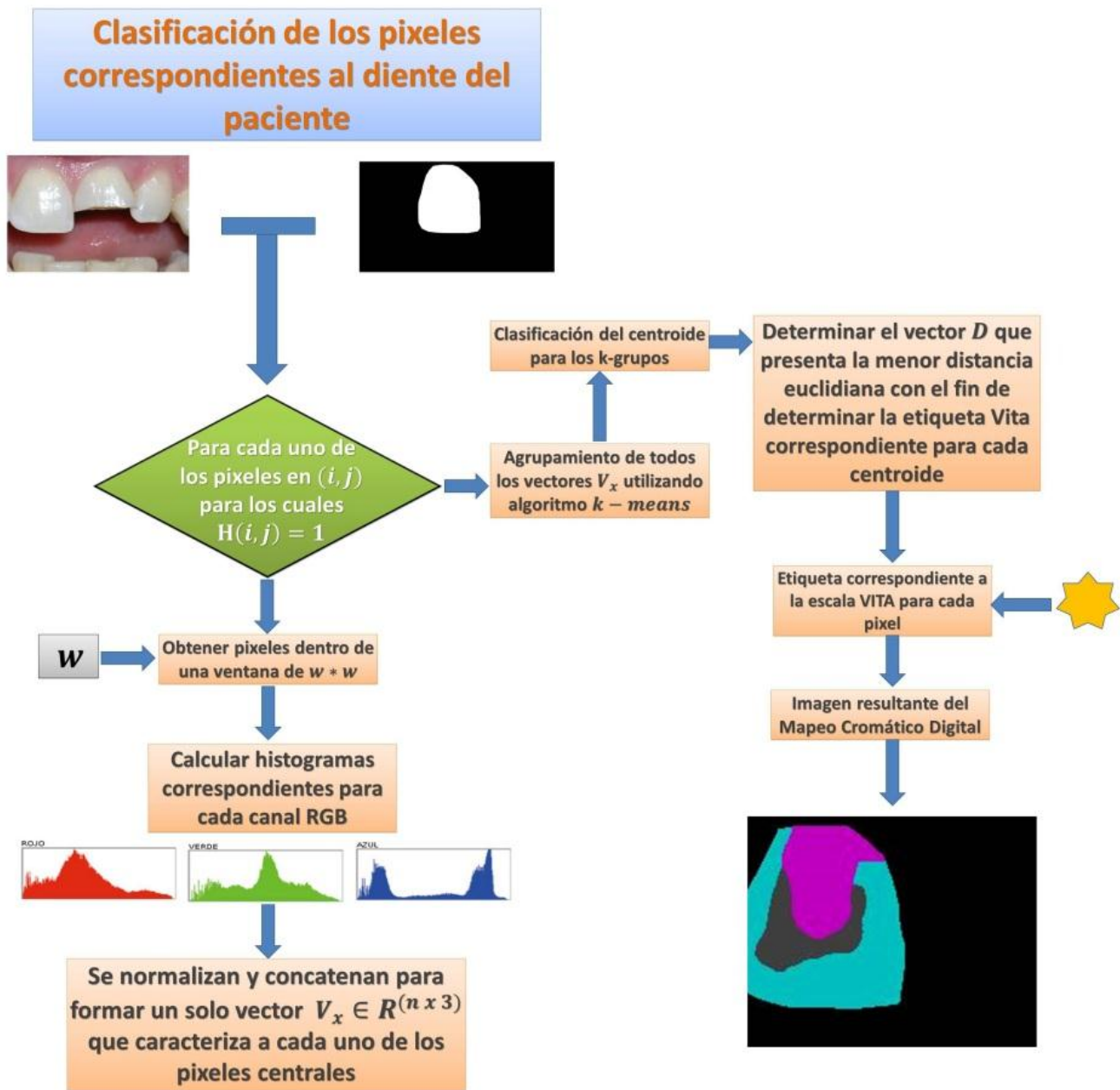


Figura 6.

Descripción del proceso de clasificación de pixeles de acuerdo a escala VITA.

3. Resultados y discusión

Para probar el funcionamiento del método propuesto, y evaluar el impacto de las variables en el desempeño de éste, se implementó el método utilizando la plataforma Matlab. Se llevaron a cabo pruebas de mapeo cromático dental utilizando diferentes tamaños de ventana $w = \{3, 5, 7, 9\}$ y diferente número de grupos $k = \{2, 3, 4, 5, 6\}$. En el método propuesto, el valor de w determina el número de píxeles vecinos que son considerados para llevar a cabo la clasificación de cada píxel del diente, mientras que el valor de k corresponde al número de resinas diferentes que se desea emplear para la reconstrucción.

La figura 7 muestra los resultados del mapeo cromático utilizando diferentes tamaños de ventana (w) y un valor de $k = 2$, lo que equivale a la utilización de dos colores de resina de la escala VITA. Podemos observar que conforme se incrementa el tamaño de ventana, las regiones correspondientes a cada color de resina a utilizar, son más homogéneas y están mejor separadas.

La figura 8 muestra los resultados utilizando un valor de $k = 3$. En esta figura podemos observar que el comportamiento en cuanto a la homogeneidad y separación de las regiones es similar al del caso anterior. Sin embargo, cabe hacer notar que a medida que el tamaño de w es menor, algunas regiones pequeñas tienen asignado un color de resina que va cambiando conforme se incrementa dicho valor, esto se debe a que cuando se utiliza un valor pequeño para w , cuando el valor de w es mayor. Esto ocasiona que las distribuciones de los niveles de intensidad que caracterizan cada píxel del diente sean distintas, por lo tanto, es probable que se elijan diferentes colores de resina.

Cuando se utiliza un valor menor para w , se consideran menos vecinos para el cálculo de los histogramas, a diferencia de cuando se incrementa dicho valor, lo que genera una diferencia en la distribución de los niveles de intensidad, que resulta más aproximado a una de las opciones de resina en comparación de cuando se utilizan valores de w más grandes.

La figuras 9 y 10 muestran los resultados utilizando valores de $k = 4$ y $k = 5$ respectivamente. Podemos observar que el comportamiento del método, en cuanto a la homogeneidad y separación de las regiones, se mantiene. Sin embargo para el caso donde $w = 9$, se observan cambios de resina seleccionada. Esto se puede explicar de la misma manera que el caso anterior.

La figura 11 muestra los resultados utilizando un valor de $k = 6$. En este experimento se observa lo complejo que sería realizar la reconstrucción utilizando 6 colores de resina para un tamaño de ventana $w = 3$, y como dicha complejidad disminuye cuando se incrementa el tamaño de la ventana w .

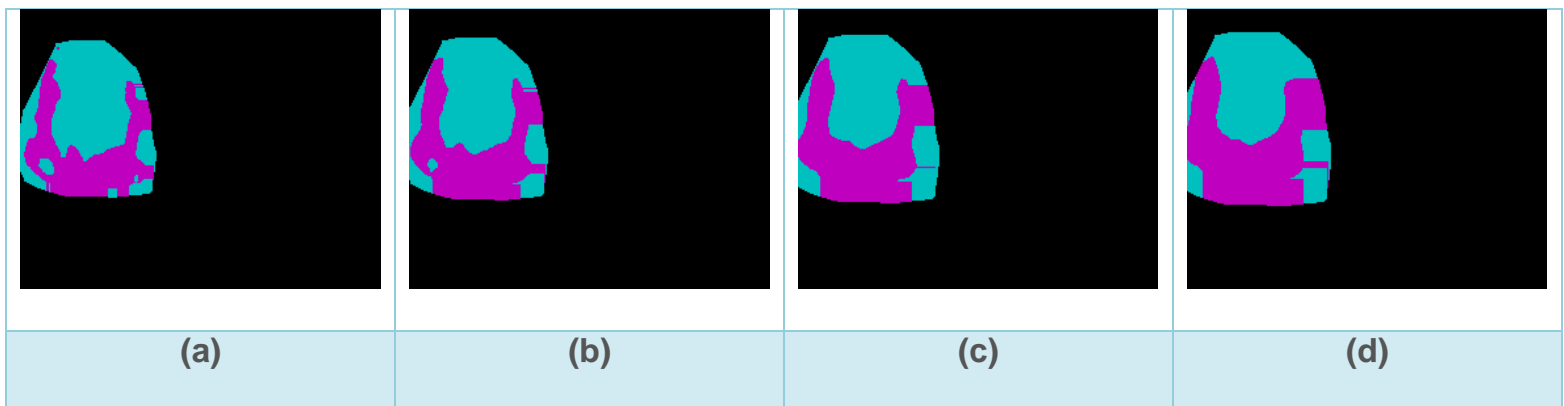


Figura 7.

Ejemplo de resultado del método propuesto para mapeo cromático utilizando $k = 2$ con tamaños de ventana (a) $w = 3$, (b) $w = 5$, (c) $w = 7$ y (d) $w = 9$.



Figura 8.

Ejemplo de resultado del método propuesto para mapeo cromático utilizando $k = 3$ con tamaños de ventana (a) $w = 3$, (b) $w = 5$, (c) $w = 7$ y (d) $w = 9$.

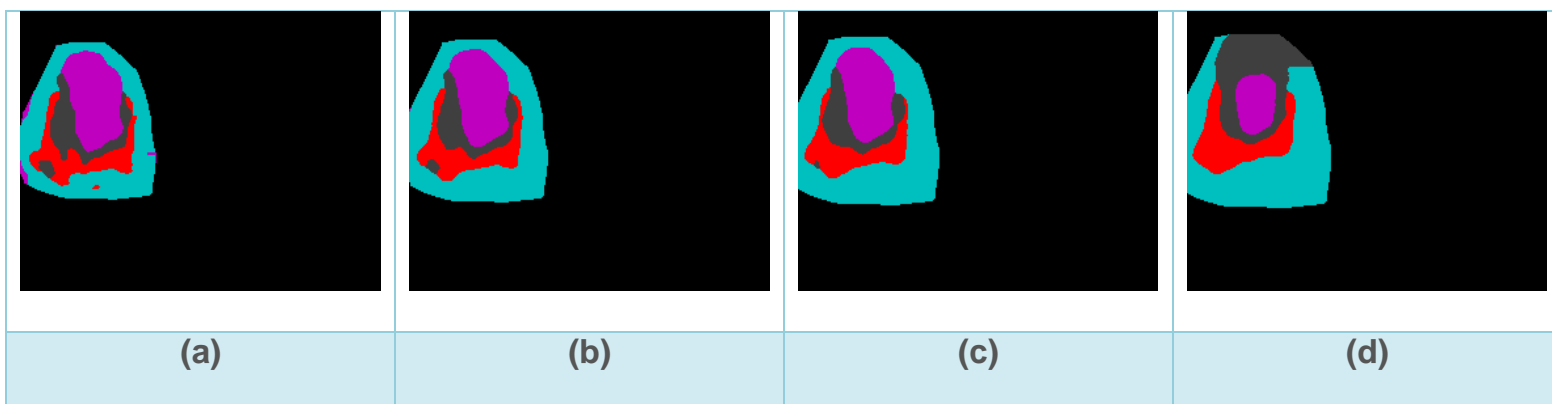


Figura 9.

Ejemplo de resultado del método propuesto para mapeo cromático utilizando $k = 4$ con tamaños de ventana (a) $w = 3$, (b) $w = 5$, (c) $w = 7$ y (d) $w = 9$.

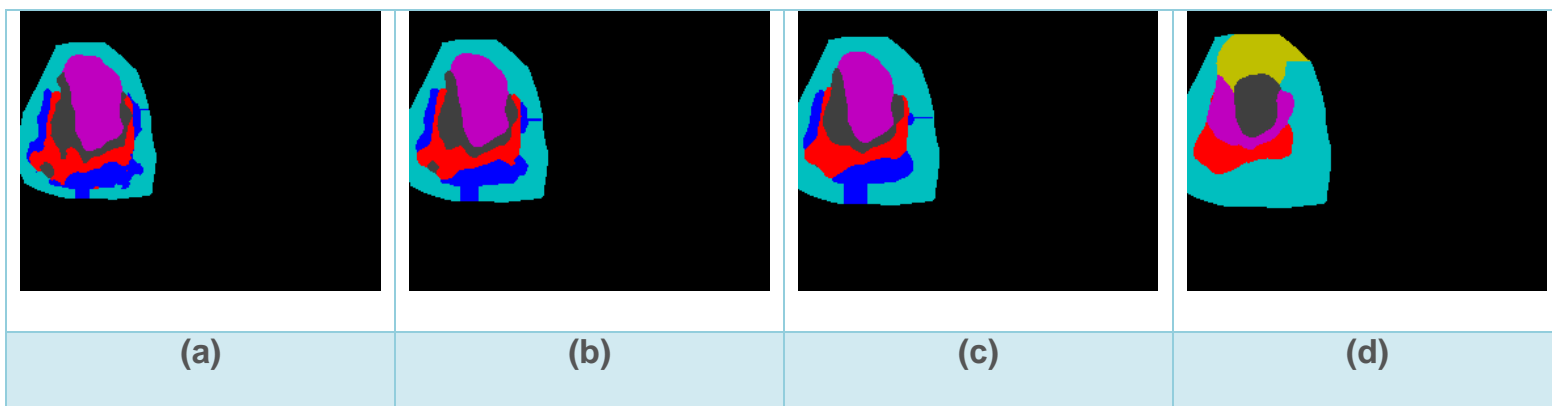


Figura 10.

Ejemplo de resultado del método propuesto para mapeo cromático utilizando $k = 5$ con tamaños de ventana (a) $w = 3$, (b) $w = 5$, (c) $w = 7$ y (d) $w = 9$.

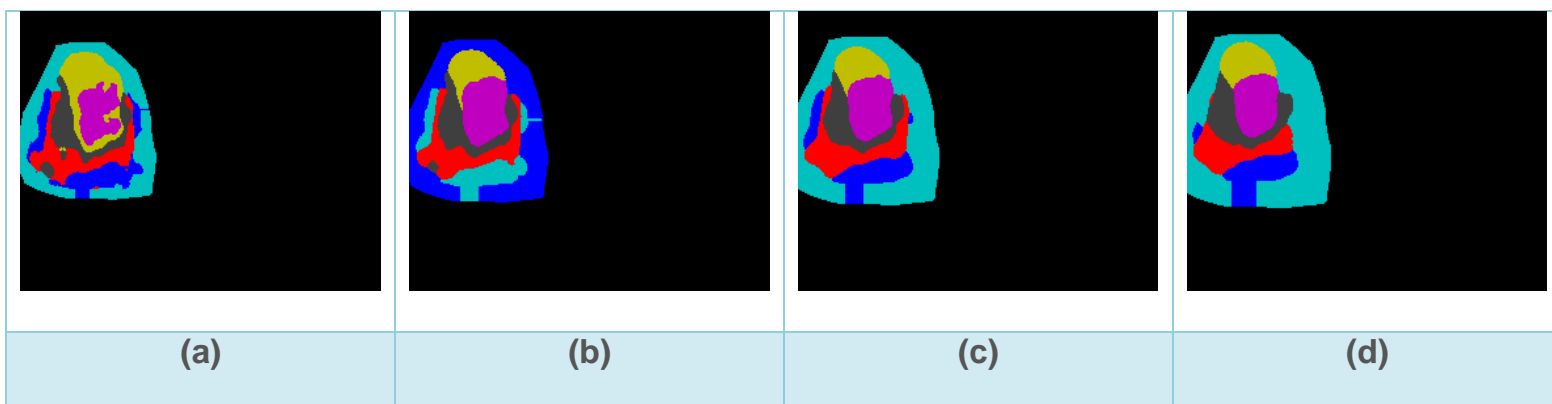


Figura 11.

Ejemplo de resultado del método propuesto para mapeo cromático utilizando $k = 6$ con tamaños de ventana (a) $w = 3$, (b) $w = 5$, (c) $w = 7$ y (d) $w = 9$.

4. Conclusión y trabajo futuro

De los experimentos de la sección anterior podemos concluir que, a medida que incrementa el valor de k , mayor es el detalle que se puede lograr en la reconstrucción, sin embargo, esto requiere de un trabajo más elaborado por parte del especialista que la llevará a cabo. También se puede observar una consistencia en el color de resina elegido por nuestro método, utilizando diferentes valores de k . No obstante, las variaciones que se presentan en algunos casos, es debido a que a menor número de k , mayor es el número de píxeles a considerar en una región. Esto ocasiona que se tenga que utilizar un color de resina que sea cercana a todos los píxeles involucrados en dicha región. Conforme aumenta el número de resinas posibles a utilizar, las regiones para las que se debe elegir un color de resina son más pequeñas, y por lo tanto, el color asignado puede variar en comparación al uso de k con menor valor.

Una de las ventajas del método de mapeo cromático propuesto es que no se necesita hacer la sub-división del diente como en el método manual, ya que este algoritmo provee de un mapa más detallado y no tiene límite de regiones. Otra de las ventajas importantes de nuestro método es que disminuye el grado de subjetividad de los mapeos cromáticos manuales, debido a que los resultados dependen de una comparación cuantitativa precisa de la distribución de intensidad para cada uno de los canales de color, mediante el análisis de la escala VITA y del diente en cuestión.

Las limitaciones principales del método propuesto tienen que ver con las condiciones de iluminación, las cuales pueden ser un factor importante que determine la calidad de los resultados. Para medir este impacto es necesario hacer una comparación contra la clasificación efectuada por uno o más expertos.

El trabajo futuro incluye la validación del método propuesto, mediante la comparación de mapeos cromáticos dentales realizados por especialistas y por equipo comercial, así como explorar otros métodos de clasificación y agrupamiento. Por otro lado, se pretende analizar el desempeño del método propuesto utilizando diferentes escalas de color (ej. la escala Trubyte Bioform) y explorar distintas formas de caracterizar los colores en las diferentes escalas.

Es importante mencionar que para la generación de estos resultados se utilizó una máscara H generada manualmente. El cómputo automático de la segmentación del diente a utilizar es también trabajo futuro.

Una vez que el método propuesto sea semi o totalmente automático, se pretende desarrollar una herramienta de software que utilice dicho método, permitiendo reducir la subjetividad, en la selección de los materiales a utilizar, para la reconstrucción de las piezas dentales.

Agradecimientos

Agradecemos a Nathali Ruvalcaba Gil por su aporte intelectual en el planteamiento del problema. S. Torres, I. Román y G. Mendizabal agradecen a CONACYT y PRODEP por el apoyo otorgado.

Referencias

Cortez, J. I., Caldera, J. M., Ramírez, A., Liliانا, C., y González, M. F. (2005). 3 d reconstruction of dental pieces with data acquisition by the system apsed. En Proceedings of the 9th wseas international conference on computers (p. 120).

Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., y Fei-Fei, L. (2009). Imagenet: A large-scale hierarchical image database. En Computer vision and pattern recognition, 2009. cvpr 2009. ieee conference on (pp. 248–255).

García, E. J. (2011). Color y características ópticas para restauraciones estéticas de dientes anteriores. *Acta Odontológica Venezolana*, 49 (4).

Joiner, A. (2004). Tooth colour: a review of the literature. *Journal of Dentistry*, 32, 3–12.

Lee, K.-C., Ho, J., Yang, M.-H., y Kriegman, D. (2003). Video-based face recognition using probabilistic appearance manifolds. En *Computer vision and pattern recognition, 2003. proceedings. 2003 IEEE computer society conference on* (Vol. 1, pp. 1–313).

Lloyd, S. P. (1982). Least squares quantization in pcm. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 28 (2), 129–137.

Moscardó, A. P., y Alemany, I. C. (2006). Odontología estética: Apreciación cromática en la clínica y el laboratorio. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, 11, E363–8.

Nowozin, S., Tsuda, K., Uno, T., Kudo, T., y Bakir, G. (2007). Weighted substructure mining for image analysis. En *Computer vision and pattern recognition, 2007. cvpr'07. IEEE conference on* (pp. 1–8).

Núñez Díaz, P., y del Río Highsmith, J. (2007). Estudio comparativo entre sistemas de medición del color en odontología (espectrofotometría). *Gaceta Dental: Industria y Profesiones*(179), 164–175.

Pajares Martinsanz, G., y De la Cruz García, J. M. (2001). *Visión por computador, imágenes digitales y aplicaciones*. España: Alfaomega.

Propdental. (2105). Toma de color en prótesis dental. <https://www.propdental.es/blog/estetica-dental/toma-de-color-en-protesis-dental/>. ([Online; accesado 10-July-2015])

Vicario, C. U. (1999). *Neurobiología de la visión* (Vol. 51). Univ. Politèc. de Catalunya.

Notas biográficas:

Josué González Sandoval Recibió el grado de Técnico en Informática en 2011 en el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 32 en Yahualica, Jalisco. Actualmente es estudiante de séptimo semestre en la licenciatura en Ingeniería Biomédica en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Su área de investigación es el análisis de imágenes médicas mediante algoritmos de visión computacional.

Montserrat Stephania Martínez Alvarez Obtuvo el grado de bachiller en el Bachillerato General por Competencias con área optativa especializante en Instalaciones Eléctricas Residenciales por parte de la Universidad de Guadalajara. Actualmente estudia la licenciatura en Ingeniería Biomédica en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Realiza su servicio social dentro del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE). Sus áreas de interés es el diseño electrónico de dispositivos así como interfaces de potencia.

Patricia Alejandra Brand Rubalcava Licenciada en Psicología Humanista por la Universidad La Concordia en Aliat Universidades. Actualmente es estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Biomédica en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías en la Universidad de Guadalajara y prestadora de Servicio Social en el Apoyo a proyectos de Investigación en Biología Teórica.

Sulema Torres-Ramos Licenciada en Informática por la Universidad Autónoma de Sinaloa (2004). Maestra en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (2006). Doctora en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (2010). Actualmente es Profesora Investigadora del Departamento de Ciencias Computacionales de la Universidad de Guadalajara y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel C). Líneas de Investigación: Lingüística Computacional, Procesamiento Automático de Textos, Machine Learning.

Israel Román-Godínez Ingeniero en Sistemas por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (2004). Maestro en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (2007). Doctor en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (2011). Actualmente es Profesor Investigador Titular del Departamento de Ciencias Computacionales de la Universidad de Guadalajara. Líneas de Investigación: Machine Learning, Reconocimiento de Patrones, Bioinformática.

E. Gerardo Mendizabal-Ruiz Recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 2003 por el ITESO. En 2007 recibió el grado de Maestro en Computación y Matemáticas Industriales por el Centro de Investigación en Matemáticas y en 2012 obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Computación por la Universidad de Houston, TX. Actualmente es Profesor Investigador Titular del Departamento de Ciencias Computacionales de la Universidad de Guadalajara y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel C). Dentro de sus proyectos de investigación se encuentran temas relacionados con la visión computacional, realidad virtual

y aumentada, el análisis de secuencias de DNA, la generación de metabolismos artificiales y música evolutiva.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.