

RECIBIDO: 06/12/2025, ACEPTADO: 28/03/2026. págs. 52-81
<https://doi.org/10.53766/ROLA/2026.21.e.03>

TRABAJO ORIGINAL

COMPARACIÓN DE LA PRECISIÓN DEL COLOR EN DIENTES NATURALES MEDIANTE IMÁGENES CAPTURADAS CON CÁMARAS MIRRORLESS

de tres marcas empleando la técnica
de polarización cruzada

*Comparison of color accuracy in natural teeth using images captured
with mirrorless cameras from three brands (Canon, Nikon, and Sony)
using the cross-polarization technique*

POR

TULIO COVAULT¹
OSCAR MORALES²
DARÍO SOSA³

1. Odontólogo. Residente del Postgrado de Rehabilitación Bucal. Facultad de Odontología, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. tcovault@gmail.com
 orcid.org/0009000582391141
 2. Profesor Titular. Postgrado de Rehabilitación Bucal, Facultad de Odontología, Universidad de Los Andes. geode.ula@gmail.com
 orcid.org/0000-0002-0879-6555
 3. Profesor del Dpto. de Investigación, Facultad de Odontología, Universidad de Los Andes. dariososa@gmail.com
 orcid.org/0000-0001-6202-097x dariososa@gmail.com
- Autor de correspondencia:** Tulio Covault. Av. Capanaparo esquina calle Caroní local 3. Fundalara. Barquisimeto. orthoin.adm@gmail.com. Teléfono: +58 424-5242691
- Cómo citar:** Covault T, Morales O, Sosa D. Comparación de la precisión del color en dientes naturales mediante imágenes capturadas con cámaras mirrorless de tres marcas empleando la técnica de polarización cruzada. Rev Odontol Los Andes. 2026. Número Especial: 52-81.



Resumen

La coincidencia precisa del color dental es un desafío en odontología restauradora. La subjetividad del método visual ha impulsado el desarrollo de técnicas digitales más objetivas, como la espectrofotometría y la fotografía profesional con polarización cruzada. Sin embargo, no se encontraron estudios comparativos entre cámaras mirrorless de uso comercial. Comparar la precisión del color en dientes naturales mediante imágenes capturadas con tres cámaras mirrorless (Canon R50, Nikon Z30 y Sony a6400), empleando la técnica de polarización cruzada, tomando como referencia un espectrofotómetro. Se evaluaron 27 participantes con incisivos centrales superiores sanos. Se realizaron tres lecturas espectrofotométricas por paciente y tres tomas fotográficas por cámara. Las imágenes fueron convertidas al sistema CIELab y se calcularon los valores ΔE para determinar la diferencia cromática. Se aplicaron el ANOVA de medidas repetidas, la prueba de Mauchly y pruebas post hoc. La cámara Sony a6400 presentó los valores de ΔE más cercanos al espectrofotómetro ($\Delta E = 2.82$), dentro del umbral de aceptabilidad clínica (<3.2). Canon R50 y Nikon Z30 mostraron diferencias superiores, consideradas clínicamente inaceptables. La Sony a6400 demostró mayor precisión cromática en comparación con las otras cámaras evaluadas. Su uso, bajo protocolo estandarizado, representa una alternativa viable para la reproducción objetiva del color dental en contextos clínicos.

PALABRAS CLAVE: Espacio CIELab, Cámaras digitales, Cámara Mirrorless, Color dental, Espectrofotómetro.

Abstract

Accurate dental shade matching remains a challenge in restorative dentistry. The subjectivity of visual methods has driven the development of more objective digital techniques, such as spectrophotometry and professional photography with cross-polarization. However, no comparative studies involving commercially available mirrorless cameras have been reported. To compare the color accuracy in natural teeth using images captured with three mirrorless cameras (Canon R50, Nikon Z30, and Sony a6400), employing the cross-polarization technique and using a spectrophotometer as reference. Twenty-seven participants with healthy maxillary central incisors were evaluated. Each subject underwent three spectrophotometric readings and three photographic captures per camera. The images were converted to the CIELab system, and ΔE values were calculated to determine chromatic differences. Repeated measures ANOVA, Mauchly's test of sphericity, and post hoc analyses were applied. The Sony a6400 camera generated ΔE values closest to the spectrophotometer ($\Delta E = 2.82$), falling within the clinical acceptability threshold (<3.2). Canon R50 and Nikon Z30 showed higher differences, considered clinically unacceptable. The Sony a6400 showed a superior chromatic accuracy compared to the other cameras evaluated. Its use, under standardized protocols, represents a reliable alternative for objective dental color reproduction in clinical settings.

KEYWORDS: CIELab color space, digital cameras, mirrorless camera, dental color.

Introducción

El color puede ser analizado según una perspectiva física, psicológica, fisiológica y técnica. Como un estímulo físico, se describe como la carga discreta de protones y electrones que interactúan con los fotones de luz produciendo vibraciones oscilantes a la percepción visual que ocurre cuando la luz en forma de ondas electromagnéticas^{1,2} (entre 380-700 nm) y es captada por el ojo humano^{3,4}. No es una propiedad intrínseca de los objetos, sino una interpretación realizada por nuestro sistema visual con base en la luz reflejada⁴. Desde una perspectiva psicológica, es un efecto visual humano y la sensación en la conciencia donde las longitudes de ondas de luz que interactúan sobre la superficie de un objeto determinan la propiedad del color^{3,4}. Su interpretación es completamente subjetiva y depende del cerebro y la cultura^{4,5}. Desde un punto de vista fisiológico, los seres humanos tienen tres pigmentos visuales, cada uno en diferentes células receptoras en forma de cono. Un pigmento percibe principalmente la luz azul, otro, la verde y otro, la roja^{4,6}. Se cree que los impulsos de los tres tipos de conos receptores se combinan de alguna manera en una señal codificada antes de la transmisión desde el ojo a los centros visuales superiores del cerebro^{5,6}. En última instancia, el tono percibido es la longitud de onda dominante o promedio y la capacidad de percibir las diferencias de color varía de una persona a otra⁶.

Determinar una coincidencia de color adecuada es uno de los procesos más críticos e importantes en odontología. Siempre ha sido una de las mayores dificultades, ya que factores como la precisión, la previsibilidad y la consistencia en la selección del color siguen siendo un desafío en la odontología restauradora^{4,6-9}. Esto significa que los dientes restaurados deben ser precisos en cuanto a forma, translucidez, textura y tono para crear un resultado estéticamente agradable. Incluso una ligera discrepancia de color entre la restauración y los dientes naturales del paciente puede llevar a un costoso reemplazo de la restauración, lo que puede afectar negativamente la reputación del odontólogo⁸.

Aunque no afecta el éxito funcional y fisiológico de una restauración dental, es uno de los factores decisivos en la aceptación del paciente^{3,4}. Se han reportado, diversos protocolos para la determinación del tono que más se asemeje^{7,9}. Para sustentar las decisiones clínicas, se han definido los umbrales de perceptibilidad y aceptabilidad en función de los valores de diferencia de color. La perceptibilidad es la distinción entre el color de la restauración y el diente adyacente, mientras que la aceptabilidad representa la aceptación del color de la restauración. Un umbral de perceptibilidad del 50:50% se refiere a una situación en la que el 50% de los evaluadores detectan una diferencia de color entre dos objetos, mientras que el otro 50% no detecta ninguna diferencia¹⁰. Una restauración dental debe cumplir con las propiedades visuales del color, buscando ser precisa para la aceptación del paciente^{3,4,8,10,11}.

El cerebro humano tiene la capacidad de percibir cerca de un millón de tonos distintos, lo que refleja la notable sensibilidad del sistema visual^{3,12}. Sin embargo, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de dispositivos de alta precisión capaces de distinguir aproximadamente 10 millones de tonos¹². En el caso específico de la dentición humana, la variabilidad cromática es considerable, y los sistemas electrónicos pueden identificar hasta 100.000 tonos dentales diferentes¹². En contraste, el ojo humano solo logra discriminar cerca del 1% de esa gama, lo que evidencia la necesidad de herramientas digitales para una evaluación cromática más objetiva y reproducible en la práctica odontológica^{4,12}.

La determinación del color de los dientes naturales, así como la selección del tono más adecuado para los materiales restauradores, puede realizarse mediante diversos enfoques. Entre ellos se encuentran los métodos visuales tradicionales, que dependen de la percepción subjetiva del clínico^{3,10}, los métodos instrumentales, introducidos en las últimas dos décadas, que emplean dispositivos electrónicos para una evaluación más objetiva^{6,7,10,13-16}, o la combinación de ambos¹⁰.

El método visual implica, necesariamente, el uso de alguna guía de color dental, lo cual indica que es un método combinado (visual-instrumental)^{17,18}. En el ámbito internacional, la guía VITA se usó como referencia en los estudios que involucran el color dental¹⁸⁻²⁰. La guía VITA es un sistema de referencia para la selección de color dental que comparte principios de colorimetría con el sistema de Munsell¹⁸⁻²⁰, desarrollado por la empresa alemana VITA Zahnfabrik en 1950. Se basa en estudios específicos sobre la variabilidad del color dental en pacientes^{21,22}.

Aunque los resultados se pueden ver afectados por la fatiga visual y la iluminación del ambiente clínico del consultorio, el método visual combinado con un método instrumental sigue siendo el procedimiento más usado entre los operadores^{1,2,23}. Junto a estos factores también existe la determinación bajo fuentes de luz diferentes. La luz establece longitudes de onda que son reflejadas en el objeto y percibidas en el ojo humano, generando un fenómeno llamado metamerismo, siendo este un efecto propiciado por un objeto que aparenta poseer un color derivado por una fuente de luz específica. Sin embargo, al ser observado en otro entorno con una fuente de luz con composición espectral distinta a la primera, se logra visualizar de otro color^{3,4,6,7,24-27}.

Estudios que han comparado el método visual-instrumental con los métodos instrumentales digitales para la selección de tonos dentales han hallado diferencias estadísticamente significativas, siendo los métodos instrumentales digitales más precisos^{10,28-32}. En consecuencia, el uso del método visual se recomienda solo cuando no se disponga de otros métodos más precisos.

Para superar los inconvenientes del método visual, se han propuesto métodos instrumentales para la determinación del color de forma objetiva y precisa. El uso del método instrumental se introdujo a finales de la década de 1990 para superar las imperfecciones e inconsistencias del emparejamiento de tonos tradicional. Las lecturas objetivas y los resultados más rápidos son algunos de los beneficios de estos métodos^{1,2,33}. Entre los dispositivos se incluyen escáneres intraorales^{10,18,34}, cámaras de teléfonos inteligentes^{30,35-37}, espectrofotómetros^{8,23,38-46}, cámaras profesionales^{5,30,35-37,47,48} y más recientemente la Inteligencia Artificial Generativa (AIG)^{13,49}.

El escáner intraoral es un dispositivo óptico digital que emplea tecnologías de captura tridimensional, como la luz estructurada o el escaneo láser, para registrar con alta precisión la geometría y textura de las estructuras intraorales. Estos sistemas procesan la información mediante algoritmos de reconstrucción volumétrica y mapeo de color, generando archivos digitales (generalmente en formato STL, PLY u OBJ) que pueden ser utilizados en planificación restauradora, diseño CAD/CAM y análisis cromático. Aunque su precisión en la reproducción tridimensional es elevada, diversos estudios han señalado que la exactitud en la determinación del color dental aún presenta variabilidad, especialmente en comparación con dispositivos espectrofotométricos, considerados actualmente el estándar de referencia para la medición objetiva del color^{10,18,34}.

El espectrofotómetro dental es un dispositivo instrumental diseñado para la medición objetiva del color mediante el análisis de la reflectancia espectral de una superficie iluminada^{39-41,50}. En odontología, se utiliza para determinar el color dental evaluando la luz reflejada por el diente en distintas longitudes de onda del espectro visible^{8,23,42,44-46}. Sin embargo, no se utilizan ampliamente en la práctica clínica debido a su alto costo^{8,43}. Esta herramienta también permite al usuario evitar el metamerismo; por lo tanto, es independiente de los filtros y de las fuentes de luz cambiantes⁷.

Por otro lado, se ha evaluado la precisión del color usando cámaras profesionales. Las imágenes capturadas con cámaras profesionales proporcionan un método práctico y consistente para determinar el color de los dientes y transmitir esta información al técnico de laboratorio dental^{5,30,35,37,48,51}. Se ha sugerido agregar un filtro de luz cruzada polarizada para mejorar la precisión al eliminar el brillo del entorno y la reflexión especular producida por la saliva o los dientes^{46,49,52}.

Una cámara profesional es un dispositivo de captura de imágenes diseñado para ofrecer fotografías de alta resolución, un control preciso y calibrable sobre los parámetros fotográficos⁵³. Estas suelen constar con sensores de captura de imágenes de tipo APS-C o Full Frame, que funcionan capturando la luz que atraviesa el objetivo, convirtiéndola en una imagen digital⁵³. Las

principales diferencias entre estos tipos de sensores radican en que el tipo de sensor influye en la profundidad de campo, el comportamiento del enfoque y la calidad de la imagen⁵⁴.

El uso de las cámaras profesionales sigue una serie de pasos de procesamiento que convierten las respuestas RGB (Red, Green, Blue) sin procesar de la cámara en salidas RGB estándar⁵³. Se requieren una calibración y un ajuste de color adecuados entre los dispositivos digitales para una gestión del color precisa, implicando dos pasos: 1. Corrección del balance de blancos que intenta eliminar los efectos de la iluminación de la escena y 2. una transformación del espacio de color que mapea los valores de color en bruto balanceados al blanco a un espacio de color perceptual. Estos pasos combinados permiten que la cámara actúe como un dispositivo de reproducción de color o colorimétrico⁵³. El paso más crítico en el procesamiento de la imagen es determinar la ubicación del espacio de color específico del sensor de la cámara a un espacio de color perceptual estándar CIELab^{5,53}.

CIELab se refiere a un espacio de color de modelo tridimensional diseñado para representar de manera uniforme todos los colores perceptibles por el ojo humano. En 1931, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) desarrolló un sistema para la clasificación del color dentro de un espacio definido, basado en la cuantificación de la distribución de longitudes de onda. Este sistema se fundamenta en la estandarización de fuentes de luz y observadores para garantizar mediciones reproducibles^{44,55}.

Recientemente, con la aparición de la inteligencia artificial generativa (AIG), se ha empleado esta tecnología digital para determinar el color de dientes naturales y sustratos artificiales mediante el procesamiento e interpretación de imágenes capturadas con cámaras digitales. Por ejemplo, Shetty *et al.*¹³ describen la selección de color dental donde se muestran métodos con dispositivos de coincidencia de tonos, modelos de espacio de color, estos últimos para calibrar y obtener óptimos resultados, donde trabajarán junto al algoritmo de AIG. A pesar de que puede ser efectiva esta técnica, las condiciones de iluminación, el algoritmo de AIG que se use como herramienta y los dispositivos de coincidencia de tonos van a influir en la precisión del resultado final.

La precisión de los métodos de selección de color en el ámbito odontológico ha sido ampliamente estudiada. Wee *et al.*⁵ realizaron una investigación sobre la precisión del color de las cámaras digitales comerciales para su uso en odontología, y encontraron que las cámaras digitales DSLR comerciales, tienen potencial para su uso en el proceso de replicación del color en la odontología clínica. La variación dentro de cada unidad experimental de sensor/cámara puede contribuir a la precisión del color. Esta variación incluye el sensor de la cámara, el cuerpo, los lentes, la distancia focal, la apertura se-

leccionada, el balance de blancos y el software utilizado para convertir los archivos en formato sin procesar.

Hina *et al.*⁸ examinaron el método fotográfico de selección de sombras con el de un espectrofotómetro digital y determinaron que las fotografías digitales estandarizadas pueden capturar tonos de dientes correctamente. Después de los procesos y bajo el Student's T-Test, mostró valores similares ($P > 0.05$), es decir, L^* ($t=0.16$, $P=0.872$), a^* ($t=0.52$, $P=0.607$) y b^* ($t=0.23$, $P=0.820$), entre los dos grupos, lo que indica que no diferían significativamente o mostraban una coincidencia perfecta.

Por su parte Bister *et al.*⁴⁸ compararon 10 marcas de cámaras DSLR para evaluar la calidad de imagen y su uso en la odontología (Canon EOS 350D, Canon EOS 20D, Fujifilm S3 Pro, Konica-Minolta 7D, Nikon D100, Nikon D70s, Nikon D50, Olympus E1, Olympus E300, Pentax*istDS), determinando que dos de las marcas (Nikon D100, Fujifilm S3) obtuvieron consistentemente la mejor puntuación en fidelidad de color. También menciona que, desafortunadamente, ninguna cámara producía resultados satisfactorios en el modo “automático” de fábrica. Esto se debe a que los fabricantes asumen que la cámara se utilizará para fotografía normal y los “ajustes de fábrica” reflejan esto: “la apertura se programará para estar relativamente abierta con el fin de dar a la unidad de flash un rango mayor”.

Haciali *et al.*⁵² examinaron cuantitativamente los cambios de color entre diferentes niveles de deshidratación y rehidratación dental utilizando diferentes técnicas de fotografía dental, y el cambio de color clínico se consideró imperceptible hasta los 3 minutos de deshidratación. Sin embargo, se volvió perceptible después de 5 minutos de deshidratación y no fue clínicamente aceptable después de 15 minutos.

Por otra parte, Lizama *et al.*⁵⁶ evaluaron la precisión del color dentario con el uso de la cámara digital junto con un software (ImageJ) comparado con espectrofotómetro empleando el sistema de color CIELab. Hallaron diferencias significativas en favor del espectrofotómetro. Sin embargo, la alta precisión de la cámara digital sugiere el potencial de este método.

Jarad *et al.*¹⁹ proponen desarrollar un método de correspondencia de tonos basado en imágenes digitales y comparar la habilidad de los observadores utilizando este método con el convencional establecido contra un ‘estándar de oro’ espectrofotométrico. Dejando en evidencia que existe una correlación muy alta y estadísticamente significativa entre el espectrofotómetro y la cámara digital para todos los colores coordenadas CIELab y que la cámara digital se puede usar para mediciones de color en la clínica dental. Mejorando los resultados al optimizar la comunicación con el laboratorio dental.

Como puede observarse, diversas investigaciones han evaluado la precisión cromática en odontología utilizando metodologías que combinan la fo-

tografía digital, espectrofotometría y observación visual, bajo distintos protocolos de iluminación y equipamiento. Wee *et al.*⁵ analizaron modelos de calibración del color aplicados a sensores CCD y CMOS en cámaras comerciales, mientras que Hina *et al.*⁸ compararon la eficacia del método fotográfico respecto al espectrofotómetro digital VITA Easyshade. Rondón *et al.*⁵⁷ y Mahn *et al.*⁴⁶ exploraron el uso de filtros polarizados y luz cruzada, destacando su impacto en la reproducción cromática. Otros estudios como los de Bister *et al.*⁴⁸ y Shetty *et al.*¹³ evaluaron la precisión de cámaras DSLR en combinación con flashes macro y técnicas de selección visual, mientras que Antony *et al.* incluyeron además dispositivos de escaneo intraoral como alternativas emergentes. Esta heterogeneidad metodológica, que abarca desde configuraciones con luz ambiental Kelkar *et al.*⁵⁸ hasta iluminación controlada con flashes duales Haciali *et al.*⁵², refleja una tendencia creciente hacia la estandarización de protocolos que permitan registrar el color dental con mayor objetividad, fiabilidad y reproducibilidad en entornos clínicos y de investigación. Estos estudios hallaron que el uso de las cámaras profesionales es viable e identifica de forma precisa el color de dientes naturales en contexto clínico.

Sin embargo, en la actualidad no se ha encontrado ningún estudio donde se compare el uso de cámaras mirrorless de las marcas más comerciales Sony, Nikon y Canon. Por ello, el objetivo de este estudio es comparar la precisión del color en dientes naturales a partir de imágenes capturadas con tres cámaras mirrorless: Canon R50, Nikon Z30 y Sony a6400, empleando la técnica de polarización cruzada. Este estudio puso a prueba las siguientes hipótesis nulas: H_{01} : no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores CIELab de las cámaras y el espectrofotómetro; H_{02} : no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de ΔE de las cámaras mirrorless Canon R50, Nikon Z30 y Sony a6400.

Metodología

El presente estudio se llevó a cabo después de obtener la aprobación del Comité de Ética de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, garantizando el cumplimiento de los principios éticos establecidos para la investigación en seres humanos. Veintisiete alumnos regulares del año académico 2025 del pregrado de la Facultad de Odontología de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, se ofrecieron voluntariamente para participar en este estudio. Con base en estudios previos, parece ser un tamaño adecuado para la muestra^{1,8,23,33,37,43,52,57}.

Todos los participantes fueron informados sobre los objetivos, procedimientos y posibles implicaciones del estudio, y se aseguró el consentimiento informado antes de su inclusión. Se respetaron los criterios de confidencialidad y anonimato en la recopilación y análisis de los datos, siguiendo las

normativas internacionales de investigación biomédica. Además, se implementaron medidas para minimizar cualquier riesgo potencial, asegurando que la participación en el estudio no representara afectaciones en la salud oral de los voluntarios.

El tamaño de muestra utilizado (n = 27 por grupo) fue suficiente para alcanzar una potencia estadística superior al 80%, lo que asegura una alta probabilidad de detectar diferencias reales si estas llegaran a existir.

Criterios de elegibilidad

Entre de los criterios de inclusión de este estudio con base en estudios previos se decide que los participantes deben poseer al menos un incisivo central superior permanente sano^{2,8,9,20,23,31,35,37,49,51,52,56}, edad entre 18-65 años^{2,23,37}, buena higiene oral^{5,6,19,43,51,56,58}.

Por su parte, los criterios de exclusión del presente estudio con base en estudios previos se decide que los participantes no deben poseer tratamiento ortodóntico con dispositivos fijos^{31,33-35,37,51,52,56}, terapia de aclaramiento dental previa^{52,59,60}, pigmentación intrínseca o extrínseca de incisivos centrales superiores^{51,56}, anomalía morfológica y de posición de incisivos centrales superiores^{8,45,51,52,56}, material restaurador o rehabilitador de incisivos centrales superiores^{8,36,37,45,52,56}, presencia de caries dental en incisivos centrales superiores^{8,23,37,43,45,51,52,56}.

Preparación de la muestra

La fase de profilaxis dental previa a la toma de muestras de color fue realizada por el Departamento de Periodoncia de la Universidad de Los Andes, siguiendo protocolos clínicos estandarizados para garantizar superficies dentales libres de biofilm y pigmentaciones externas. Se utilizó un cepillo de profilaxis y una pieza de mano de baja velocidad para una limpieza eficaz, asegurando que cada participante tuviera una preparación uniforme antes de la evaluación del color. Este procedimiento fue fundamental para eliminar interferencias en la percepción cromática y optimizar la precisión de los registros espectrofotométricos y fotográficos dentro del estudio^{14-16,52,57}.

Equipos Evaluados

La TABLA 1 de la imagen presenta las especificaciones técnicas de los equipos fotográficos evaluados, considerando el tipo y tamaño del sensor, procesador y lente utilizados en cada cámara.

TABLA 1. Especificaciones de los equipos.

Cámara	Sensor	Procesador	Lente
Sony A6400	Exmor® CMOS BSI tipo APS-C de 23.5 x 15.6 mm 24.2 MP	BIONZ X	Sony macro 90mm 2.8
Canon R50	Canon CMOS FSI APS-C de 22.3 x 14.9 mm 24.2 MP	DIGIC X	Canon macro 100 2.8
Nikon Z30	Nikor CMOS BSI APS-C de 23.5 x 15.7 mm 20.9 MP	Expeed 6	Nikor Z de 105mm 2.8

Captura de imágenes

Para garantizar la uniformidad en la recopilación de datos, todas las pruebas fueron realizadas el mismo día para todos los voluntarios, asegurando condiciones homogéneas que minimicen cualquier variable externa que pudiera afectar la percepción del color dental⁵². Además, el registro fotográfico se llevó a cabo bajo una iluminación controlada y constante, excluyendo la luz natural y otras fuentes externas que pudieran influir en los resultados^{52,57,61}. Estas medidas permitieron obtener registros más precisos y comparables entre los diferentes métodos de evaluación empleados en el estudio, optimizando la fiabilidad de los datos obtenidos.

La toma de muestras de color se realizó mediante dos métodos complementarios: en primer lugar, mediante espectrofotometría, y, en segundo lugar, a través de imágenes capturadas con tres cámaras profesionales mirrorless. A cada participante se le asignó un número de identificación fijo, permitiendo un seguimiento preciso y comparativo de los registros obtenidos. La muestra con la captura de imágenes fotográficas de todos los participantes se obtuvo mediante una selección de campo de los incisivos centrales del maxilar superior.

Para garantizar la validez del análisis, se estandarizaron condiciones como la iluminación, el ángulo de captura, la distancia focal y el uso de filtros de polarización cruzada en todas las tomas realizadas.

Determinación de color con el espectrofotómetro

La espectrofotometría se realizó con un espectrofotómetro de reflectancia calibrado de la marca CHNSpec DS-220® de alta precisión, efectuando tres lecturas por participante para reducir el margen de error asociado a una única medición. La medición se basó en el sistema CIELab para evaluar el color de los dientes naturales, permitiendo una comparación objetiva con los registros obtenidos mediante fotografía digital con cámaras mirrorless. Este procedimiento garantiza precisión en la determinación del color y optimiza la fiabilidad de los resultados del estudio^{8,23,39,41-46}.

El espectrofotómetro CHNSpec DS-220® cuenta con un diámetro de lectura de 3 mm. Para asegurar la consistencia en las mediciones, se diseñó una base que posiciona el dispositivo mediante un tope en los bordes incisal y mesial del diente. Esto permite obtener lecturas en la misma zona de interés para cada muestra registrada en cada paciente, garantizando precisión y repetibilidad en los datos obtenidos.

El espectrofotómetro permite medir el color utilizando el espacio CIELab (Commission Internationale de L'Eclairage), donde L representa la luminosidad del objeto, a indica la variación cromática en el eje rojo-verde y b en el eje amarillo-azul. CIELab ubica un color específico dentro del espacio tridimensional mediante tres coordenadas: L* (luminosidad), a* (rojo-verde) y b* (amarillo-azul). Para determinar la diferencia entre las mediciones de dos

dispositivos, tomando como referencia el espectrofotómetro, se calcula ΔE , una métrica que cuantifica la distancia entre valores cromáticos, determinando el grado de perceptibilidad de la diferencia^{9,52,62,63}.

Validación del Espectrofotómetro

En esta investigación se utilizó el espectrofotómetro marca CHNSpec DS-220® (CHNSpec). Se evaluó mediante técnicas complementarias. En primer lugar, se analizó la repetitividad para determinar la capacidad del espectrómetro para proporcionar resultados consistentes al medir repetidamente el mismo sustrato bajo las mismas condiciones, con el mismo operador y con el mismo instrumento. Se realizaron 30 mediciones con los 16 tonos de la Guía Vita® Clásica. Adicionalmente, se realizó el mismo número de mediciones en los incisivos centrales superiores de dos pacientes que no formaron parte de la muestra de estudio. Los resultados de los valores CIELAB indican desviaciones estándar de L: 0.22; a: 0.13; b: 0.26. Los resultados demuestran una excelente repetitividad del instrumento utilizado, ya que están significativamente por debajo de 1, lo cual cumple ampliamente con los estándares internacionales de control de calidad en odontología.

En segundo lugar, se evaluó la estabilidad (test-retest) para determinar si las mediciones del espectrofotómetro permanecían consistentes en diferentes momentos. Se realizaron mediciones del color de los incisivos centrales superiores de cinco personas en dos momentos diferentes bajo condiciones similares. Las puntuaciones obtenidas en la primera y la segunda medición indican una alta estabilidad, el instrumento produce resultados consistentes a lo largo del tiempo.

Los resultados de ambas evaluaciones demuestran que el espectrofotómetro mide $L^*a^*b^*$ de manera precisa y confiable en un solo momento y a lo largo del tiempo y en repetidas mediciones. Esto respalda y valida su uso como prueba estándar de referencia en el presente estudio.

Determinación del color con las cámaras fotográficas

Las fotografías digitales se tomaron con tres marcas de cámaras profesionales. Se obtuvo tres tomas de cada cámara para cada paciente una muestra de tres tomas con cada una de las cámaras para cada uno de los participantes para reducir el margen de error por una muestra única^{8,19,52,57}. Cada cámara trae un ajuste de fábrica para transformar el espacio del color; sus parámetros están integrados en el firmware de cada cámara. Esto significa que pueden variar según la marca y el modelo del dispositivo.

Protocolo de fotografía

Se estandarizó el protocolo de captura fotográfica de la siguiente manera según lo establecido en los estudios previos (TABLA 2). Se aplicó aire por 15 segundos para la correcta deshidratación de la superficie del diente⁵², cada participante sentado en una silla con posición de la cabeza perpendicular al

piso^{8,14-16,52}, se realizó retracción bucal con retractor de color negro, con una distancia focal de 40 cm y una distancia del piso 130 cm^{46,49}.

TABLA 2. Parámetros de configuración y luz usados en el registro fotográfico.

Parametro	Descripción
Velocidad de obturación ^{5,14-16,30,35,37,48,52,57}	1:160 (1/160 seg)
ISO ^{5,14-16,30,35,48,52,57}	100-
Apertura del lente ^{5,14-16,35,52}	22-
Iluminación ^{14-16,35,52,57}	Twin Flash Godox MF-12 1/8 de potencia total
Polarización cruzada ^{46,49,52,58}	Kit de polarización Godox MF-12
Balance de blancos ^{14-16,33,49,52,57}	White Balance Reference (Whibal G7 WB7-KC)
Condición de luz ambiental ^{14-16,52}	Constante

Conversión de las imágenes a sistema CIELab

Previo a la conversión de las imágenes al sistema CIELab se decidió no emplear tarjeta de blancos para la corrección de color en el revelado digital. Esta decisión metodológica se fundamentó en la necesidad de comparar directamente las capacidades intrínsecas de cada cámara (sensor, procesador y lente) sin la intervención de software de posprocesamiento que pudiera modificar o estandarizar los resultados. De esta manera, se buscó evaluar la precisión del color en crudo de los equipos bajo condiciones controladas de iluminación y protocolo fotográfico, garantizando que las diferencias observadas correspondieran exclusivamente a las configuraciones y componentes propios de cada dispositivo. Este enfoque permite identificar el desempeño real de las cámaras mirrorless en la reproducción del color dental, sin depender de ajustes externos que pudieran enmascarar sus limitaciones o ventajas técnicas.

Las imágenes capturadas con cámaras profesionales se procesan en el espacio de color estándar RGB a través del software Adobe Photoshop® 2024 (versión 25.12). Mediante una herramienta integrada en dicho programa, es posible convertir estos datos al espacio CIELab, lo cual permite un análisis comparativo del color entre los distintos métodos de prueba utilizando una misma referencia de nomenclatura.

Cálculo de ΔE

Los parámetros de L*a*b* se representaron mediante un máximo, medio y mínimo de SD y de CI del 95% de las diferencias medias. Los valores ΔE, definidos como la distancia euclidiana en el espacio tridimensional L*, a*, b* para dos instancias de protocolos diferentes (P1 y P2C, P2N, P2S), se calcularon para que cualquier cambio entre las dos coordenadas entre protocolo pueda ser detectado utilizando la fórmula de CIELab:

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

Los resultados se interpretaron en función de los umbrales clínicos de perceptibilidad y aceptabilidad del color, considerando que valores de ΔE_{ab} inferiores a 1,69 son imperceptibles para el ojo humano, e inferiores a 3,2 son clínicamente aceptables⁶²⁻⁶⁴.

Análisis Estadístico

Se emplearon estadísticas descriptivas mediante el cálculo de promedios y variaciones estándar de los valores de L^* , a^* , b^* y sus respectivos valores Δ . Para evaluar la precisión del color obtenida por cada cámara mirrorless (Canon, Nikon y Sony), se aplicó el ANOVA de medidas repetidas, la esfericidad de Mauchly y las comparaciones post hoc con corrección de Bonferroni para comparar los valores de ΔL^* entre las cámaras. Por su parte, para determinar la diferencia del color total (ΔE) se empleó la esfericidad de Mauchly y la corrección de Greenhouse-Geisser.

Resultados

Precisión en la identificación del color de las cámaras en comparación con el espectrofotómetro

En la TABLA 3, se muestra que el espectrofotómetro de referencia para establecer los valores del color estándar mostró una luminosidad media de $L^* = 75.40 \pm 3.59$, un valor $a^* = 1.69 \pm 1.01$ y un b^* de 11.88 ± 2.54 , lo que describe una coloración dental con alta luminosidad, con una leve tendencia hacia el amarillo y una tonalidad cálida en el eje rojo-verde. Estos valores se tomaron como patrón para evaluar la precisión cromática de las cámaras mirrorless mediante la diferencia total de color (ΔE), que resume las variaciones combinadas en los tres componentes del espacio CIELAB (L^* , a^* , b^*).

La Canon R50 presentó una luminosidad inferior ($L^* = 69.23 \pm 3.86$), evidenciando una subexposición con respecto al estándar, lo que genera imágenes menos luminosas. Su componente a^* fue más alto ($+2.90 \pm 1.17$), indicando un desplazamiento hacia el rojo, mientras que el b^* ($+14.94 \pm 3.11$) mostró un incremento en la saturación amarilla. En conjunto, esta combinación produce tonalidades más cálidas y saturadas. El valor total $\Delta E = 7.74 \pm 3.16$ sugiere una diferencia cromática perceptible clínicamente, con una ligera desviación hacia tonos rojizos-amarillos.

La Nikon Z30, en contraste, mostró una luminosidad superior ($L^* = 76.15 \pm 3.95$), reflejando una sobreexposición que aumenta la luminosidad de la imagen. Su componente a^* ($+3.67 \pm 1.38$) denota una mayor inclinación hacia el rojo, y el b^* ($+17.46 \pm 3.36$) evidencia una acentuación de los tonos amarillos. El valor global $\Delta E = 6.86 \pm 2.47$ supera el umbral de perceptibilidad, indicando una diferencia del color clínicamente perceptible, caracterizada por un exceso de luminosidad y predominio de matices cálidos.

TABLA 3. Comparación de valores promedio de color (L*, a*, b*) y diferencia total (ΔE) respecto al espectrofotómetro.

Medición	L* (media ± DE)	a* (media ± DE)	b* (media ± DE)	ΔE (media ± DE)	Interpretación ΔE
Espectrofotómetro (ref.)	75.40 ± 3.59	1.69 ± 1.01	11.88 ± 2.54	—	—
Canon R50	69.23 ± 3.86	2.90 ± 1.17	14.94 ± 3.11	7.74 ± 3.16	Diferencia perceptible
Nikon Z30	76.15 ± 3.95	3.67 ± 1.38	17.46 ± 3.36	6.86 ± 2.47	Diferencia perceptible
Sony a6400	74.23 ± 3.82	2.32 ± 1.57	10.86 ± 3.29	2.82 ± 0.91	No hay diferencia perceptible

Nota: SD. ΔE calculado como $\sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]}$.

Por su parte, la Sony a6400 presentó valores intermedios y más cercanos al estándar del espectrofotómetro (L* = +74.23 ± 3.82; a* = +2.32 ± 1.57; b* = +10.86 ± 3.29). Esta combinación refleja una reproducción más neutra y equilibrada del color, con mínima desviación tanto en luminosidad como en saturación. Su valor de ΔE = 2.82 ± 0.91 confirma la mejor correspondencia cromática entre todas las cámaras, sin diferencias perceptibles a simple vista.

En conjunto, los resultados indican que las tres cámaras reproducen el color dental con cierta precisión, aunque con variaciones consistentes entre modelos. La Nikon Z30 tiende a sobreexponer y acentuar los tonos cálidos, la Canon R50 muestra una leve subexposición con dominancia rojiza, y la Sony a6400 ofrece la reproducción más fiel al patrón espectrofotométrico, manteniendo un balance adecuado entre los parámetros que definen el color. Estas discrepancias pueden atribuirse a las diferencias en los perfiles de color, el procesamiento interno de la señal y el balance automático de blancos de cada sensor.

Para efectos de este estudio, se consideraron los siguientes criterios de perceptibilidad de la CIE: valores de ΔE ≤ 1.69 indican diferencias cromáticas imperceptibles para el ojo humano; valores de 1.70 a 3.2 indican diferencias clínicamente aceptables; valores mayores que 3.2 indican diferencias cromáticas fácilmente perceptibles a simple vista.

Comparación de los
valores de ΔL* entre
las cámaras

En la **TABLA 4**, el componente de luminosidad (L*) mostró diferencias claras entre las cámaras analizadas en comparación con el espectrofotómetro, cuyo valor promedio (L* = 75.40 ± 3.59) se consideró como el estándar de referencia para la evaluación del color.

La Canon R50 presentó una luminosidad media de 69,23 ± 3,86, con una diferencia negativa de -6,17 ± 3,64 unidades respecto al patrón, lo que indica una tendencia a la subexposición. Este comportamiento se traduce en imágenes perceptiblemente menos luminosas que el estándar, probablemente debido a una calibración interna que privilegia la conservación del detalle, reduciendo el rango de color global. Esta ligera pérdida de luminosidad sugiere una respuesta más conservadora del sensor o una gestión automática del balance de blancos que atenúa la luminosidad general.

TABLA 4 . Comparación de luminosidad (L*) promedio de las cámaras respecto al espectrofotómetro.

Medición	L* (media ± DE)	L* referencia (Espectrofotómetro)	Δ* = (L*_cámara – L*_ref)	Interpretación
Canon R50	69.23 ± 3.86	75.40 ± 3.59	-6.17 ± 3.64	Más oscura que el estándar
Nikon Z30	76.15 ± 3.95	75.40 ± 3.59	0.75 ± 3.20	Más clara que el estándar
Sony a6400	74.23 ± 3.82	75.40 ± 3.59	-1.16 ± 1.66	Más clara, pero menos que Nikon

Nota: Los valores negativos de ΔL* indican menor luminosidad (imágenes más oscuras) y los positivos, mayor luminosidad (imágenes más claras) en comparación con el espectrofotómetro.

Por el contrario, la Nikon Z30 registró una luminosidad media de 76.15 ± 3.95, con una diferencia positiva de +0.75 ± 3.20 unidades, evidenciando una sobreexposición mínima. Esta tendencia genera imágenes más claras que el estándar, con mayor brillo aparente, pero también con riesgo de pérdida de detalle en áreas reflectantes, particularmente en las superficies de esmalte dental o zonas de alta luminosidad.

La Sony a6400, en cambio, presentó una luminosidad intermedia (74.23 ± 3.82) y una diferencia negativa moderada de -1.16 ± 1.66 unidades. Este resultado refleja una estabilidad tonal cercana a la Nikon Z30, pero sin sobreexposición perceptible.

En conjunto, los resultados evidencian que la Sony a6400 y la Nikon Z30 ofrecen la mejor correspondencia de la luminosidad con el espectrofotómetro, mientras que la Canon R50 tiende a subexponer.

El análisis de medidas repetidas reveló diferencias estadísticamente significativas en la luminosidad (ΔL*) entre las cámaras (F (2,52) = 37.74, p < .001), con un efecto grande (η² parcial = 0.592). La prueba de esfericidad de Mauchly (W = 0.975, p = 0.245) indicó que se cumplió el supuesto de esfericidad.

Las comparaciones post hoc con corrección de Bonferroni mostraron que Canon R50 produjo imágenes significativamente más oscuras que Nikon Z30 y Sony a6400 (p < .001), mientras que Nikon Z30 generó las más claras. En conjunto, los resultados confirman que el tipo de cámara influye de forma significativa en la luminosidad de las imágenes, siendo Nikon Z30 la más luminosa y Canon R50 la menos brillante frente al espectrofotómetro de referencia.

TABLA 5. Diferencias en la luminosidad (ΔL*) entre cámaras según el análisis de medidas repetidas.

Cámara	Media ± DE	Prueba de esfericidad (W de Mauchly)	F(gl ₁ , gl ₂)	p	η² parcial	Comparaciones post hoc (Bonferroni)
Canon R50	-6.17 ± 3.64	W = 0.975, p = 0.245	37.74 (2, 52)	< .001	0.592	Canon < Sony (p < .001) Canon < Nikon (p < .001) Sony < Nikon (p < .001)
Nikon Z30	0.75 ± 3.20					
Sony a6400	-1.16 ± 1.66					

Notas: n = 27 en todas las condiciones.

El análisis mostró un efecto principal significativo del tipo de cámara sobre la luminosidad (ΔL^*). η^2 parcial = 0.592 indica un tamaño del efecto grande. Comparaciones ajustadas con corrección de Bonferroni.

Comparación de los valores de Δa^* entre las tres cámaras

En la TABLA 6, el componente cromático a^* (eje verde-rojo) mostró variaciones significativas entre las cámaras evaluadas en comparación con el espectrofotómetro, cuyo valor promedio ($a^* = 1.61 \pm 0.67$) se consideró como referencia estándar. Este valor representa una tonalidad ligeramente desplazada hacia el rojo, propia de la coloración dental natural. En contraste, los sistemas de captura digital presentaron incrementos positivos de Δa^* , lo que indica una tendencia general hacia tonos más rojizos.

La Canon R50 también mostró un leve sesgo al rojo ($\Delta a^* = +1.21 \pm 1.44$), con una diferencia de $\Delta a^* = +1.69 \pm 1.01$ respecto al espectrofotómetro. Este leve desplazamiento hacia el rojo sugiere una intensificación moderada de los matices cálidos, posiblemente asociada al balance automático de blancos y a la curva de respuesta espectral del sensor CMOS, que tiende a realzar las longitudes de onda correspondientes al rojo bajo condiciones de polarización cruzada.

Por su parte, la Nikon Z30 presentó el mayor desplazamiento ($\Delta a^* = +1.98 \pm 1.37$), lo que refleja una intensificación del matiz rojo y menor neutralidad cromática. Esta intensificación de los tonos cálidos podría estar relacionada con el procesamiento interno de imagen, que busca optimizar la apariencia visual incrementando la saturación del canal rojo, especialmente en zonas de alta reflectancia dental.

En cambio, la Sony a6400 fue la más cercana al valor de referencia ($\Delta a^* = +0.63 \pm 1.27$), evidenciando mayor equilibrio y precisión en el eje verde-rojo. Este resultado refleja una reproducción más neutra y equilibrada del eje verde-rojo, con menor interferencia del procesamiento automático y una mayor fidelidad cromática respecto al patrón espectrofotométrico.

En conjunto, los resultados evidencian que todas las cámaras presentan una ligera tendencia al enrojecimiento del color dental, aunque con magnitudes diferentes. La Nikon Z30 mostró la mayor desviación, la Canon R50 un desplazamiento moderado y la Sony a6400 la mayor precisión tonal, confirmando su capacidad para mantener una reproducción cromática más fiel y controlada.

TABLA 6. Comparación del componente cromático a^* (verde-rojo) respecto al espectrofotómetro.

Medición	a^* (media $\pm$ DE)	a^* referencia (Espectrofotómetro)	$\Delta a^* = (a^*_{\text{cámara}} - a^*_{\text{ref}})$	Interpretación
Canon R50	2.90 ± 1.17	1.69 ± 1.01	1.21 ± 1.44	Leve desplazamiento al rojo
Nikon Z30	3.67 ± 1.38	1.69 ± 1.01	1.98 ± 1.37	Mayor desplazamiento al rojo
Sony a6400	2.32 ± 1.57	1.69 ± 1.01	0.63 ± 1.27	Más cercana al estándar

Nota: Δa^* se calcula como $(a^*_{\text{cámara}} - a^*_{\text{ref}})$. Valores positivos indican desplazamiento hacia el rojo, y valores negativos, hacia el verde.

En la TABLA 7, el análisis de medidas repetidas mostró diferencias estadísticamente significativas en el componente cromático Δa^* entre las cámaras ($F(2,52) = 13.88, p < .001$), con un efecto moderado (η^2 parcial = 0.430). La prueba de esfericidad de Mauchly ($W = 0.869, p = 0.155$) confirmó que se cumplió el supuesto de esfericidad.

TABLA 7. Diferencias en el componente cromático Δa^* entre cámaras según el análisis de medidas repetidas.

Cámara	Media $\pm$ DE	Prueba de esfericidad (W de Mauchly)	F (gl ₁ , gl ₂)	p	η^2 parcial	Comparaciones post hoc (Bonferroni)
Canon R50	1.21 $\pm$ 1.44	W = 0.869, p = 0.155	13.88 (2, 52)	< .001	0.430	Canon < Nikon (p = .006) Sony < Canon (p = .029) Sony < Nikon (p < .001)
Nikon Z30	1.98 $\pm$ 1.37					
Sony a6400	0.63 $\pm$ 1.27					

Notas: n = 27 en todas las condiciones.

Las comparaciones post hoc con corrección de Bonferroni indicaron que la Nikon Z30 presentó un desplazamiento significativamente mayor hacia el rojo en comparación con Canon R50 ($p = .006$) y Sony a6400 ($p < .001$), mientras que Canon y Sony no difirieron entre sí ($p = .190$).

En conjunto, los resultados evidencian que el tipo de cámara influye en el componente rojo-verde, siendo la Nikon Z30 la que más intensifica el matiz rojizo, mientras que la Sony a6400 mantiene la mayor neutralidad cromática frente al espectrofotómetro.

El análisis mostró un efecto principal significativo del tipo de cámara sobre el componente Δa^* ($F(2, 52) = 19.60, p < .001, \eta^2_p = .430$). El tamaño del efecto fue moderado-alto. Las comparaciones post hoc con ajuste Bonferroni mostraron que Nikon presentó valores significativamente mayores de Δa^* que Canon y Sony, mientras que Canon también superó a Sony.

Comparación de los valores de Δb^* entre las cámaras

En la TABLA 8, el componente cromático b^* (eje amarillo-azul) evidenció diferencias leves entre las cámaras en comparación con el espectrofotómetro ($b^* = 11.88 \pm 2.54$). Las tres cámaras presentaron variaciones en la dirección del eje, evidenciando distintos grados de tendencia hacia el amarillo o el azul. Las tres cámaras mirrorless mostraron variaciones diferenciadas en la magnitud y dirección del componente b^* , revelando distintos grados de desplazamiento hacia tonos cálidos o fríos.

La Canon R50 presentó un valor medio de $b^* = 14.94 \pm 3.11$, con una diferencia positiva de ($\Delta b^* = +3.06 \pm 2.48$) respecto al espectrofotómetro. Este incremento refleja una menor tendencia hacia el azul y una leve intensificación del componente amarillo, lo que se traduce en una apariencia cromática más cálida. Este comportamiento puede deberse a una compensación interna del balance de blancos que privilegia los matices cálidos bajo iluminación polarizada, acentuando ligeramente los tonos amarillentos.

TABLA 8. Comparación del componente cromático b* (amarillo-azul) respecto al espectrofotómetro.

Medición	b* (media ± DE)	b* referencia (Espectrofotómetro)	Δb* = (b*_cámara - b*_ref)	Interpretación
Canon R50	14.94 ± 3.11	11.88 ± 2.54	3.06 ± 2.48	Menor tendencia al azul
Nikon Z30	17.46 ± 3.36	11.88 ± 2.54	5.58 ± 2.44	Menos tendencia al azul
Sony a6400	10.86 ± 3.29	11.88 ± 2.54	-1.01 ± 1.34	Leve desplazamiento al azul

Nota: Δb* se calcula como (b*_cámara - b*_ref). Valores negativos de Δb* indican tendencia hacia el azul (menor componente amarillo).

La Nikon Z30 mostró un desplazamiento aún mayor ($b^* = 17.46 \pm 3.36$; ($\Delta b^* = +5.58 \pm 2.44$)), lo que indica una reducción mínima de la componente azul y una marcada intensificación del amarillo. Esta tendencia sugiere que el algoritmo de color de la cámara amplifica el canal amarillo para mejorar la saturación general de la imagen, generando una representación más luminosa pero menos fiel al patrón espectrofotométrico.

Por el contrario, la Sony a6400 presentó un valor medio de $b^* = 10.86 \pm 3.29$, con una diferencia negativa de $\Delta b^* = -1.01 \pm 1.34$, siendo la más cercana al estándar. Este ligero desplazamiento hacia el azul indica una reproducción más equilibrada del eje amarillo-azul, con un control más preciso del tono y la saturación. Tal comportamiento podría estar vinculado a una mayor neutralidad del sensor y del balance automático de blancos, que evita la sobrecompensación cromática observada en los otros equipos.

En conjunto, los resultados muestran que la Canon R50 y la Nikon Z30 tienden a realzar el componente amarillo, generando tonalidades más cálidas, mientras que la Sony a6400 mantiene una reproducción más neutra, con una ligera inclinación hacia el azul. Estas diferencias reflejan las variaciones en el procesamiento interno de color y la sensibilidad espectral de cada sensor bajo condiciones de iluminación controlada, confirmando que la Sony logra la mayor precisión en la representación del eje b^* .

En la TABLA 9, el análisis de medidas repetidas evidenció diferencias estadísticamente significativas en el componente cromático Δb^* entre las cámaras ($F(2,52) = 104.16$, $p < .001$), con un efecto muy grande (η^2 parcial = 0.800). La prueba de esfericidad de Mauchly ($W = 0.971$, $p = 0.697$) confirmó que se cumplió el supuesto de esfericidad, por lo que no se requirieron correcciones adicionales.

TABLA 9. Diferencias en el componente cromático Δb* entre cámaras según el análisis de medidas repetidas.

Cámara	Media ± DE	Prueba de esfericidad (W de Mauchly)	F (gl ₁ , gl ₂)	p	η² parcial	Comparaciones post hoc (Bonferroni)
Canon R50	3.06 ± 2.48	W = 0.971, p = 0.697	104.16 (2, 52)	< .001	0.800	Canon < Nikon (p < .001) Canon > Sony (p < .001) Nikon > Sony (p < .001)
Nikon Z30	5.58 ± 2.44					
Sony a6400	-1.01 ± 1.34					

Nota: n = 27 en todas las condiciones.

Las comparaciones post hoc con ajuste Bonferroni mostraron diferencias significativas entre todas las cámaras ($p < .001$). La Nikon Z30 presentó los valores más altos de Δb^* , indicando una mayor tendencia hacia el amarillo, mientras que la Sony a6400 mostró valores negativos, reflejando una ligera inclinación hacia el azul y una mayor neutralidad cromática.

En síntesis, los resultados confirman que el tipo de cámara afecta de manera significativa la representación del eje amarillo-azul, siendo la Nikon Z30 la más cálida y la Sony a6400 la más equilibrada cromáticamente.

El análisis de medidas repetidas mostró un efecto significativo del tipo de cámara sobre el componente Δb^* ($F(2, 52) = 104.16, p < .001, \eta^2_p = .800$). Por su parte, el tamaño del efecto fue muy grande. Las comparaciones post hoc (ajuste Bonferroni) indicaron diferencias estadísticamente significativas entre las tres cámaras.

Comparaciones
pareadas de los
valores de ΔE de las
tres cámaras

El análisis integrador de los componentes cromáticos (ΔL^* , Δa^* y Δb^*) mostró diferencias leves en la fidelidad cromática global (ΔE) entre las cámaras en comparación con el espectrofotómetro. Valores más bajos de ΔE indican una reproducción del color más precisa respecto al estándar.

La Sony a6400 presentó el ΔE más bajo (2.82 ± 0.91), evidenciando la mayor exactitud cromática y la mejor correspondencia con el color real. La Nikon Z30 mostró un valor ligeramente superior (6.86 ± 2.47), manteniéndose dentro del rango de diferencias no perceptibles clínicamente, aunque con una leve sobreexposición. Por su parte, la Canon R50 registró el ΔE más alto (7.74 ± 3.16), lo que refleja una pequeña desviación perceptual asociada a imágenes más oscuras y cálidas.

En conjunto, los resultados confirman que, la Sony a6400 presenta la mejor correspondencia con el estándar espectrofotométrico y clínicamente aceptable, seguida por la Canon R50, mientras que la Nikon Z30 muestra la mayor desviación perceptible por su tendencia a la sobreexposición y a la saturación de tonos cálidos.

TABLA 10. Comparación integradora de los componentes cromáticos y la diferencia total (ΔE).

Cámara	ΔL^* (media $\pm$ DE)	Δa^* (media $\pm$ DE)	Δb^* (media $\pm$ DE)	ΔE (media $\pm$ DE)	Interpretación global
Canon R50	-6.17 ± 3.64	1.21 ± 1.44	3.06 ± 2.48	7.74 ± 3.16	Diferencia perceptible
Nikon Z30	0.75 ± 3.20	1.98 ± 1.37	5.58 ± 2.44	6.86 ± 2.47	Diferencia perceptible
Sony a6400	-1.16 ± 1.66	0.63 ± 1.27	-1.01 ± 1.34	2.82 ± 0.91	Diferencia no perceptible

Nota: $\Delta E = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]}$. Valores más bajos de ΔE indican mayor fidelidad cromática respecto al espectrofotómetro (referencia). Según los umbrales de la CIE, $\Delta E > 3,2$ representa diferencias perceptibles a simple vista.

En la **TABLA 11**, el análisis de medidas repetidas reveló diferencias estadísticamente significativas en la precisión cromática total (ΔE) entre las cámaras ($F(2,52) = 33.42, p < 0.001$), con un efecto grande (η^2 parcial = 0.562). La prueba de esfericidad de Mauchly fue significativa ($p = 0.027$), por lo que se aplicó la corrección de Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0.793$) para ajustar los grados de libertad.

TABLA 11. Diferencias en la precisión cromática total (ΔE) entre cámaras según el análisis de medidas repetidas.

Cámara	Media $\pm$ DE	Prueba de esfericidad (W de Mauchly)	F (gl ₁ , gl ₂)	p	η^2 parcial	Comparaciones post hoc (Bonferroni)
Canon R50	7.74 $\pm$ 3.16	W = 0.750, p = .027	33.42 (2, 52)	< .001	0.562	Canon = Nikon (p = .787) Canon > Sony (p < .001) Nikon > Sony (p < .001)
Nikon Z30	6.86 $\pm$ 2.47					
Sony a6400	2.82 $\pm$ 0.91					

Nota: n = 27 en todas las condiciones.

Las comparaciones post hoc con corrección de Bonferroni mostraron que Sony a6400 presentó una diferencia cromática significativamente menor que Canon R50 ($p < 0.001$) y Nikon Z30 ($p < 0.001$), mientras que las diferencias entre Canon y Nikon no fueron significativas entre sí ($p = 0.787$).

En conjunto, los resultados confirman que el tipo de cámara influye significativamente en la fidelidad cromática global, siendo la Sony a6400 la más precisa y estable en la reproducción del color, mientras que Canon R50 y Nikon Z30 mostraron desviaciones perceptibles frente al espectrofotómetro de referencia.

La prueba de esfericidad de Mauchly fue significativa ($p = 0.027$), por lo que se aplicó la corrección de Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0.787$). Los resultados del ANOVA de medidas repetidas mostraron un efecto cuadrático significativo del tipo de cámara sobre la diferencia cromática total ($F(2,52) = 33.42, p < .001, \eta^2_p = .562$). Esto indica una marcada variación no lineal en la precisión del color entre equipos.

En conjunto, los resultados mostraron que las tres cámaras mirrorless evaluadas presentaron variaciones significativas en los parámetros cromáticos respecto al espectrofotómetro, solamente dentro de márgenes clínicamente aceptables ($\Delta E < 3,2$) la cámara Sony a6400. En el eje de luminosidad (ΔL^*), la Canon R50 tendió a generar imágenes más oscuras, mientras que la Nikon Z30 mostró una ligera sobreexposición, y la Sony a6400 mantuvo la reproducción tonal más equilibrada. En el componente a^* (verde-rojo), todas las cámaras presentaron desplazamientos positivos, evidenciando una tendencia hacia tonos rojizos, más acentuada en la Nikon Z30 y mínima en la Sony a6400. En el eje b^* (amarillo-azul), Canon y Nikon intensificaron los tonos cálidos, mientras que Sony mostró una leve inclinación hacia el azul, resultando más neutra y cercana al estándar.

De forma global, el índice ΔE confirmó que la Sony a6400 alcanzó la mayor precisión cromática ($\Delta E = 2.82 \pm 0.91$), seguida de Nikon Z30 y Canon R50, cuyas diferencias fueron perceptibles. Los análisis de medidas repetidas respaldaron estos hallazgos, mostrando efectos significativos del tipo de cámara sobre los tres componentes cromáticos y la diferencia total, con tamaños del efecto moderado a grande. En síntesis, la Sony a6400 demostró el mejor desempeño colorimétrico general, al ofrecer una reproducción más fiel y estable del color dental bajo condiciones de polarización cruzada, mientras que la Canon R50 y la Nikon Z30 tendieron a generar imágenes más cálidas o luminosas, respectivamente.

Discusión

La precisión del color en la odontología es un factor esencial para poder obtener resultados estéticos aceptables^{7,9,13-16,20,62}. Sin embargo, el ojo humano tiene limitaciones para precisar el color, especialmente en dientes naturales que poseen una amplia gama de tonalidades en un espectro estrecho, lo que se ve agravado por factores como la fatiga visual, el metamerismo y condiciones ambientales de iluminación^{1,2,61,6,8}.

Se han desarrollado múltiples investigaciones que comparan espectrofotometría con fotografía digital, empleando cámaras DSLR, guías de color y software de análisis cromático^{5,30,36,37,46}. Algunos estudios han reportado alta correlación entre cámaras calibradas y espectrofotómetros, especialmente cuando se aplican protocolos estandarizados de captura^{1,8,33,46,65}. Se ha incorporado el uso de filtros polarizados, balance de blancos calibrado y software como Photoshop® para convertir imágenes al espacio CIELab^{8,46,52,58}. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han centrado en cámaras réflex digitales (DSLR)^{5,8,16,30,32,35,37,47-50,57}, dejando de lado tecnologías más recientes como las cámaras mirrorless. Hasta la fecha no se encontró una comparación directa entre cámaras mirrorless de marcas comerciales (Canon, Nikon, Sony) en la odontología, empleando técnica de polarización cruzada y análisis estadístico robusto frente a espectrofotometría.

Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo comparar la precisión del color en dientes naturales a partir de imágenes capturadas con tres cámaras mirrorless: Canon R50, Nikon Z30 y Sony a6400, empleando la técnica de polarización cruzada. En general, los resultados indican que las tres cámaras reproducen el color dental con cierta precisión, aunque con variaciones consistentes entre modelos, siendo la Sony a6400 la cámara que ofrece la reproducción más fiel a la referencia espectrofotométrica, y mantiene un balance adecuado entre luminosidad, saturación y matiz. En este sentido, se rechaza la primera hipótesis nula que establecía que no había diferencias entre los valores CIELab de las cámaras y el de referencia.

Estas diferencias halladas en el presente estudio confirman la variabilidad observada en estudios previos que involucran dispositivos electrónicos de espectrofotometría. Ferreira *et al.*⁴⁰ compararon los valores CIELab de dos espectrofotómetros de la casa comercial VITA Zahnfabrik y encontraron diferencias significativas entre estos dispositivos para las mismas plantillas. Estos resultados sugieren que los dispositivos o los diferentes lotes para las escalas podrían tener una variabilidad intrínseca capaz de influir en la evaluación del color, como los procesos de fabricación, los procedimientos de calibración o problemas de mantenimiento. Ambos dispositivos presentaron valores de rendimiento elevados por encima del 90%, lo que, según la literatura, permite su uso como herramientas de diagnóstico⁴⁰.

El estudio de Kim H⁶⁶ evaluó la repetibilidad y precisión de dos espectrofotómetros intraorales idénticos (VITA® Easyshade V) con diferentes números de serie. Aunque ambos dispositivos demostraron una alta repetibilidad en la medición de los parámetros CIE L, a, b* (ICC > 0.90), se observaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de color entre ellos (P < .001). La diferencia de color inter-dispositivo en condiciones clínicas fue de 2.28 ± 1.61 unidades ΔE_{00} , lo que supera el umbral de aceptabilidad clínica establecido en la literatura. Estos hallazgos sugieren que, incluso entre dispositivos técnicamente idénticos, pueden presentarse variaciones relevantes que comprometen la reproducibilidad del color dental en contextos clínicos. El estudio destaca que la repetibilidad es un criterio esencial para validar el desempeño clínico de los espectrofotómetros al usarlos en la medición de color en odontología⁶⁶.

Al comparar la diferencia de color entre las tres cámaras, se hallaron diferencias estadísticamente significativas. En este sentido, se rechaza la segunda hipótesis nula según la cual no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de ΔE de las cámaras mirrorless Canon R50, Nikon Z30 y Sony a6400.

Los resultados de los valores ΔE confirman que, aunque las tres cámaras ofrecen una reproducción cromática cercana a los valores de referencia, la Sony a6400 presenta la mejor correspondencia con el estándar espectrofotométrico y aceptable clínicamente, seguida por la Nikon Z30 y la Canon R50, con mayores desviaciones perceptibles a la fidelidad cromática, según se ha observado en estudios previos⁶³.

Estas discrepancias pueden atribuirse a las diferencias en los perfiles de color, el procesamiento interno de la señal y el balance de blancos predefinido de cada sensor^{53,54}. Cada dispositivo mostró un comportamiento cromático distinto bajo condiciones estandarizadas de captura. Esto se debe a que las cámaras mirrorless poseen configuraciones internas específicas de procesamiento de imagen, como el tipo de sensor y cómo influye en el balan-

ce de blancos de cada una, el algoritmo de conversión de color y el firmware de fábrica, que afectan la interpretación de los valores RGB, su posterior transformación al espacio CIELab y los parámetros ajustables por el operador⁵⁴. Por lo tanto, incluso bajo un mismo protocolo de registro fotográfico, las diferencias en la arquitectura y el procesamiento digital de cada cámara pueden generar variaciones en la reproducción del color ^{54,67}.

La tarjeta de blancos constituye un recurso ampliamente recomendado para la corrección de color en fotografía digital, su uso en este estudio habría incorporado un sesgo metodológico al homogenizar los resultados entre cámaras. La corrección de balance de blancos mediante software tiende a minimizar las diferencias cromáticas derivadas de los componentes internos de cada cámara (sensor, procesador, lente), lo que impide evaluar su desempeño nativo en la reproducción del color dental. Al prescindir de este recurso, se garantizó que las variaciones observadas correspondieran directamente a las capacidades técnicas propias de cada cámara bajo condiciones estandarizadas de iluminación y protocolo fotográfico. Este enfoque permitió comparar de manera objetiva la precisión cromática intrínseca de los equipos, aunque debe reconocerse que en la práctica clínica el uso de tarjetas de blancos puede mejorar la reproducibilidad y la comunicación con el laboratorio dental. Por tanto, los resultados aquí presentados reflejan un escenario experimental diseñado para aislar el efecto de las cámaras, más que para replicar el flujo de trabajo clínico habitual

Desde una perspectiva más técnica, la diferencia de los valores CIELab entre los dispositivos hallados puede deberse a que las cámaras evaluadas en este estudio emplean sensores CMOS, que presentan diferencias significativas en su arquitectura interna que pueden influir en la fidelidad cromática y la exposición. La Sony® A6400 y la Nikon® Z30 incorporan sensores CMOS de tipo BSI (Back-Side Illuminated), mientras que la Canon® R50 utiliza un sensor CMOS de tipo FSI (Front-Side Illuminated).

Esta distinción es relevante, ya que los sensores BSI permiten que la luz incida directamente sobre el fotodiodo al eliminar las capas de cableado frontal, lo que mejora la sensibilidad lumínica, reduce el ruido y favorece una mayor precisión en la reproducción del color. Por el contrario, los sensores FSI presentan una eficiencia lumínica menor, lo que puede traducirse en imágenes con menor exposición y fidelidad cromática. En este estudio, se observó que la Sony® A6400 y la Nikon® Z30 (ambas con sensores BSI) lograron exposiciones más claras y valores ΔE más cercanos al espectrofotómetro, mientras que la Canon® R50, equipada con un sensor FSI, tendió a generar imágenes subexpuestas y con mayores desviaciones cromáticas. Estos hallazgos coinciden con lo descrito por Gouveia *et al.*⁶⁷, quienes señalan que los sensores BSI presentan menor error ΔE en comparación con los FSI, debido

a su arquitectura optimizada para la captación espectral, lo que refuerza la importancia de considerar la tecnología del sensor como un factor crítico en la estandarización de protocolos fotográficos para reproducción de color dental.

Sönke⁶⁵ afirma que los espectrofotómetros analizan la luz reflejada en longitudes de onda específicas, generando datos precisos en espacios como CIELab, las cámaras digitales operan en formato RGB, basado en la respuesta de sensores a bandas amplias de luz. Esta arquitectura impide mediciones espectrales directas y limita la precisión en la conversión de RGB a CIELab, ya que las curvas de sensibilidad de los sensores no coinciden con las funciones colorimétricas estándar. “Las cámaras RGB registran el color en función de curvas de respuesta del sensor, que pueden no coincidir con la percepción visual humana ni con los espacios de color estandarizados”, lo que compromete la exactitud de las transformaciones a modelos como CIELab. En este estudio, dicha diferencia se reflejó en la dispersión de los valores ΔE entre dispositivos, lo que refuerza la necesidad de calibración cuando se emplean cámaras como herramienta complementaria en la selección de tonos dentales.

Además, esta variabilidad puede estar relacionada con la naturaleza *in vivo* del presente estudio que dificulta una reproducción idéntica del color debido a las condiciones naturales y las creadas en el momento del registro^{40,41}. A diferencia de los estudios *in vitro*, donde las condiciones de iluminación, posición, superficie y entorno pueden ser controladas más rigurosamente. En cambio, los estudios *in vivo* presentan desafíos clínicos adicionales que pueden influir en la precisión del registro cromático⁴⁰. Factores como la presencia de saliva, los micro movimientos del paciente, la variabilidad anatómica y la interferencia de tejidos blandos pueden alterar la reflectancia espectral del diente y afectar la reproducibilidad de las mediciones tanto espectrofotométricas como fotográficas^{5,40,52}.

Estas condiciones clínicas pueden inducir una mayor dispersión en los valores CIELab, que debe considerarse al interpretar los resultados obtenidos en contextos reales. Tal como se ha reportado en estudios previos^{30,40,43,46}, la deshidratación progresiva del esmalte y el tiempo de exposición pueden modificar perceptiblemente el color dental, especialmente en protocolos fotográficos⁵². Además, la sensibilidad del espectrofotómetro ante variaciones mínimas en la geometría de medición y en la superficie evaluada puede amplificar estas diferencias en condiciones *in vivo*^{9,18,20,52,57}. Por tanto, aunque los estudios *in vitro*^{4,17,33,34,40} ofrecen mayor precisión experimental, los estudios *in vivo* aportan una mayor validez clínica al reflejar las condiciones reales de trabajo en odontología^{28,31,46}.

A pesar de que se considera el instrumento de referencia por la precisión de sus valores, el registro espectrofotométrico del color dental presenta diver-

sas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados^{23,39,40,66}. La variabilidad entre dispositivos, derivada de diferencias en marcas comerciales, modelos, calibración, geometría de medición, algoritmos internos, entre otros que puede generar discrepancias en los valores CIELab^{20,40}. Se han reportado cambios incluso entre modelos de una misma empresa^{39,40,66}. Además, factores clínicos como la hidratación del esmalte, la interferencia de tejidos blandos y la angulación del instrumento afectan la reproducibilidad de las mediciones, especialmente en condiciones *in vivo*^{9,52}. La sensibilidad del espectrofotómetro a la reflectancia superficial también se ve comprometida en dientes restaurados o con alta translucidez, donde los materiales presentan propiedades ópticas distintas al esmalte natural^{25,68}. Finalmente, la falta de calibración periódica puede inducir errores sistemáticos, lo que refuerza la necesidad de protocolos estandarizados para garantizar la fiabilidad del análisis cromático instrumental^{10,43}.

La intensidad del flash constituye un factor determinante en la precisión cromática obtenida mediante fotografía dental^{46,51,61}. Diversos estudios han demostrado que variaciones en la potencia lumínica pueden alterar la percepción del color, ya sea por sobreexposición que reduce la saturación, o por subexposición que incrementa el ruido digital y compromete la fidelidad tonal^{35,37,52,56,61}. En el presente estudio, se observó que los resultados de las cámaras que difirieron estadísticamente significativas de los valores espectrofotométricos, e incluso la Sony® a 6400, podrían aprovecharse de un ajuste de iluminación, especialmente en lo que respecta a la intensidad y difusión del flash para mejorar los resultados. Esta optimización permitiría reducir las discrepancias de ΔE y mejorar la coincidencia con los estándares cromáticos clínicos, reforzando la utilidad de la fotografía como recurso complementario en la selección de tonos dentales. Tal como lo señalan Szalewski *et al.*⁶¹, una intensidad excesiva puede sobreexponer la imagen y, en consecuencia, sus valores. En cambio, una intensidad insuficiente puede subexponer la imagen. Esto respalda la necesidad de controlar este parámetro en estudios comparativos de reproducción cromática con las cámaras que sobreexpusieron y subexpusieron los valores de muestra en este estudio.

En sintonía con estos hallazgos, los umbrales de perceptibilidad y aceptabilidad también varían de un estudio a otro. Una revisión sistemática reciente consideró que una diferencia de color $\Delta E_{ab} < 1.69$ es imperceptible y $\Delta E_{ab} < 3.2$ es clínicamente aceptable. No obstante, otros autores como Paravina *et al.* definieron en 2015 umbrales más estrictos: perceptibilidad en $\Delta E_{ab} \approx 1.2$ y aceptabilidad en $\Delta E_{ab} \approx 2.7$.

En conclusión, los resultados indican que las tres cámaras reproducen el color dental con buena precisión, aunque con variaciones consistentes entre modelos. La Nikon® Z30 tiende a sobreexponer y acentuar los tonos cálidos,

la Canon® R50 muestra una leve subexposición con dominancia rojiza; y la Sony® a6400 ofrece una mayor precisión cromática en la captura de imágenes dentales, manteniendo un balance adecuado entre luminosidad, saturación y matiz, lo que la posiciona como una alternativa viable para la documentación fotográfica y la comunicación con el laboratorio dental.

Conclusiones

Dentro de las limitaciones del presente estudio, se concluye que, entre los tres modelos de cámaras mirrorless evaluados, la Sony® a6400 fue la más precisa en la reproducción del color dental, con diferencias estadísticamente significativas respecto a la Canon® R50 y la Nikon® Z30. Además, los valores de ΔE^*ab obtenidos se ubicaron dentro del umbral de aceptabilidad (<3.2), lo que respalda la viabilidad clínica del protocolo fotográfico empleado.

Estos hallazgos sugieren que la Sony® a6400 puede ser un instrumento confiable para mejorar la comunicación cromática entre el clínico y el laboratorio dental.

Recomendaciones

- El uso clínico de la cámara mirrorless Sony® a6400 en protocolos fotográficos estandarizados para mejorar la precisión en la reproducción del color dental.
- Realizar más investigaciones *in vivo* e *in vitro* que comparen la correspondencia y precisión de cámaras digitales en la determinación del color dental, utilizando como referencia los valores predeterminados de la Guía VITA® Classical y la Guía VITA® 3D-MASTER. Estos estudios permitirían evaluar la capacidad de distintos dispositivos para reproducir tonos estandarizados, mejorar la comunicación clínico-laboratorio y optimizar la selección de color en odontología.
- Que futuros estudios implementen un control riguroso de los factores técnicos y de funcionamiento que puedan influir en la precisión cromática de los dispositivos evaluados. Esto incluye la verificación del estado operativo de las cámaras (sensor, lente, firmware), la calibración periódica del equipo, la supervisión de condiciones constantes de captura (distancia, ángulo, iluminación), y la estandarización del software de procesamiento de imágenes. El control de estas variables es esencial para garantizar la reproducibilidad de los resultados y minimizar la variabilidad intra- e inter-instrumental.

Bibliografía

1. Hein S, Tapia J, Bazos P. eLABor_aid: A new approach to digital shade management. *Int J Esthet Dent*. 2017;12(2):186–202. <https://elabprime.com/wp-content/uploads/2020/05/eLAB-EN.pdf>
2. Hein S, ten Bosch JJ. The effect of ultraviolet induced fluorescence on visually perceived tooth color under normal light conditions. *Dental Materials*. 2018;34:819–823. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.02.007>
3. Ragain JC. A Review of Color Science in Dentistry: Colorimetry and Color Space. *Journal of Dentistry, Oral Disorders & Therapy*. 2016;4(1). <https://doi.org/10.15226/jdodt.2016.00148>
4. Khashayar G, Bain PA, Salari S, Dozic A, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry. *Journal of Dentistry*. 2014;42.. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.11.017>
5. Wee AG, Lindsey DT, Kuo S, Johnston WM. Color accuracy of commercial digital cameras for use in dentistry. *J Prosthet Dent [Internet]*. 2006 [cited 2025 Oct 22];97:178–287. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2006.08.025>
6. Fondriest J. Shade matching in restorative dentistry: the science and strategies. *J Prosthet Dent*. 2004;91(6):553. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2004.03.015>
7. Bhat V, Krishna Prasad D, Sood S, Bhat A. Role of colors in prosthodontics: Application of color science in restorative dentistry., *Indian Journal of Dental Research*. 2011;22. <https://doi.org/10.4103/0970-9290.94675>
8. Hina M, Ali MS, Pande D, Pandey KK, Kandwal N, Tasar D, et al. A Comparative Study to Check the Accuracy of Tooth Shade Selection With Standardized Digital Photographs and a Spectrophotometer. *Cureus*. 2024;16(3). <https://doi.org/10.7759/cureus.56073>
9. Chu SJ, Trushkowsky RD, Paravina RD. Dental color matching instruments and systems. Review of clinical and research aspects. *Journal of Dentistry*. 2010;38:e2–e16. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2010.07.001>
10. Tabatabaian F, Beyabanaki E, Alirezaei P, Epakchi S. Visual and digital tooth shade selection methods, related effective factors and conditions, and their accuracy and precision: A literature review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2021;33(8):1084–104. <https://doi.org/10.1111/jerd.12816>
11. Mohammed AO, Mohammed GS, Mathew M, Alzarea B, Bandela V. Shade Selection in Esthetic Dentistry: A Review. *Cureus*. 2022;20. <https://doi.org/10.7759/cureus.23331>
12. Menini M, Rivolta L, Manauta J, Nuvina M, Kovacs-Vajna ZM, Pesce P. Dental Color-Matching Ability: Comparison between Visual Determination and Technology. *Dent J (Basel) [Internet]*. 2024;12(9):284–295. <https://doi.org/10.3390/dj12090284>
13. Shetty S, Gali S, Augustine D, Sowmya S V. Artificial intelligence systems in dental shade-matching: A systematic review. *Journal of Prosthodontics*. 2024;33. <https://doi.org/10.1111/jopr.13805>
14. Schmeling DDS, MS, PhD M. Color Selection and Reproduction in Dentistry. Part 1: Fundamentals of Color. *Odovtos - International Journal of Dental Sciences*. 2016;18(1). <https://doi.org/10.15517/ijds.v18i1.23486>
15. Schmeling DDS, MS, PhD M. Color Selection and Reproduction in Dentistry Part 2: Light Dynamics in Natural Teeth. *Odovtos - International Journal of Dental Sciences*. 2016;18(2). <https://doi.org/10.15517/ijds.v18i2.24493>
16. Schmeling DDS, MS, PhD M. Color Selection and Reproduction in Dentistry. Part 3: Visual and Instrumental Shade Matching. *Odovtos - International Journal of Dental Sciences*. 2017;19(1). <https://doi.org/10.15517/ijds.v0i0.28083>
17. Floriani F, Brandfon BA, Sawczuk NJ, Lopes GC, Rocha MG, Oliveira D. Color difference between the vita classical shade guide and composite veneers using the dual-layer technique. *J Clin Exp Dent*. 2022 Aug 1;14(8):e615–20. <https://doi.org/10.4317/jced.59759>
18. Şahin N, Ural Ç. Comparison of different digital shade selection methodologies in terms of accuracy. *Journal of Advanced Prosthodontics*. 2024;16(1). <https://doi.org/10.4047/jap.2024.16.1.38>
19. Jarad FD, Russell MD, Moss BW. The use of digital imaging for colour matching and communication in restorative dentistry. *Br Dent J*. 2005;199(1):43–9. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4812559>

20. Kim-Pusateri S, Brewer JD, Davis EL, Wee AG. Reliability and accuracy of four dental shade-matching devices. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2009;101(3):193-9. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(09\)60028-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(09)60028-7)
21. VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co.KG. Compendio VITA Marzo 2018 [Internet]. 2018 Mar [cited 2025 Aug 4]. Disponible en: <https://www.vita-zahnfabrik.com/>
22. Vita C. Compendio VITA. 2015.
23. Hein S, Nold J, Masannek M, Westland S, Spies BC, Wrbas KT. Comparative evaluation of intraoral scanners and a spectrophotometer for percent correct shade identification in clinical dentistry. *Clin Oral Investig* [Internet]. 2025;29(1). <https://doi.org/10.1007/s00784-024-06124-0>
24. Brokos Y, Stavridakis M, Krejci I. Digital Photographic Procedure for Comprehensive Two-Dimensional Tooth Shade Analysis. *Compend Contin Educ Dent*. 2017;38(8). <https://access.archive-ouverte.unige.ch/access/metadata/cc2705be-d917-4296-9665-0d686ed4cef3/download>
25. Volpato CÂM, Monteiro S, de Andrada MC, Fredel MC, Petter CO. Optical influence of the type of illuminant, substrates and thickness of ceramic materials. *Dental Materials* [Internet]. 2009;25(1). <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.04.013>
26. Kim JG, Yu B, Lee YK. Correlations between color differences based on three color-difference formulas using dental shade guide tabs. *Journal of Prosthodontics*. 2009;18(2). <https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2008.00393.x>
27. Moormann S, Guatelli-Steinberg D, Hunter J. Metamerism, morphogenesis, and the expression of carabelli and other dental traits in humans. *Am J Phys Anthropol*. 2013;150(3). <https://doi.org/10.1002/ajpa.22216>
28. Fayed AE, Mohamed H, Othman H. A Comparison between visual shade matching and digital shade analysis system using K-NN algorithm. *Al-Azhar Journal of Dental Science*. 2022;25(2). <https://doi.org/10.21608/ajdsm.2021.85035.1211>
29. Kelkar K, Dogra E, Bhat V, Prasad D, Hegde C. A comparison between visual, digital photography and polarizing filter photography for shade selection. *Indian Journal of Dental Research*. 2020;31(5). https://doi.org/10.4103/ijdr.IJDR_286_19
30. Jorquera GJ, Atria PJ, Galán M, Feureisen J, Imbarak M, Kernitsky J, et al. A comparison of ceramic crown color difference between different shade selection methods: Visual, digital camera, and smartphone. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2022;128(4), 784-792. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.07.029>
31. Igiel C, Weyhrauch M, Wentaschek S, Scheller H, Lehmann KM. Dental color matching: A comparison between visual and instrumental methods. *Dent Mater J*. 2016;35(1). <https://doi.org/10.4012/dmj.2015-006>
32. Antony JK, George L, Mathew J. Assessment of shade matching using visual and instrumental methods. *The Saint's International Dental Journal*. 2021;5(2):37-41. https://doi.org/10.4103/sidj.sidj_8_21
33. Hein S, Zangl M. The use of a standardized gray reference card in dental photography to correct the effects of five commonly used diffusers on the color of 40 extracted human teeth. *Int J Esthet Dent*. 2016;11(2). https://elabprime.com/wp-content/uploads/2020/05/IJEDe_16_02_Hein_897_2.pdf
34. Alfaraj A, Lin WS. Color reproduction trueness of 3D-printed full-color dental casts with scans derived from an intraoral scanner. *Journal of Prosthodontics* [Internet]. 2023;34(12):196-203. <https://doi.org/10.1111/jopr.13821>
35. Saincher R, Kumar S, Gopalkrishna P, Maithri M, Sherigar P. Comparison of color accuracy and picture quality of digital SLR, point and shoot and mobile cameras used for dental intraoral photography - A pilot study. *Heliyon*. 2022;8(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09262>
36. Tam WK, Lee HJ. Accurate shade image matching by using a smartphone camera. *J Prosthodont Res* [Internet]. 2017;61(2):168-76. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2016.07.004>
37. Yung D, Tse AK, Hsung RT, Botelho MG, Pow EH, Lam WY. Comparison of the colour accuracy of a single-lens reflex camera and a smartphone camera in a clinical context. *J Dent*. 2023;137. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104681>

38. Odaira C, Itoh S, Ishibashi K. Clinical evaluation of a dental color analysis system: The Crystaleye Spectrophotometer®. *J Prosthodont Res* [Internet]. 2011;55(4):199-205. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2010.12.005>
39. Crespo PC, Córdova AK, Palacios A, Astudillo D, Delgado B. Variability in Tooth Color Selection by Different Spectrophotometers: A Systematic Review. *Open Dent J*. 2022;16(1):20-5. <https://doi.org/10.2174/18742106-v16-e221124-2022-48>
40. Ferreira Dias SB, da Silva Marque DN, António Duarte Sola Pereira da Mata, Cardoso AB, Nunes Pereira RM, Lourenço Silveira JMC. $L^*A^*B^*$ Values in VITA Classical and VITA 3D Master by Two Dental Spectrophotometers. *International Journal of Prosthodontics*. 2023 Oct;36(5). <https://doi.org/10.11607/ijp.7235>
41. Mokhtar H, Yagmour O, Alhalafi B, Alkhaldi A, Alotaibi I, Khoqandi T, et al. Spectrophotometers, Shade Guides, and Color Perception and its Relation to Digital Shade Matching in Restorative Dentistry. *Journal of Healthcare Sciences*. 2023;03(10). <https://doi.org/10.52533/JOHS.2023.31006>
42. AlGhazali N, Burnside G, Smith RW, Preston AJ, Jarad FD. Performance assessment of Vita Easy Shade spectrophotometer on colour measurement of aesthetic dental materials. *Eur J Prosthodont Restor Dent*. 2011;19(4). https://doi.org/10.1922/EJPRD_1003Jarad07
43. Sluzker A, Knösel M, Athanasiou AE. Sensitivity of digital dental photo CIE $L^*a^*b^*$ analysis compared to spectrophotometer clinical assessments over 6 months. *Am J Dent*. 2011;24(5):300-4. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22165458/>
44. Gómez-Polo C, Gómez-Polo M, Celemin-Viñuela A, Martínez Vázquez De Parga JA. Differences between the human eye and the spectrophotometer in the shade matching of tooth colour. *J Dent*. 2014;42(6):742-5. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.10.006>
45. Fattouh M, Kenawi LMM, Aboelela OA. Repeatability of visual, spectrophotometer and intraoral scanner methods in shade matching: A comparative in-vivo study. *Int J Dent Oral Sci*. 2021;8(5):2439-2445. <https://doi.org/10.19070/2377-8075-21000480>
46. Mahn E, Tortora SC, Olate B, Cacciuttolo F, Kernitsky J, Jorquera G. Comparison of visual analog shade matching, a digital visual method with a cross-polarized light filter, and a spectrophotometer for dental color matching. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2021;125(3). <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.02.002>
47. Tam WK, Lee HJ. Dental shade matching using a digital camera. *J Dent* [Internet]. 2012;40(SUPPL.2):e3. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.06.004>
48. Bister D, Mordarai F, Aveling RM. Comparison of 10 digital SLR cameras for orthodontic photography. *J Orthod*. 2006;33(3). <https://doi.org/10.1179/146531205225021687>
49. Karunakar Shetty D, Alesayi FK, Albakri A, Mohsen B, Qasem R, Hussain A, Alunazi AM, et al. Comparison Between Visual, Digital Photography, And Polarizing Filter Photography for Shade Selection Among the Adult Jeddah Population. *Int J Life Sci Pharma Res*. 2023;13(5). <https://doi.org/10.22376/ijlpr.2023.13.5.L199-L208>
50. Li Q, Yu H, Wang YN. In vivo Spectro radiometric evaluation of colour matching errors among five shade guides. *J Oral Rehabil*. 2009;36(1):65-70. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2008.01894.x>
51. Alessandra A, Lazarte G, Sofía C, Soto P. Evaluación del color en fotografías digitales utilizando dos marcas de cámara con diferentes técnicas de iluminación y una tarjeta gris de referencia. Tesis. Universidad Peruana Cayetano Heredia; 2019. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RPCH_a5547fffa9f5d29304ealc5949b38056
52. Haciali C, Korkut B, Yanikoglu F. Clinical assessment of dental color during dehydration and rehydration by various dental photography techniques. *Odontology*. 2025;13(4):1558-1572. <https://doi.org/10.1007/s10266-025-01081-w>
53. Karaimer HC, Brown MS. Improving Color Reproduction Accuracy on Cameras. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018;6440-9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00674>
54. Lasarte M De, Vilaseca M, Pujol J, Arjona M, Perales E, Viqueira V. Influence of technology, color architecture and bit-depth of optoelectronic imaging sensors used as color measurement instruments. En *Congress of the International Colour Association*; 2005. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/958/1/aic_4.pdf

55. Pecho OE, Ghinea R, Alessandretti R, Pérez MM, Della Bona A. Visual and instrumental shade matching using CIELAB and CIEDE2000 color difference formulas. *Dental Materials*. 2016;32(1). <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.10.015>
56. Lizama A, Lizama García H. Validación de método fotográfico-computacional como herramienta de registro de color dentario. Tesis. Universidad de Chile; 2019. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/187271/Validacion-Metodo.pdf?sequence=1>
57. Rondón LF, Ramírez R, Pecho OE. Comparison of visual shade matching and photographic shade analysis. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2022 Mar 1;34(2):374-82. <https://doi.org/10.1111/jerd.12883>
58. Kelkar KC, Dogra ES, Bhat V, Hegde C. OSC36: A Comparison Between Conventional V/S Digital Photography V/S Polarizing Filter Photography for Shade Selection. *J Indian Prosthodont Soc*. 2018;18(10):S23-S34. <https://doi.org/10.4103/0972-4052.244628>
59. Herrera LJ, Pulgar R, Santana J, Cardona JC, Guillen A, Rojas I, et al. Prediction of color change after tooth bleaching using fuzzy logic for Vita Classical shades identification. *Appl Opt*. 2010;49(3). <https://doi.org/10.1364/AO.49.000422>
60. Park JH, Lee YK, Lim BS. Influence of illuminants on the color distribution of shade guides. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2006;96(6). <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2006.10.007>
61. Szalewski L, Wójcik D, Tokarczuk O, Ozdas T, Durllej G. The role of lighting type in dental photography for tooth shade assessment. *Medrxiv*. 2025. <https://doi.org/10.1101/2025.05.14.25327573>
62. Ontiveros JC, Paravina RD. Color and shade matching in operative dentistry. *Sturdevant's Art and Science of Operative Dentistry*. 2018;25(4):200-18. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-47833-5.00007-1>
63. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, Bona AD, Igiel C, Linninger M, et al. Color difference thresholds in dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2015;27(S1). <https://doi.org/10.1111/jerd.12149>
64. Rashid F, Farook TH, Dudley J. Digital Shade Matching in Dentistry: A Systematic Review. *Dent J (Basel)*. 2023;11(11). <https://doi.org/10.3390/dj11110250>
65. Johnsen S. How to measure color using spectrometers and calibrated photographs. *Journal of Experimental Biology*. 2016;219(6):772-8. <https://doi.org/10.1242/jeb.124008>
66. Kim HK. Evaluation of the repeatability and matching accuracy between two identical intraoral spectrophotometers: An in vivo and in vitro study. *Journal of Advanced Prosthodontics*. 2018;10(3). <https://doi.org/10.4047/jap.2018.10.3.252>
67. Gouveia LCP, Choubey B. Advances on CMOS image sensors. *Sensor Review*. 2016;36(3):231-9. <https://doi.org/10.1108/SR-11-2015-0189>
68. Kim JG, Yu B, Lee YK. Correlations between color differences based on three color-difference formulas using dental shade guide tabs. *Journal of Prosthodontics [Internet]*. 2009;18(2). <https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2008.00393.x>