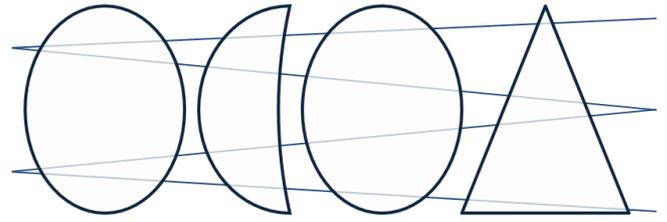




UNIVERSIDAD
DE GRANADA



MÁSTER EN OPTOMETRÍA CLÍNICA Y ÓPTICA AVANZA

NUEVO SOFTWARE PARA LA COMPARACIÓN DE GAMAS DE COLOR

Trabajo Fin de Máster

Ana Belén López Baldomero

Grado en Óptica y Optometría

Granada, 2020



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



MÁSTER EN OPTOMETRÍA CLÍNICA Y ÓPTICA AVANZA

ESTUDIANTE	ANA BELÉN LÓPEZ BALDOMERO
TUTOR/A	ANTONIO MANUEL RUBIÑO LÓPEZ <i>CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD</i> <i>DEPARTAMENTO DE ÓPTICA/UNIVERSIDAD DE GRANADA</i>
COTUTOR/A	CARLOS SALAS HITA <i>PROFESOR COLABORADOR</i> <i>DEPARTAMENTO DE ÓPTICA/UNIVERSIDAD DE GRANADA</i>
TÍTULO	NUEVO SOFTWARE PARA LA COMPARACIÓN DE GAMAS DE COLOR
CURSO ACADÉMICO	2019-2020

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que el presente Trabajo Fin de Máster es original, por lo que no se ha plagiado en ningún momento durante la redacción del mismo y no se han utilizado fuentes sin citarlas de manera adecuada. Igualmente, expreso mi acuerdo para que el presente trabajo quede a disposición de la Comisión Académica del Máster de Optometría Clínica y Óptica Avanzada de la Universidad de Granada y para que sea publicado en su página WEB.

En Granada, a 19 de JULIO de 2020

FDO: ANA BELÉN LÓPEZ BALDOMERO



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



MÁSTER EN OPTOMETRÍA CLÍNICA Y ÓPTICA AVANZA

MANUSCRITO ORIGINAL	01
ABSTRACT/RESUMEN	01
INTRODUCCIÓN	02
VISUALIZACIÓN DE LAS GAMAS DE COLOR	02
ALGORITMOS PARA DETERMINAR LOS LÍMITES DE LAS GAMAS DE COLOR	03
PROGRAMAS PARA LA REPRESENTACIÓN DE GAMAS DE COLOR EN 3D	04
OBJETIVOS	04
MATERIAL Y MÉTODO	04
SELECCIÓN DEL ESPACIO DE COLOR Y LOS ALGORITMOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES Y EL VOLUMEN DE LAS GAMAS DE COLOR	04
SELECCIÓN DE LA PLATAFORMA Y DATOS DE ENTRADA	05
CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE	05
VALIDACIÓN DEL SOFTWARE	05
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	06
INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	06
VALIDACIÓN DEL SOFTWARE	07
CONCLUSIONES	12
BIBLIOGRAFÍA	13

Manuscrito Original

Nuevo software para la comparación de gamas de color generadas mediante dispositivos de impresión gráfica

Nuevo software para la comparación de gamas de color

Ana Belén López Baldomero¹; Antonio Manuel Rubiño López¹; Carlos Salas Hita¹

¹Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada

Corresponding author:

Ana Belén López Baldomero

anabelenlb@correo.ugr.es (ABLB)

Abstract

In colour industry it is really important to know the colour gamut of a device. Through the comparison of gamuts we can see the effects that the use of different inks, papers, light sources or printing technologies has on the colour obtained. There are several programs that make this comparison, but they have some drawbacks. Therefore, we have developed and validated a software to compare colour gamuts generated by printing devices. Before doing so, we have selected the most suitable procedure to carry out this comparison. The software, programmed in MATLAB, represents the gamuts simultaneously in the 3D CIELAB space by interpolating the most external data of the gamut. It also calculates their volume using two algorithms: Convex Hull and Alpha Shapes. The representation is made by interacting with the buttons on the interface. To validate our software, we have performed a double analysis. On the one hand, we have compared the results obtained from the study of the colour gamuts with our software and those obtained in a previous work with the same data. On the other hand, we have used the program ICC3D to compare the representations of the gamuts superimposed in 3D with those of our program, in addition to the volume obtained. The conclusions obtained after using the two programs were the same. Even so, our program presents some advantages. It allowed us to identify differences between the gamuts that were not discriminated by other methods, obtaining more precise information. The new software will allow the study and comparison of gamuts generated by different printing technologies with different papers, ICC profiles and light sources.

Resumen

En la industria del color es muy importante conocer la gama de colores de un dispositivo. Mediante la comparación de gamas podemos evaluar el efecto que tiene el uso de distintas tintas, papeles, fuentes de iluminación o dispositivos de impresión en el color obtenido. Existen diversos programas que realizan esta comparación, pero tienen inconvenientes. Por ello hemos desarrollado y validado un software para comparar gamas de color generadas por dispositivos de impresión gráfica. Antes de ello, hemos seleccionado el procedimiento más adecuado para realizar esta comparación. El software, programado en MATLAB, representa las gamas simultáneamente en el espacio 3D CIELAB a partir de la interpolación de los datos más externos de la gama, además de calcular su volumen mediante dos algoritmos: Convex Hull y Alpha Shapes. La representación se realiza a partir de la interacción con los botones de la interfaz. Para validar nuestro software hemos realizado un doble análisis. Por un lado, hemos comparado los resultados obtenidos del estudio de las gamas de color con nuestro software y los obtenidos en un TFG previo con los mismos datos. Por otro lado, hemos usado el programa ICC3D para comparar las representaciones de las gamas superpuestas en 3D con las de nuestro programa, además del volumen obtenido. Las conclusiones tras el uso de los dos programas fueron las mismas, encontrando figuras muy similares. Aun así, nuestro programa presenta algunas ventajas. Este nos permitió distinguir diferencias entre las gamas que mediante otros métodos no se discriminaron, obteniendo información más precisa. El nuevo software va a permitir el estudio y comparación de las gamas generadas por distintos dispositivos de impresión gráfica con distintos sustratos de impresión, perfiles ICC e iluminación.

Introducción

La gama de colores de un dispositivo es el conjunto de colores que pueden ser capturados o reproducidos por éste, ya sea una impresora o una pantalla [1], en unas condiciones de observación determinadas [2]. Se trata de una zona delimitada en el espacio de color [3].

En las impresoras, la gama depende de la cantidad de CMYK (cian, magenta, amarillo y negro) utilizada, el tipo de tecnología usada en la impresión, características de la tinta, el sustrato donde se imprime [4] y las condiciones de impresión prefijadas [5].

En la industria del color es muy importante conocer la gama de color de un dispositivo [6], pues mediante la comparación de gamas podemos evaluar de forma cuantitativa los efectos que tiene el uso de distintas tintas, papeles, fuentes de iluminación o dispositivos de impresión en el color obtenido [7]. También es necesario conocer la gama para saber qué colores están fuera de ella y cómo estos pueden ser reproducidos para conseguir el mejor rendimiento, lo que se denomina 'gamut mapping' [3,8].

Visualización de las gamas de color

La elección del espacio usado para reproducir la gama es importante [9]. El CIELAB es un espacio de color perceptual que se asimila a la forma en que los humanos percibimos el color. Es uniforme, lo que quiere decir que distancias iguales entre L^* , a^* y b^* se corresponden con diferencias aproximadamente iguales de color para un observador promedio [8].

Tradicionalmente para evaluar gamas de color se utilizaba el espacio 2D del diagrama de cromaticidad CIE-1931, representando los colores primarios (CMY) y secundarios (RGB) de las mezclas sustractivas y uniéndolos mediante líneas rectas. Una alternativa similar para medir el volumen de la gama era representar también el blanco y el negro, y formar un polígono [4]. Otra opción era representar la gama en el espacio CIELAB, para luminosidad y croma (L^* y C_{ab}^*) constantes, variando el tono (h_{ab}^*), o viendo la proyección en distintos planos a^*-b^* [10,11]. Sin embargo, estas representaciones sólo daban una idea general de la gama y se perdía mucha información [5,7]. La gama de color es realmente un volumen en 3D [12–14], por lo que se empezó a representar ésta mediante sólidos de color [15] o nubes de puntos [11,16].

También se ha visto que el cálculo del volumen de las gamas nos aporta información importante y muy precisa [17]. Por ello hay autores que combinan la representación 3D de la gama con el cálculo de su volumen [2,14,17,18]. Esto permite realizar un análisis cualitativo, viendo las figuras 3D, y cuantitativo, mediante el volumen [17].

Para comparar gamas de color se pueden representar simultáneamente en un mismo sistema de coordenadas [9,19], siendo el espacio CIELAB el más usado para ello [20–22]. Incluso se puede generar el sólido que se obtiene de la diferencia de dos gamas [15] o calcular el volumen que queda en la intersección de las mismas [2].

Algoritmos para determinar los límites de las gamas de color

Cuando queremos calcular el volumen de una gama de color, es necesario conocer los límites de la misma. Para ello se pueden usar distintos algoritmos matemáticos.

Algoritmo para el cálculo de la envolvente convexa (Convex Hull): La envolvente convexa de un conjunto de puntos es el poliedro convexo más pequeño que contiene todos los puntos [23]. Siempre proporciona un volumen mayor al real, ya que la estructura que se forma no presenta zonas cóncavas [4,24]. Esto se traduce en una sobreestimación del volumen de un 10% aproximadamente [24]. Si tenemos un sólido convexo y suficientes puntos en la superficie de la gama, este algoritmo puede ser muy preciso [4,23].

Distintos investigadores mejoraron este algoritmo. Balasubramanian y Dalal [4] introdujeron un parámetro gamma para procesar los datos, teniendo en cuenta las concavidades de la gama. Otros dos investigadores presentaron una nueva modificación [25], obteniendo una superficie simplificada pero muy precisa.

Estos algoritmos pueden usarse con cualquier número de muestras y no necesitan del conocimiento de los valores de CMYK utilizados [4]. El principal problema es que los descriptores de los límites de la gama (puntos que definen esos límites) no se distribuyen uniformemente en la superficie, dificultando el 'gamut mapping' [22,23].

Algoritmo Alpha Shape: Cholewo y Love [3] propusieron el uso de Alpha Shape para construir las gamas de color. Es una generalización de la envolvente convexa aplicable a sólidos no convexos. Construye la gama a partir de la triangulación de Delaunay [3]. Se usa un parámetro α para determinar qué tetraedros forman parte de la estructura final. Se debe encontrar el valor de este parámetro que conecte el mayor número de tetraedros sin dejar huecos dentro de la estructura final. Bakke *et al.* creían que el mejor α era aquel que tenía el valor más alto de tal forma que el volumen final fuera igual o menor al 90% del que se obtiene con el algoritmo de la envolvente convexa [24].

Este algoritmo tiene la desventaja de ser difícil de implementar, pero ajustando interactivamente el valor de α se puede obtener la mejor visualización y aproximación del volumen de la gama [24].

Algoritmo del segmento máximo: Con este algoritmo se divide el espacio de color en distintos segmentos, según el tono y la luminosidad. En cada segmento se coge el punto que tiene la mayor distancia respecto al centro de la gama y éstos se unen mediante triangulación [26]. El problema es que el error al determinar los límites de las áreas de mayor saturación es mayor con respecto a las de menor saturación [23].

El algoritmo del segmento máximo es muy usado a día de hoy para el 'gamut mapping', construir perfiles ICC, y otras aplicaciones en la industria del color [23].

Método de la segmentación irregular: Para solucionar el problema del algoritmo del segmento máximo se desarrolló el método de la segmentación irregular. Con él se calculaban más descriptores de la gama en las zonas de alta saturación, aumentando la precisión y creando un algoritmo muy veloz [23].

Programas para la representación de gamas de color en 3D

Desde hace muchos años se han estado desarrollando herramientas y técnicas para la visualización de gamas de color [8,10,27]. Varias han sido implementadas en C, Java3D [11], JavaScript [3] y Matlab [28]. Algunas de las más importantes son: ColorThink Pro (CHROMiX) [29], GamOpt (Hewlett Packard Enterprise) [8], Gamutvision (Imatest LLC) [30], Perfx 3D gamut viewer (TGLC Inc.) [31] e ICC3D (NTNU) [19]. La mayoría permiten la representación y comparación de gamas en 3D [5,8,30,31], cálculo de su volumen [5], evaluación de perfiles ICC [30–32] e incluso manipulación de las gamas para su optimización [8].

En general, estos programas han sido creados hace bastante tiempo, lo que genera algunos problemas a la hora de usarlos. Por ejemplo, GamOpt no está disponible en ninguna plataforma. ColorThink es de pago, lo que limita su uso. Por otro lado, Gamutvision y Perfx 3D gamut viewer sólo permiten la visualización de gamas a partir de perfiles ICC, no siendo útiles si tenemos una serie de medidas del color. El único programa que podemos usar para representar y comparar gamas es el ICC3D, pero también tiene algunos inconvenientes. Por ello hemos decidido crear un programa para comparar gamas de color, abriendo un gran abanico de posibilidades para la investigación de los factores que modifican estas gamas.

Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Análisis y selección del procedimiento más adecuado para la determinación y comparación de gamas de color.
- Creación de un software propio que permita la comparación de gamas de color de dispositivos de impresión gráfica a partir de la medida de un patrón con 1331 muestras.
- Validación del software creado.

Material y método

Selección del espacio de color y los algoritmos para la determinación de los límites y el volumen de las gamas de color

No es fácil comparar gamas de color tridimensionales. Para conseguir una comparación entre gamas lo más completa posible, éstas deben estar representadas simultáneamente en tres dimensiones [12–14], y es muy interesante poder calcular el volumen de las mismas [17].

Para la representación de las gamas vamos a usar el espacio de color CIELAB, por ser independiente del dispositivo empleado [5], y por tratarse de un espacio de color uniforme [8,33].

En nuestro caso, los datos se han obtenido a partir de la medida con un espectrorradiómetro de un patrón impreso con 1331 muestras de color, en las que se han ido variado los primarios de la impresora (más detalles sobre el método de medida: [34]). Para generar los límites de las gamas se va a usar la interpolación por el vecino más cercano, debido a que puede usarse para interpolar datos en 3D y requiere muy poco tiempo de procesado [35]. Este método asigna el

valor del punto más cercano al que se quiere interpolar, sin variar demasiado los valores originales [36]. Además, la interpolación es independiente de la concavidad o convexidad de la figura [28].

Para el cálculo del volumen de las gamas se utilizaron dos algoritmos: el de la envolvente convexa y el Alpha Shapes. Ambos estaban implementados en el lenguaje de programación que utilizamos, siendo los más usados en distintos artículos [17,19]. Además, el Alpha Shapes es el algoritmo más avanzado para el cálculo del volumen [24,37]. Así podemos comparar los volúmenes obtenidos con los dos algoritmos, sabiendo que la envolvente convexa sobreestima el valor [24].

Selección de la plataforma y datos de entrada

Es complicado tanto desarrollar programas interactivos para la representación 3D de gamas de color desde cero como modificar y añadir extensiones a programas acabados [38]. Hemos decidido modificar un programa que ya teníamos en Matlab, y que ha sido usado en otros trabajos para la representación de gamas de color [34,39]. Éste permitía generar una única gama 3D en el espacio de color xyY, sin proporcionar datos sobre su volumen. Así pues, usamos la plataforma Matlab (MATLAB R2020a) para la creación de nuestro programa. Ésta tiene varias ventajas sobre otros lenguajes de programación: los algoritmos implementados han sido previamente comprobados, el entorno está adaptado a las tareas científicas, permitiendo un procesamiento de datos rápido, es un lenguaje fácil de aprender y no hay que importar librerías externas para usar las funciones [40].

Los datos de entrada para nuestro programa van a ser las coordenadas colorimétricas $L^* a^* b^*$, calculadas con Excel a partir de las radiancias, y las cantidades de C M Y (cian, magenta y amarillo) usadas para generar cada color. Se crea un archivo MAT con la matriz 6 x 1331, 6 datos para cada uno de los 1331 colores. En total tenemos 4 gamas de color que se obtuvieron en un trabajo previo [34]. Estas gamas han sido generadas con una impresora de inyección de tinta (Epson XP-530) y una impresora láser (Canon iR-ADV C2020i), usando dos marcas de papel fotográfico: Epson y Ice Professional.

Características del software

Para crear nuestro software a partir del que teníamos previamente, se realizaron cuatro pasos:

- 1) Representación de la gama de color en el espacio CIELAB en lugar del espacio xyY;
- 2) Representación de dos gamas simultáneamente;
- 3) Creación de una Interfaz Gráfica de Usuario que permita el control interactivo de las gamas y el cálculo de su volumen;
- 4) Optimización de la Interfaz.

La optimización consistió en corregir errores y mejorar el código para aumentar la velocidad de representación gráfica.

Validación del software

Para poder saber si las representaciones obtenidas son correctas y validar el software, se ha realizado un doble análisis.

Por un lado, vamos a comparar los resultados en cuanto a qué gama de color es mayor en función del tipo de impresión y el papel. Para ello usaremos los resultados obtenidos en el TFG previo, en el que analizamos las gamas representándolas individualmente en el espacio xyY y en el diagrama de cromaticidad CIE 1931, además de comparar las coordenadas colorimétricas en algunos puntos [34]. Esto lo compararemos con los datos de nuestro software.

Por otro lado, vamos a usar el programa ICC3D (ICC3D 1.2.9) para comparar las representaciones de las gamas de color superpuestas en 3D con las de nuestro programa. Este software es el único que permite introducir nuestros datos, además de generar el volumen de las gamas con los dos algoritmos que usamos [24,41]. También evaluaremos las ventajas o desventajas de un programa frente a otro.

Resultados y discusión

Interfaz gráfica de usuario

Nuestro programa, COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65, presenta una interfaz dividida en dos zonas: un panel en el que se sitúan los botones y el valor del volumen, y unos ejes en los que se representan las figuras. Genera dos gamas de color en el espacio 3D CIELAB, de forma independiente o simultánea, mediante la interacción con los botones de la interfaz. Se han creado 7 botones con las siguientes funcionalidades:

- 1) Figura 1: Representa la gama de color del primer archivo a partir de la interpolación por el vecino más cercano.
- 2) Figura 2: Realiza lo mismo que el botón 1, para el segundo archivo.
- 3) Convex Hull 1: Representa la figura obtenida mediante el algoritmo de la envolvente convexa para los datos del archivo 1.
- 4) Convex Hull 2: Realiza lo mismo que el botón 3, para el segundo archivo.
- 5) Alpha Shape 1: Representa la figura obtenida mediante el algoritmo Alpha Shapes para los datos del archivo 1. Utiliza como valor de α aquel que encierra todos los puntos con el menor volumen posible.
- 6) Alpha Shape 2: Realiza lo mismo que el botón 5, para el segundo archivo.
- 7) Borrar figuras: Borra todas las figuras representadas.

También tenemos un cuadro de texto en el que se indica el volumen obtenido mediante el algoritmo de la envolvente convexa (Convex Hull) y Alpha Shapes para ambas figuras, permitiendo una comparación rápida de las gamas.

Figura 1 y 2 pueden representarse de forma individual o simultánea. Sin embargo, las figuras obtenidas por algoritmos no pueden observarse a la vez, ya que no necesitan ser comparadas. Se representan para saber qué área del espacio es la que se está utilizando para el cálculo del

volumen y poder modificar, si fuera necesario, el valor de α en el Alpha Shapes para mejorar la aproximación.

El programa creado permite el giro 3D de las gamas de forma interactiva para poder compararlas desde distintos puntos de vista. Además, las Figuras 1 y 2 presentan distinto grado de transparencia y las líneas que forman las superficies son distintas (en una figura son líneas continuas y en la otra, punteadas) para poder diferenciar bien ambas gamas. Los colores de estas figuras se distribuyen en función de la zona del espacio de color. Además de los ejes, también se ha añadido un título para saber qué figura corresponde a cada conjunto de datos.

Con la optimización del programa se consiguió reducir el tiempo de representación de las figuras, pasando de unos 10-11 s a 4-5 s.

En la Fig. 1 podemos ver la representación simultánea con nuestro software de las gamas de color obtenidas con los dos tipos de impresoras y el papel de la marca Ice. La diferencia en las líneas que forman las superficies de las gamas nos ayuda a saber cuándo una gama está por encima de otra. En este caso vemos como la gama de la impresora láser, que tiene una línea continua, está por encima de la impresora de inyección de tinta en los colores amarillos y amarillo-verdosos, mientras que la de la impresora de inyección de tinta, con la línea discontinua, es mayor en los verdes y azules. Esta comparación debe hacerse desde distintos puntos de vista para ver cómo se distribuyen las gamas en todo el espacio de color.

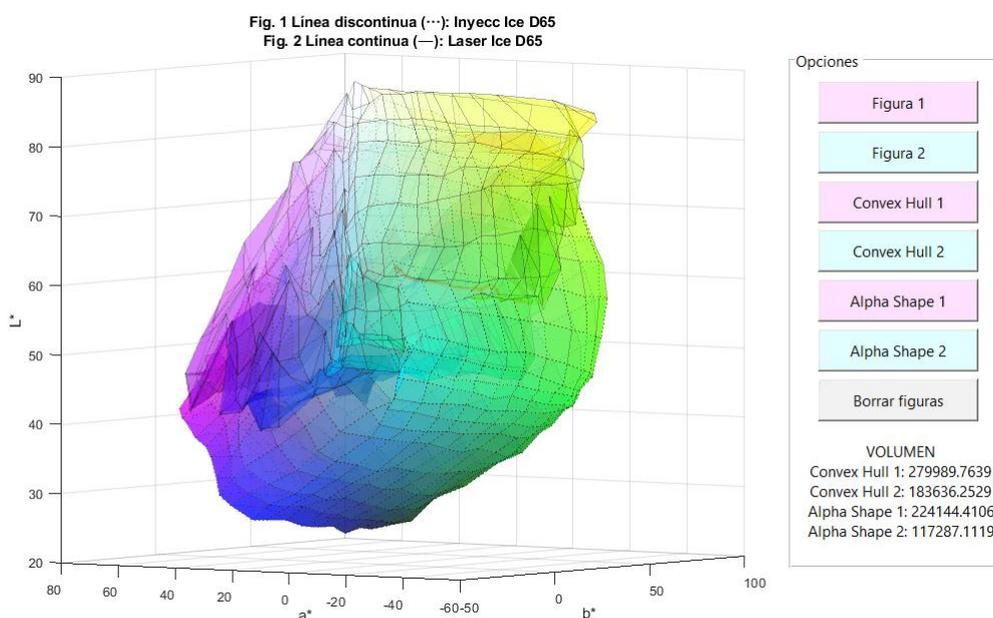


Figura 1. Comparación de las gamas de color obtenidas con la impresora de inyección de tinta y la impresora láser usando el papel de la marca Ice.

Validación del software

Lo primero que vamos a hacer para validar nuestro programa es comprobar los resultados que obtenemos al comparar las gamas de color frente a los que se obtuvieron en el TFG previo [34],

usando los mismos datos. Las conclusiones no tienen por qué ser las mismas, ya que los métodos usados para comparar las gamas son distintos, siendo más fiable la representación 3D que hacemos en nuestro software [5,7].

En el TFG, primero se compararon las figuras 3D en el espacio xyY de forma individual. Del mismo modo que con nuestro software, se obtuvo una superficie de la gama más suave con la impresora de inyección de tinta y más abrupta con la impresora láser, principalmente en la zona del azul oscuro – magenta [34], aunque también vemos esos picos en los verdes. A pesar de comparar distintos espacios de color (xyY y CIELAB), las conclusiones sobre las superficies de las gamas son las mismas en ambos trabajos.

Después se estudiaron las coordenadas colorimétricas en algunos puntos de la gama y se compararon los resultados para cada tipo de papel y cada sistema de impresión. Para la impresora de inyección de tinta con distinto papel se obtuvieron resultados muy similares, siendo el papel Epson el que proporcionaba una mayor gama en los rojos y el papel Ice, en los azules [34]. Si comparamos ambas gamas con nuestro programa, vemos que las figuras tienen una forma muy parecida, dificultándose la comparación al tener el mismo color. En estos casos podemos realizar una pequeña modificación en el código para cambiar el color de una de las gamas y diferenciarlas más fácilmente. Pusimos la gama del papel Epson de color rojo (Fig. 2). Vemos que efectivamente el papel de la marca Ice tiene una mayor gama en los azules - cian - magenta mientras que el papel Epson tiene una gama más amplia en el resto de colores, aunque las diferencias entre ambas no sean muy grandes. En estos casos la comparación mediante el volumen es muy importante. Podemos ver que con ambos algoritmos la gama de color obtenida con el papel Epson es mayor que la obtenida con el papel Ice (Fig. 2). Nuestro programa nos ha ayudado a distinguir diferencias que mediante otros métodos de comparación no se percibieron, lo que demuestra que permite detectar diferencias pequeñas entre dos gamas de color.

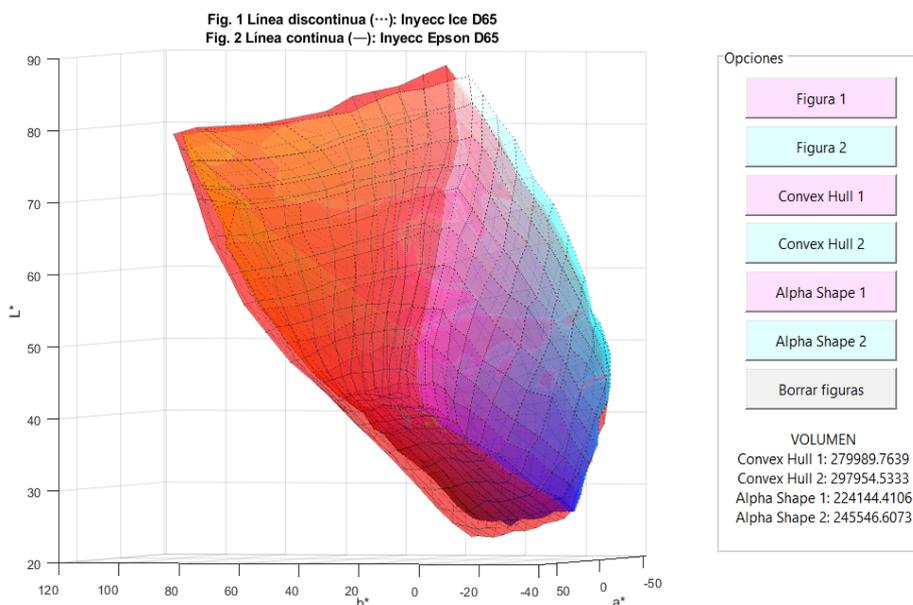


Figura 2. Comparación de las gamas de color obtenidas con la impresora de inyección de tinta para el papel Epson y el Ice.

Para la impresora láser, el papel de la marca Ice proporcionó una gama mayor en el magenta, azul, cian y verde, obteniendo en este caso una diferencia mayor entre los papeles [34]. Cuando representamos las dos figuras en nuestro programa son muy parecidas. Al compararlas vemos que el papel de la marca Ice proporciona una mayor gama en el verde, cian, azul y morado, mientras que el Epson da una gama mayor para el amarillo, naranja y magenta. Al comparar los volúmenes obtenidos con los dos algoritmos, tenemos una gama mayor con el papel Ice, a diferencia de lo que ocurre en la impresora de inyección de tinta. En este caso hemos obtenido información más precisa usando el software, ya que hemos podido ver exactamente en qué zonas del espacio de color una gama estaba sobre la otra.

Cuando se compararon los dos dispositivos para el mismo tipo de papel, se observó que la impresora láser producía una gama menor en el magenta, azul, verde y rojo [34]. Mediante el software puede verse que la impresora láser genera una gama de color más amplia para el cian, verde claro y verde-amarillento con el papel de la marca Epson, mientras que la impresora de inyección de tinta genera una gama mayor en los azules, verdes, naranjas, rojos y magentas. Si comparamos el volumen, hay una gran diferencia entre las dos gamas, siendo mayor la obtenida con la impresora de inyección de tinta (Fig. 3).

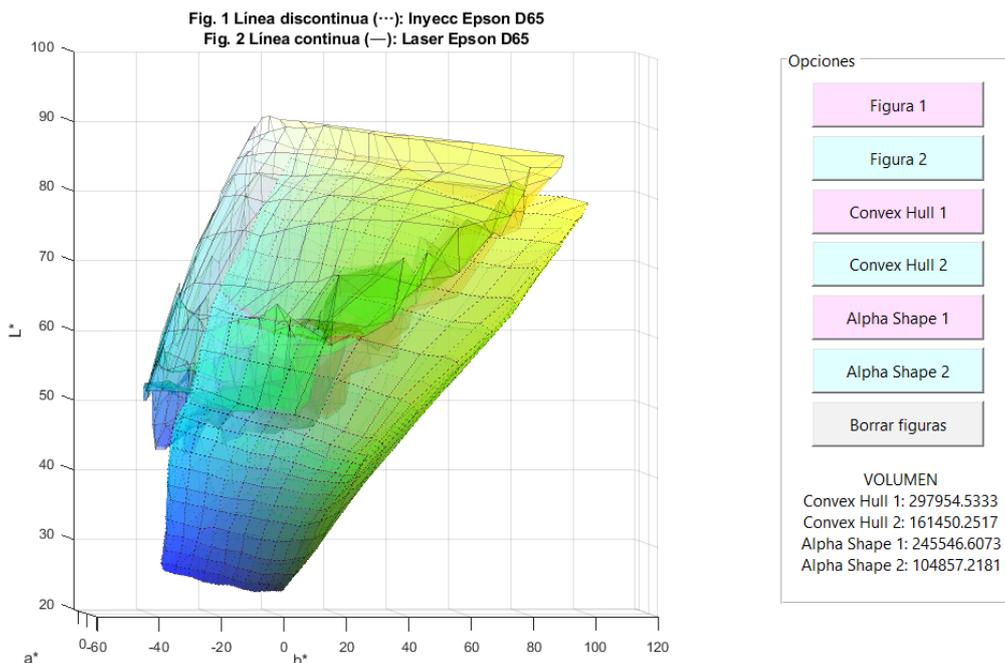


Figura 3. Comparación de las gamas de color obtenidas con la impresora de inyección de tinta y la impresora láser para el papel Epson.

Comparando los dos sistemas de impresión con el papel de la marca Ice se obtiene la misma conclusión en cuanto a la distribución de las gamas y el volumen que con el papel de la marca Epson, siendo en este último caso la diferencia en el volumen de las dos figuras mayor que en el caso de la marca Ice.

Por último, representamos los colores primarios y secundarios de las mezclas sustractivas en el diagrama de cromaticidad CIE 1931, y unimos los puntos formando un hexágono, concluyendo lo mismo que en el análisis de las coordenadas de cromaticidad [34]. Por tanto, concluimos que la impresora de inyección de tinta era la mejor opción [34]. Mediante el análisis de nuestro programa podemos concluir lo mismo.

Como hemos visto, la comparación de gamas de color de forma simultánea en 3D permite recoger más información que la que puede derivarse de la comparación 2D o incluso de la comparación 3D sin ser representadas a la vez. Además, el volumen es muy importante para seleccionar la gama mayor entre varias muy similares.

La comparación de gamas de color ha sido realizada por muchos autores, ya sea para comparar distintos tipos de papel [13,17] o sus propiedades ópticas [21], sistemas de impresión [6], o perfiles ICC [11]. Este programa puede ser muy útil para comparar gamas generadas por dispositivos de impresión gráfica de forma rápida y sencilla, modificando distintos factores como las condiciones de impresión prefijadas [5], el perfil ICC elegido, el sustrato de impresión [4] o la tecnología usada. También podríamos comparar las gamas tras un proceso de envejecimiento o de secado de la tinta.

Para realizar una segunda comprobación de nuestro software usamos el programa ICC3D. Este permite la representación de las gamas no solo en el espacio CIELAB, sino también en muchos otros espacios de color, de forma individual o simultánea. Además del algoritmo Alpha Shapes y de la envolvente convexa, también tiene implementados otros algoritmos para generar la gama y calcular su volumen.

Usamos los mismos datos para representar las gamas de color superpuestas en el espacio CIELAB y ver si coinciden con las obtenidas en nuestro programa. En el programa ICC3D no se usa la interpolación para calcular la superficie de la gama. Por tanto, para comparar las figuras obtenidas con las de nuestro programa de forma sencilla vamos a usar en una de las figuras la opción 'Quantized', en la que se representan los puntos del espacio de color como esferas, mientras que la otra gama vamos a representarla con Alpha Shapes, ya que es el algoritmo más exacto de los que dispone el programa [24,37]. Primero comparamos las gamas obtenidas con las dos impresoras y el papel fotográfico Ice. En la Fig. 4 podemos ver a la izquierda los resultados con el programa ICC3D, siendo la gama de la impresora de inyección de tinta representada con Alpha Shapes, y la impresora láser con esferas. A la derecha tenemos la misma comparación generada con nuestro programa mediante interpolación. De ambas comparaciones obtenemos las mismas conclusiones, igual que al emplear el papel Epson.

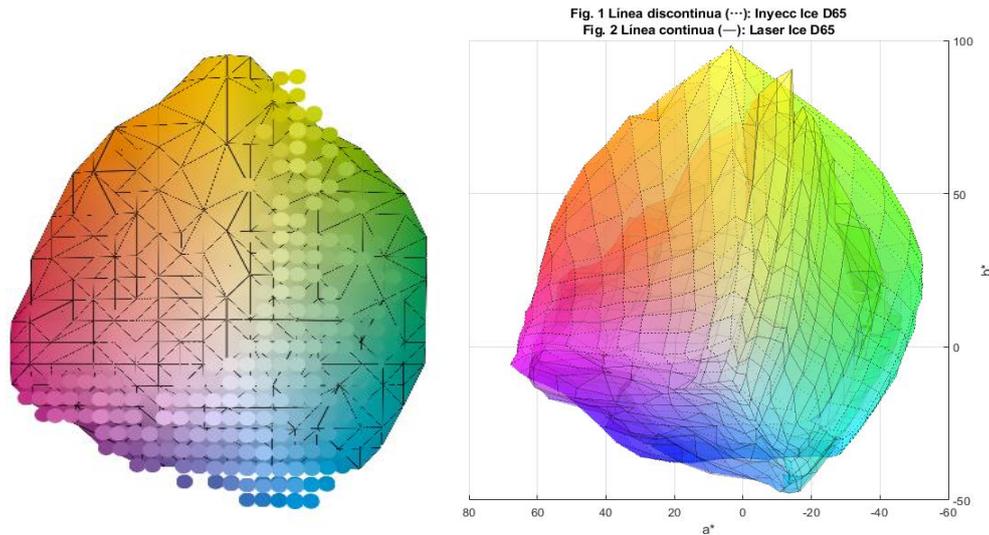


Figura 4. Comparación de las gamas obtenidas con la impresora láser y la impresora de inyección de tinta, usando el papel de la marca Ice, con el programa ICC3D (izquierda) y el software COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65 (derecha).

También comparamos el volumen y las figuras generadas con los algoritmos Alpha Shapes y Convex Hull. En la Tabla 1 pueden verse los volúmenes obtenidos con ambos programas para cada gama, en unidades CIELAB de volumen. En nuestro programa no sabemos el error correspondiente al cálculo del volumen, por lo que vamos a asociarle la última cifra significativa que nos proporciona el ICC3D, al darnos este un menor número de cifras: 0,01 y 1 unidad para el Convex Hull y Alpha Shapes respectivamente. En ICC3D no puede elegirse el valor numérico de Alpha, sino que se va variando en una barra de desplazamiento, por lo que los valores de volumen encontrados son los que generan las figuras más parecidas a las que obtenemos en nuestro programa. Así, los volúmenes obtenidos variaban un poco más de los generados en nuestro programa, a diferencia de lo que ocurría con el Convex Hull.

	Convex Hull		Alpha Shapes	
	COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65	ICC3D	COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65	ICC3D
Inyección Ice	279989,76	279989,75	224144	224161
Inyección Epson	297954,53	297954,47	245547	245590
Láser Ice	183636,25	183636,34	117287	117241
Láser Epson	161450,25	161450,50	104857	104563

Tabla 1. Volúmenes obtenidos con los programas ICC3D y COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65, usando los algoritmos Convex Hull y Alpha Shapes.

Las figuras generadas con el programa ICC3D eran muy similares a las obtenidas con nuestro software, tanto para al algoritmo Alpha Shapes (Fig. 5) como para el de la envolvente convexa.

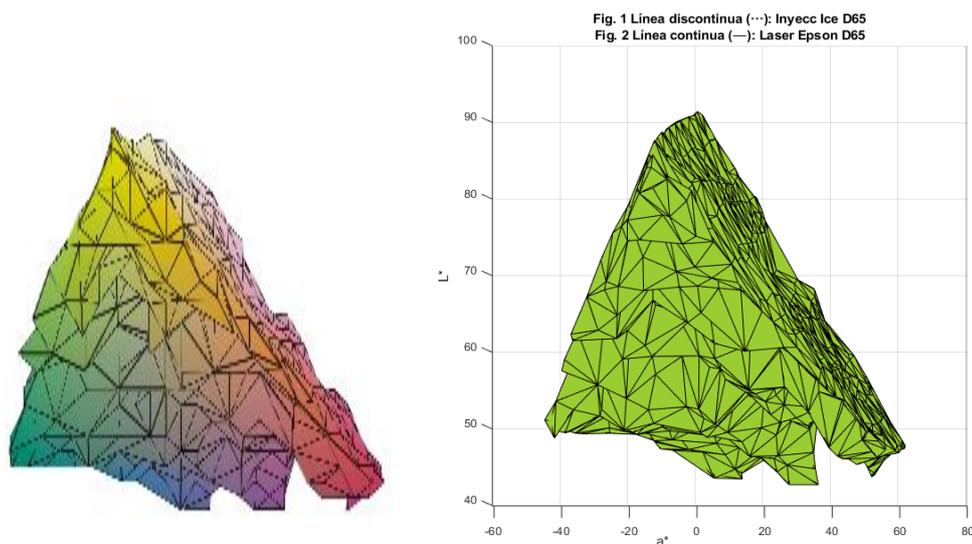


Figura 5. Figuras obtenidas con Alpha Shapes, en el programa ICC3D (izquierda) y COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65 (derecha), para la gama de la impresora láser y el papel Epson.

Tras el uso de los dos programas para la comparación de gamas de color, resaltamos algunas ventajas y desventajas de los mismos. ICC3D es bastante antiguo, por lo que las figuras no presentan muy buena resolución, además de que comparar dos gamas de color no es fácil, el programa no es suficientemente intuitivo. También emplea demasiado tiempo en representar las figuras y no se mueven bien al girarlas en 3D, impidiendo incluso a veces el movimiento debido a que el programa no responde. Otra desventaja es que la representación en CIELAB no presenta ejes numerados, por lo que no podemos saber el valor de a^* , b^* o L^* . Por otro lado, nuestro programa también presenta inconvenientes. Es cierto que las figuras no se mueven con total fluidez, pero el programa siempre responde. No tiene todos los modos de visualización de ICC3D, faltándole el método del segmento máximo, aunque esto no es un problema ya que este algoritmo no es muy exacto en los colores saturados [23]. También podría representar los puntos del espacio de color como esferas, pero esto dificulta mucho la comparación entre dos gamas. Nuestro programa no sirve para realizar 'gamut mapping' o representar gamas de color de imágenes, pero esto no supone un problema al no ser el objetivo del mismo.

Conclusiones

Como conclusión de nuestro estudio podemos decir que el procedimiento más adecuado para determinar y comparar dos gamas de color es la representación simultánea de ambas en el espacio 3D CIELAB, además del análisis de sus volúmenes. Se ha programado y validado un nuevo software para la comparación de gamas generadas por dispositivos de impresión gráfica en las condiciones descritas anteriormente. Este permite distinguir diferencias entre las gamas no detectables mediante otros métodos, obteniendo información muy precisa. El nuevo software va a permitir el estudio y comparación de las gamas generadas por distintos dispositivos de impresión gráfica con distintos sustratos de impresión, diferentes perfiles ICC y distinta iluminación.

Bibliografía

1. Setchell JS. Colour description and communication. *Colour Design: Theories and Applications*. Woodhead Publishing Limited; 2012. doi:10.1533/9780857095534.2.219
2. Li C, Luo MR, Li C, Cui G. The CRI-CAM02UCS colour rendering index. *Color Res Appl*. 2012;37: 160–167. doi:10.1002/col.20682
3. Cholewo TJ, Love S. Gamut boundary determination using alpha-shapes. *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology; 1999. pp. 200–204.
4. Balasubramanian R, Dalal E. Method for Quantifying the Color Gamut of an Output Device. *Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hard Copy, and Graphic Arts II*. SPIE; 1997. pp. 110–116. doi:10.1117/12.271580
5. Johansson N. Printing colour hard proofs using EFI Colorproof XF v.3.1 and Photoshop CS3 , and production substrates. Dalarna University. 2009.
6. Perales E, Chorro E, Viqueira V, Martínez-Verdú F, Otero S, De Gracia V. New method for comparing colour gamuts among printing technologies. *Imaging Sci J*. 2008;56: 145–152. doi:10.1179/174313108X281308
7. Doll P. 3-Dimensional color gamut quantification and comparison. *NIP & Digital Fabrication Conference*. Society for Imaging Science and Technology; 2001. pp. 804–807.
8. Kalra D. GamOpt : A Tool for Visualization and Optimization of Gamuts. *Color Hard Copy and Graphic Arts III*. International Society for Optics and Photonics; 1994. pp. 297–304. doi:10.1117/12.175318
9. Zhu R, Luo Z, Chen H, Dong Y, Wu ST. Realizing Rec 2020 color gamut with quantum dot displays. *Opt Express*. 2015;23: 23680–23693. doi:10.1364/oe.23.023680
10. Robertson PK. Visualizing Color Gamuts: A User Interface For The Effective Use Of Perceptual Color Spaces In Data Displays. *IEEE Comput Graph Appl*. 1988;8: 50–64. doi:10.1109/38.7761
11. Zhao SX. Implementing an ICC printer profile visualization software. Thesis, Rochester Institute of Technology. 2001. Available: <https://scholarworks.rit.edu/theses/3741/>
12. Green P, MacDonald LW. *Colour Engineering: Achieving Device Independent Colour*. Chichester: John Wiley & Sons; 2002.
13. Yang YG, Gao QZ, Liu FP. Effects of paper properties on printing dot gain and color gamut. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications; 2011. pp. 1238–1241. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.236-238.1238
14. Tutak D, Beytut HN, Ozcan A. Investigation of the effects of different ink density values on color gamut in offset printing. *J Graph Eng Des*. 2018;9: 23–28. doi:10.24867/JGED-2018-1-023
15. Bolte SB. A perspective on non-impact printing in color. *Color Hard Copy and Graphic*

- Arts. International Society for Optics and Photonics; 1992. p. 2.
doi:10.1117/12.2322229
16. Fernandez-Reche J, Uroz J, Diaz JA, Garcia-Beltran A. Color reproduction on inkjet printers and paper colorimetric properties. *Color Imaging IX: Processing, Hardcopy, and Applications*. SPIE; 2004. pp. 101–109. doi:10.1117/12.526511
 17. Perales E, Martínez-Verdú FM, Viqueira V, Fernández-Reche J, Díaz JA, Uroz J. Comparison of color gamuts among several types of paper with the same printing technology. *Color Res Appl*. 2009;34: 330–336. doi:10.1002/col.20506
 18. Ding Y, Shamey R, Parrillo-Chapman L, Freeman HS. Pretreatment effects on pigment-based textile inkjet printing – colour gamut and crockfastness properties. *Color Technol*. 2019;135: 77–86. doi:10.1111/cote.12377
 19. Farup I, Hardeberg JY, Bakke AM, Kopperud S, Rindal A. Visualization and interactive manipulation of color gamuts. *Color and Imaging Conference*. 2002. pp. 250–255.
 20. Ding Y, Parrillo-Chapman L, Freeman HS. A study of the effects of fabric pretreatment on color gamut from inkjet printing on polyester. *J Text Inst*. 2018;109: 1143–1151. doi:10.1080/00405000.2017.1415623
 21. Li Y, Cui X, Zhang S, Sun Q, Liu C. Effect of paper optical characteristics on tonal gradation reproduction in inkjet printing. *Advanced Graphic Communications, Packaging Technology and Materials*. Singapore: Springer; 2016. pp. 453–459. doi:10.1007/978-981-10-0072-0
 22. Chen H-S, Kotera H. Three-dimensional gamut mapping method based on the concept of image dependence. *J Imaging Sci Technol*. 2002;46: 44–52.
 23. Yin Z, Yongwen J, Maohai L. A new device color gamut boundary description algorithm based on irregular segmentation. *Color Res Appl*. 2017;42: 173–181. doi:10.1002/col.22052
 24. Bakke AM, Farup I, Hardeberg JY. Evaluation of algorithms for the determination of color gamut boundaries. *J Imaging Sci Technol*. 2010;54: 50502–1, 50502–11. doi:10.2352/J.ImagingSci.Technol.2010.54.5.050502
 25. Bakke AM, Farup I. Simplified Gamut Boundary Representation using Mesh Decimation. *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*. Society for Imaging Science and Technology; 2010. pp. 459–465.
 26. Morovič J, Luo MR. Calculating medium and image gamut boundaries for gamut mapping. *Color Res Appl*. 2000;25: 394–401. doi:10.1002/1520-6378(200012)25:6<394::AID-COL3>3.0.CO;2-Y
 27. Meyer GW, Peting LS, Rokoczi F. A Color Gamut Visualization Tool. *Color and Imaging Conference*. Phoenix, Arizona: Society for Imaging Science and Technology; 1993. pp. 197–201.
 28. Braun GJ, Fairchild MD. Techniques for Gamut Surface Definition and Visualization. *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology; 1997. pp. 147–152.

29. Upton S. CHROMiX ColorThink. In: Seattle, Washington [Internet]. 1998 [cited 15 Jun 2020]. Available: <https://www.chromix.com/colorthink/>
30. Koren N, Koren H, Longton I, Sumner R, Cumby T, Romanczyk P, et al. Gamutvision. [cited 15 Jun 2020]. Available: <http://www.gamutvision.com/>
31. TGLC Inc. PerFX 3D Gamut Viewer User Guide. 2004. pp. 1–5. Available: <http://perfx-3d-gamut-viewer.sharewarejunction.com/>
32. Kamenov V, Ivanov V. ICC printer profiles research with Color Think Pro software as a method for color management education. *Eng Des Mag*. 2013;1: 109–112.
33. Golunov A V., Golunova AS, Fedorova MA, Trapeznikova O V., Nagornova I V. Diagnostics of polymeric materials coloring systems. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC; 2017. pp. 020079–1/6. doi:10.1063/1.4998899
34. López-Baldomero AB. Evaluación colorimétrica de dispositivos de impresión gráfica. Thesis, University of Granada. 2019. Available: <http://hdl.handle.net/10481/58101>
35. Savagave A, Patil AB. Study of Image Interpolation. *Int J Innov Sci Eng Technol*. 2014;1: 529–534.
36. Sánchez Menéndez FJ. Georreferenciación de Cartografía: Datos Raster y Vectoriales. *EOGIS S.L*; 2009.
37. Deshpande K, Green P, Pointer MR. Metrics for comparing and analyzing two colour gamuts. *Color Res Appl*. 2015;40: 465–471. doi:10.1002/col.21930
38. Meyer GW, Robertson C a. A data flow approach to color gamut visualization. *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology; 1997. pp. 209–214.
39. Salas C. New test for the detection and evaluation of color vision abnormalities. Thesis, University of Granada. 2016. Available: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/43552>
40. Matlab vs. R - MATLAB & Simulink - MathWorks. In: The MathWorks, Inc [Internet]. 2020 [cited 25 Jun 2020]. Available: <https://es.mathworks.com/discovery/matlab-vs-r.html>
41. Li X, Zhu M, Yin M. Gamut Testing of EPSON Stylus Photo R270 Color Ink-Jet Printer by ICC 3D. In: Zhao P, Ouyang Y, Xu M, Yang L, Ouyang Y, editors. *China Academic Conference on Printing & Packaging and Media Technology*. Singapur: Springer; 2016. pp. 41–47. doi:10.1007/978-981-10-3530-2

Figure legends

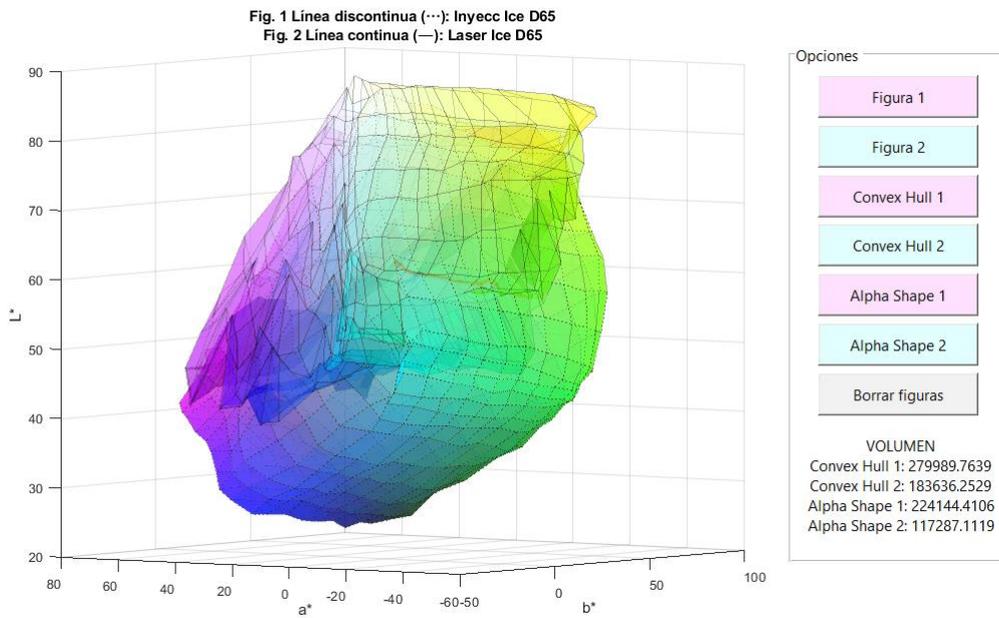


Figura 1. Representación simultánea en el espacio CIELAB de las gamas de color obtenidas con la impresora de inyección de tinta (línea discontinua) y la impresora láser (línea continua), usando el papel de la marca Ice. Software COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65.

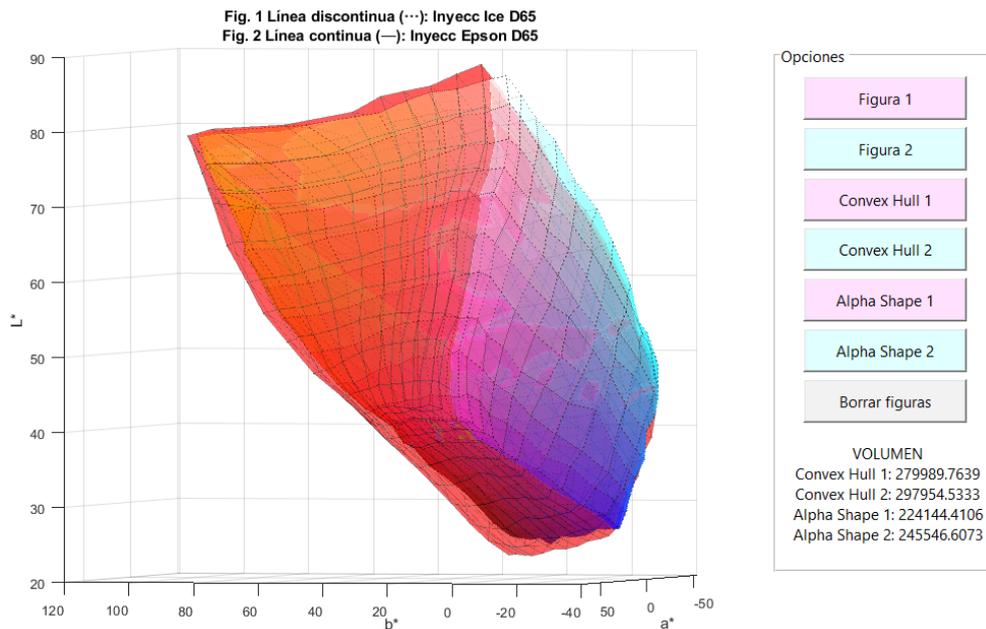


Figura 2. Representación simultánea de las gamas de color obtenidas con la impresora de inyección de tinta para el papel Epson (figura roja, línea continua) y el Ice (figura de colores, línea discontinua). Software COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65.

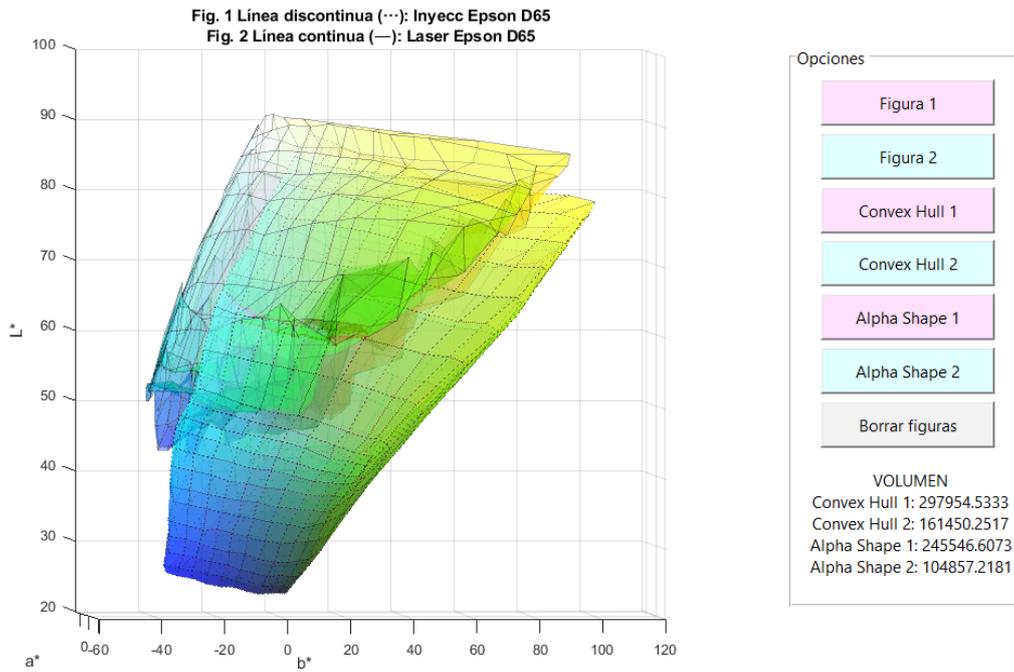


Figura 3. Representación simultánea de las gamas de color obtenidas con la impresora de inyección de tinta (línea discontinua) y la impresora láser (línea continua) para el papel Epson. Software COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65.

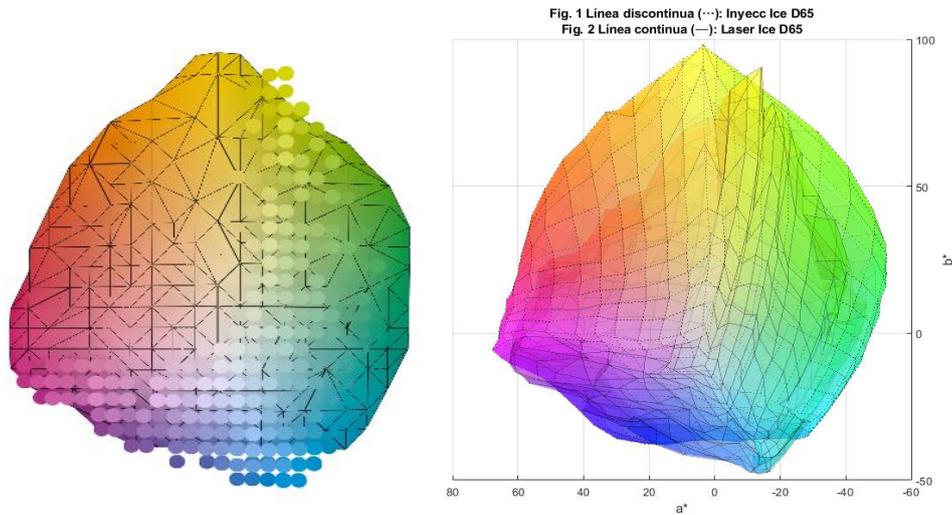


Figura 4. Comparación de las gamas obtenidas con la impresora láser y la impresora de inyección de tinta, usando el papel de la marca Ice. A la izquierda: representación del programa ICC3D; A la derecha: representación con el software COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65.

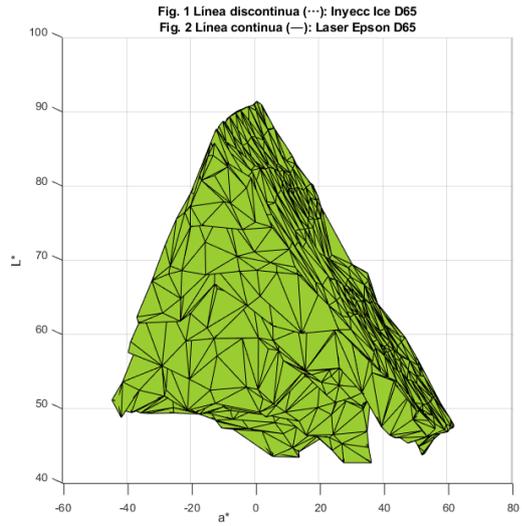
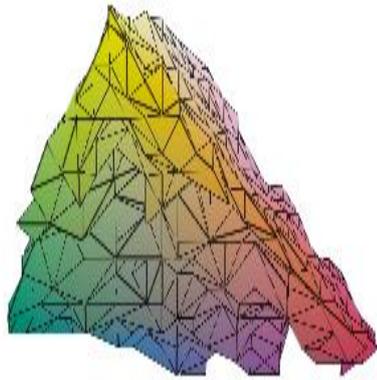


Figura 5. Figuras obtenidas con el algoritmo Alpha Shapes, en el programa ICC3D (izquierda) y COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65 (derecha), para la gama de color de la impresora láser y el papel de la marca Epson.

Tables

	Convex Hull		Alpha Shapes	
	COMPARA_SOLID OS_LAB_3D_D65	ICC3D	COMPARA_SOLID OS_LAB_3D_D65	ICC3D
Inyección Ice	279989,76	279989,75	224144	224161
Inyección Epson	297954,53	297954,47	245547	245590
Láser Ice	183636,25	183636,34	117287	117241
Láser Epson	161450,25	161450,50	104857	104563

Tabla 1. Volúmenes obtenidos con los programas ICC3D y COMPARA_SOLIDOS_LAB_3D_D65, usando los algoritmos Convex Hull y Alpha Shapes.