

**Caracterización
de color y apariencia
en el sector
del automóvil**



Caracterización de color y apariencia en el sector del automóvil utilizando una BRDF (función diferencial de reflectancia bidireccional) y nueva espectrofotometría multiángulo portátil

Los plásticos de colores son compuestos químicos complejos que implican procesos avanzados en constante innovación y evolución. Mediante la adopción de procesos y controles basados en nanomateriales y microtecnologías, los ingenieros creativos han desarrollado sistemas que permiten reducir costes y lograr estilos de colores innovadores, que evocan la respuesta emocional deseada por el diseñador.

Las mediciones espectrofotométricas intraplano y esféricas tradicionales no son suficientes para caracterizar los plásticos de color modernos. En este artículo se presenta una nueva combinación de una función BRDF espacial (incluyendo geometría fuera de plano) y un sencillo modelo fenomenológico que capta las contribuciones de la formulación a la nanoescala y la microescala así como las contribuciones a la apariencia general relacionadas con el proceso. Se presentan las geometrías de muestra espectrofotométrica preferidas y ejemplos de formulación, variaciones de distribución entre lotes, variaciones de procesos y separabilidad de factores contribuyentes.

Antecedentes

Para aquellos materiales en los que el brillo, la textura y otros efectos tienen un papel importante, el proceso de selección, definición y control de la producción se sigue basando en muestras físicas y en la evaluación visual. Los métodos tradicionales de medición y comunicación del color no permiten controlar directamente los procesos de producción ni detectar las causas de errores. Los pigmentos texturados y nacarados de los plásticos son algunos de los ámbitos que podrían beneficiarse de contar con un medio digital para definir, comunicar y renderizar la apariencia.

La apariencia visual se compone de detección e inferencia. Amplía la reflectancia espectral hasta el contexto de una observación. Incluye suposiciones relativas a la iluminación y la observación, así como las condiciones físicas de la muestra, como la forma y la textura. Desde sus inicios, nuestro objetivo era lograr un fundamento para un proceso de color fiable utilizando la definición y la comunicación de color espectral. Sin embargo, para ello necesitábamos un método para traducir los conceptos abstractos de la apariencia del color en un modleo expresivo concreto. Actualmente, nuestra investigación busca ampliar este paradigma hacia una definición más completa de la apariencia total, que incluya contexto e inferencia.

Partiendo de la perspectiva de la medición, fundamentalmente tenemos un espectrorradiómetro. La fuente se dirige hacia un objeto a través de una determinada función de transferencia óptica (OTF, *Optical Transfer Function*). La luz que incide en el objeto interactúa a través de cada capa e interfaz del objeto guiada por las ecuaciones de Maxwell y experimenta una dispersión de

Mie y Rayleigh. Desde este punto, la Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional (BRDF) o la Función de Distribución y Dispersión de Reflectancia Bidireccional de la Subsuperficie (BSSRDF) resultante se muestrea desde una dirección de observación determinada. Este conjunto de muestras de la función BRDF se recopila con un sistema óptico que tiene una segunda OTF. Detectamos la OTF resultante y la transformamos en lo que respecta al contexto (que se describe y define más adelante). Una vez se ha procesado la información para obtener el contexto, queda el último paso relacionado con la inferencia que permite la creación, la comunicación y la toma de decisiones.

Con el tiempo, el reto que constituye la medición de la BRDF de una muestra se asocia con la realización de múltiples mediciones espectrorradiométricas de gonio, puesto que se requieren muchos ángulos/geometrías de iluminación y observación diferentes. Nuestra investigación se centró en mediciones y dispositivos manuales, y por lo general es difícil mantener estable un instrumento de este tipo durante más de 1-1/2 segundos. Por consiguiente, una medición determinista rigurosa requiere más pares de iluminación/observación de los que se puede conseguir en el tiempo disponible. ¿Cómo se relaciona una medición con una solución explícita de esta índole? ¿Cuáles son los ángulos importantes? ¿Qué información espectral es importante?

Nuestra plataforma de medición de la apariencia que se presenta en este artículo se compone de un sistema de espectrofotómetro multiángulo compacto combinado con el muestreo disperso de espectros de reflectancia direccional para BRDF tradicional (como se muestra en la figura 1). Un diseño de espectrofotómetro de diodos con filtros dieléctricos supera las limitaciones de rango dinámico y de precisión de otros planteamientos y ofrece una correlación inversa con las geometrías planas existentes. La iluminación y la medición de múltiples ángulos fuera de plano proporciona un abundante conjunto de datos que permite una descripción completa de la apariencia de la superficie. La plataforma común se ha utilizado para obtener una familia de instrumentos dirigida a usuarios que abarcan desde el diseño hasta la producción.

Las muestras de las diversas funciones de BRDF, tal como se generan, definen la respuesta resultante utilizada para cuantificar la apariencia. Las mediciones espectroscópicas multiángulo producen gran cantidad de datos. Para poder tratar estos datos, se aplican modelos físicos rigurosos que calculan los descriptores paramétricos para el aspecto de la superficie. La investigación en óptica, electromagnética, gráficos y visión por ordenador se ha traducido en importantes avances en el ámbito del modelado de la apariencia de la superficie. Estos modelos han sido evaluados y perfeccionados para poder aplicarlos a muestras y aplicaciones industriales.



Se ha desarrollado una serie de modelos de reflectancia que permiten la parametrización de la función BRDF y la textura. Estos descriptores (parámetros del modelo) se transportan como XML para que proporcionen la base del proceso de apariencia superficial digital desde la concepción hasta la creación. Véase la figura 2.

Los datos de BRDF se pueden obtener de las mediciones del espectrómetro goniométrico aplicando los datos a la expresión siguiente:

$$L_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}) = \int_{\Omega_x} f_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) L_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}') (\mathbf{n}_x \bullet \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}'$$

donde L_r es la radiancia reflejada en x en la dirección $\boldsymbol{\omega}$. Ω_x es el hemisferio de las direcciones de entrada, f_r es la BRDF en x y en nuestro caso contiene un término especular/brillante f_rS y un término difuso f_D tal que:

$$f_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) = f_{rS}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) + f_D(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega})$$

L_i es la radiancia de entrada y se puede asociar con el flujo por medio de:

$$L_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}') = \frac{d^2\Phi_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}')}{(\mathbf{n}_x \bullet \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}' dA_i}$$

En el caso de un modelo de transporte de fotones multicapa, la forma de la ecuación de renderizado volumétrico es sustancialmente diferente de la anterior y hay que tener en cuenta la profundidad óptica de cada capa de dispersión, así como la función de fase que describe la naturaleza de la función de dispersión. La ecuación se concreta en:

$$L_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}) = \int_0^s e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_a(\mathbf{x}') L_e(\mathbf{x}', \boldsymbol{\omega}) d\mathbf{x}' + \int_0^s e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_s(\mathbf{x}') \int_{\Omega_{4\pi}} p(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) L_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}' d\mathbf{x}' + e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}+s\boldsymbol{\omega})} L(\mathbf{x}-s\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega})$$

donde la profundidad óptica $\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ viene dada por:

$$\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \int_x^{\mathbf{x}'} \sigma_t(\mathbf{t}) dt$$

y la función de fase puede tomar diversas formas diferentes en función de la estructura de la laca y la naturaleza del material de dispersión dominante. La función de fase utilizada más habitualmente es la función de fase de Henyey-Greenstein, que cabe utilizar combinada con diferencias para cada capa y/o componente de dispersión. Toma la forma generalizada de:

$$p(\Theta) = \sum_{i=1}^N \frac{w_i(1-g_i^2)}{4\pi(1+g_i^2-2g_i\cos\Theta)^{1.5}}$$

donde $w_i=1$

Donde g_i controla la forma de cada lóbulo y w_i el peso. Según la complejidad de la pintura, el contexto del muestreo y la inferencia que se piensa realizar, se requieren hasta de 72 a 90 ángulos de medición (canales) para obtener una formulación BSSRDF completa de una pintura con de 3 a 4 capas como el de la pintura de automóviles. En el otro extremo, sólo se necesitan de 10 a 12 ángulos para una medición basada en una BRDF de un plástico homogéneo en el que las diferencias de formulación y proceso (y no de pura formulación) constituyen el problema principal.

Objetivo del trabajo

Los estándares existentes en el sector para medir los plásticos de colores comprenden mediciones espectrofométricas goniométricas intraplano y esféricas. El problema de este planteamiento es que los plásticos complejos actuales son de naturaleza tridimensional. La contribución de la formulación del plástico a la percepción de los cambios en la dirección fuera de plano. Las geometrías intraplano tradicionales y los sistemas de una sola cámara no explican el hecho de que los efectos perceptuales sean de naturaleza goniométrica. Cambian con condiciones de iluminación y observación diferentes. Actualmente, no medimos la apariencia con una esfera, sólo la promediamos al alza. Las variaciones de apariencia debidas a la alineación molecular son efectos perceptuales, y hoy sólo medimos la dispersión y la reflexión medias de la luz con la muestra. Como la BRDF (BSSRDF) resultante varía de manera multidimensional, lo mismo harán efectos perceptuales tales como la textura y la alineación molecular. Los sistemas actuales no son capaces de caracterizar y comunicar de forma solida el impacto que tienen el proceso y los cambios de formulación en los efectos perceptuales. Nuestro objetivo es presentar una solución de hardware y software rentable para hacerlo.

Procedimiento experimental

La interacción de la luz con un material presenta dos propiedades únicas que se pueden aprovechar en el proceso de medición para aprender y comprender mejor la estructura y la composición de un material (o laca). La primera propiedad que podemos considerar es el hecho de que todos los materiales son dispersivos. Con ello nos referimos a que la capacidad de un material para flexionar la luz (su coeficiente de refracción) es distinto para la luz azul (400 nm) que para la luz roja (700 nm). Este cambio en la capacidad de flexión existe independientemente del color aparente (propiedad absorbente) que tenga el material. Incluso un material que parezca negro o brillante (como un espejo) presenta dispersión debido al hecho de que la luz no sólo interactúa en la superficie, sino que penetra bajo la superficie mientras es reflejada o absorbida. (En realidad, lo que nos interesa es la constante dieléctrica del material, que es dispersiva. El índice de refracción complejo (potencia de flexión + absorción) es proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica). La segunda propiedad que cabe tener en cuenta es la dispersión de la luz dentro de un material. La dispersión de la luz dentro de un material se puede describir de distintas formas, pero en todos los casos la naturaleza de la dispersión también depende de la longitud de onda. La luz azul dispersa de una manera diferente a como lo hace la luz roja. Todos los materiales dispersan luz en algún grado, incluso un cristal aparentemente transparente. Realizando mediciones espectrofotométricas sensibles de la luz que dispersa un material (o pintura) y comparando las mínimas desviaciones en la dispersión de la luz azul frente a la luz roja, es posible determinar la composición física y la estructura del material. La energía debe conservarse. Así, si comprendemos las características de la energía de la iluminación y medimos las características de la luz que devuelve un material, podemos resolver modelos cada vez más complejos para determinar la composición y la estructura de los materiales. La luz solamente se puede reflejar,



refractar, dispersar o absorber, y la energía no se destruye. (Existen muchas otras formas de interacción de la luz con el material, y otros temas como la polarización que podrían ser objeto de debate, pero por motivos de simplicidad los omitiremos en este documento. El caso especial de la interferencia se menciona más tarde, al tratar algunos pigmentos de efectos especiales).

Quizás el modelo más sencillo que podemos aplicar es el derivado de la teoría electromagnética, que se denomina Teoría del Medio Efectivo. La Teoría del Medio Efectivo afirma que, independientemente de lo complejo que sea el material, podemos tratarlo como un solo material homogéneo. Un material con 3 capas y 9 ingredientes se trata como un solo material compuesto por la media ponderada de los ingredientes, tomando en consideración su distribución en las capas, el grosor de las capas y la estructura del límite entre dos capas adyacentes. Un material procesado de una formulación concreta (receta de ingredientes y estructura de capas definida) se caracterizará por sus propiedades únicas de dispersión. Si algo cambia en la formulación, las propiedades también cambiarán. Aunque lo que cambie sea la distribución del tamaño medio de las partículas, las propiedades de dispersión cambiarán.

Junto con la Teoría del Medio Efectivo, uno de los métodos más sencillos para caracterizar el comportamiento de dispersión de la luz es tomar en consideración los puntos en los que se dispersa la luz en comparación con los puntos donde se refleja/emerge de la muestra en un sistema coordinado. Podemos representarlo como una desviación, de frente / del revés y de lado a lado con la magnitud correspondiente a la energía de la luz que no se absorbe. Cuanta más luz se dispersa / refleja en una dirección determinada, mayor la magnitud. Si repetimos este proceso en cada longitud de onda, podemos analizar la naturaleza dispersiva del material / laca. Partiendo de esta analogía, un material que sea uniformemente reflectivo a todas las longitudes de onda y disperse la luz en todas las direcciones no presentará desviaciones en ninguna dirección. Un material que tiene un comportamiento similar es el Spectralon™ (también conocido como Fluorolon™). El Spectralon es uniformemente blanco difuso bajo todas las geometrías de iluminación y desde todos los ángulos de observación. El Spectralon bien preparado no presenta ningún tipo de brillo, incluso a ángulos de incidencia extremos. La forma más fácil de calcular la desviación de la energía es representar cada ángulo de observación en forma de vector fijo, dibujado desde el centro de la muestra hasta el centro de la pupila del espectrofotómetro. Se crea un vector por cada longitud de onda y ángulo de observación, siendo la magnitud la cantidad de energía medida. La desviación se deriva de una suma vectorial de todos los ángulos de observación, longitud de onda a longitud de onda, que se traduce en la obtención de un solo vector de desviación por cada longitud de onda. Este proceso de aplicación de un supuesto de la Teoría del Medio Efectivo, junto con la computación de una suma vectorial, proporciona la discriminación característica necesaria.

Los estándares existentes en el sector para medir los plásticos comprenden mediciones con espectrofotómetro goniométrico intraplano o esféricas. El problema de este planteamiento es que los plásticos complejos actuales son de naturaleza tridimensional. La contribución de la estructura del material a los cambios de percepción en la dirección fuera de plano. Las geometrías intraplano tradicionales y los sistemas de una sola cámara no explican el hecho de que los efectos perceptuales sean de naturaleza goniométrica; cambian con condiciones de iluminación y observación diferentes. No medimos el brillo o la opacidad, que son efectos perceptuales. Sólo podemos medir la dispersión y la reflexión de la luz con el material. Como la BRDF (BSSRDF) resultante varía de manera multidimensional, así lo harán los efectos perceptuales tales como el brillo y la opacidad.

Puesto que las geometrías sólo de intraplano y los sistemas de una sola cámara no dan resultado, tuvimos que desarrollar una plataforma que incluía geometrías fuera de plano. Sin embargo, las necesidades del sector en cuanto a correlación con estos sistemas intraplano legados, exigían mejoras graduales de la arquitectura actual, en lugar de planteamientos más radicales. Por otra parte, las realidades de los dispositivos de medición manuales, como el tiempo de medición, la estabilidad de la plataforma, etc., nos hicieron descartar soluciones más sólidas como goni-espectrofotómetros de escaneado. Las consideraciones de coste y de tiempo / estabilidad de la medición nos condujeron a llevar a cabo experimentos para determinar el número mínimo de ángulos fuera de plano en muestra necesarios para lograr nuestro objetivo de proporcionar un proceso directo e información relacionada con la formulación. Se crearon Diseños de Experimento que implicaban variaciones en los paneles termoplásticos moldeados por inyección con formulaciones y procesos diferentes. Los paneles se crearon y midieron con un espectrofotómetro goniométrico de escaneado. Se analizaron los resultados y se ajustaron los lóbulos matemáticos a los resultados. A partir de aquí, establecimos la geometría de muestreo para nuestra plataforma de hardware. Además de la geometría intraplano de cinco ángulos, añadimos dos ángulos de muestra intraplano y cuatro ángulos fuera de plano. Para aumentar aún más la densidad y solidez de los datos, añadimos asimismo un segundo iluminador, duplicando así los resultados de la medición sin duplicar el coste o la complejidad. Véase la figura 3.

Basándonos en las descripciones dadas más arriba, fabricamos varios sistemas y repetimos nuestros Diseños de Experimento a mayor escala utilizando más variaciones en la formulación y el proceso con incrementos más precisos.

Los datos brutos se procesaron con nuestra metodología de suma vectorial espectral. Este método está de acuerdo con los principios de la Teoría del Medio Efectivo para resumir los datos espectrales multiángulo en una representación bidimensional o tridimensional. El método es una suma vectorial ponderada de las direcciones de medición, siendo las ponderaciones los factores de reflectancia para cada dirección. El resultado de la suma es un espectro de puntos en un espacio tridimensional, un punto por cada longitud de onda medida.



La suma vectorial ponderada también se escala por la longitud de la suma vectorial de un reflector Lambertiano blanco ideal con el objetivo de lograr que los valores sean razonablemente comparables con los valores de reflectancia típicos. El sistema de coordenadas de los resultados comprende la dirección especular (eje z), la proyección de la dirección de iluminación ortogonal a especular (eje y) y el producto de ambas direcciones (eje x). Llamaremos a este resultado espectros xDNA.

La suma vectorial de xDNA es la suma de los vectores de dirección detectores, escalados por la reflectancia en cada dirección, así como de un factor de ponderación adicional en cada dirección. Conviene utilizar el peso opcional para limitar la suma vectorial a determinadas direcciones, para hacer hincapié en direcciones concretas o para corresponder a la energía presente en cada dirección. Todos los datos que se ofrecen en este artículo sólo utilizarán un iluminador (el tradicional de 45 grados) y los 10 canales difusos (no especulares).

El efecto de los parámetros de los equipos es característico de la aplicación concreta de cada equipo. En consecuencia, aunque dos muestras pueden tener los mismos espectros xDNA con la misma forma, y clasificarse por lo tanto como diferencias de proceso, no existe ningún criterio puramente óptico que pueda determinar si la diferencia se debe a distintos parámetros en el mismo equipo, distintos equipos de aplicación, aditivos de control, diferencias de humedad, u otras condiciones que afecten al proceso de aplicación. Para determinar la equivalencia de las formas de los espectros xDNA, utilizamos las operaciones lineales de traslación, rotación y escala. Todas las operaciones de transformación se realizan conforme a un estándar. El vector de traslación, la matriz de rotación y el factor de escala se calculan a la vez, utilizando un algoritmo de Procrustes para calcular una concordancia de mínimos cuadrados del espectro xDNA transformado con el espectro xDNA estándar. A efectos de comparación con el estándar, los resultados intermedios de las operaciones de traslación y rotación se trasladan además para centrarlos en el centro del estándar.

Rotación

La rotación del espectro trasladado xDNA se llama xDNAa. La rotación suele ser una característica vinculada a los cambios de proceso y de distribución de la receta. Por ejemplo, en la rotación de un proceso de moldeo es el resultado de un cambio de proceso que provoca un cambio de distribución del peso molecular en el tamaño de las partículas de la receta, o bien un cambio en la orientación de las partículas debido a dichos cambios.

No siempre queda claro cuál de los valores del espectro alineado xDNA o del espectro escalado xDNAs detecta mejor las diferencias de formulación. En algunos casos, dos muestras que solamente

difieren en las condiciones del proceso presentan diferencias importantes en sus espectros alineados xDNAa, por lo que es necesario examinar los espectros escalados xDNAs para determinar si la diferencia entre las muestras se debe realmente a una diferencia de proceso y no a una diferencia de formulación. De otro lado, no resulta difícil toparse con casos en los que xDNAs puede ser muy bajo para muestras con diferencias notables de formulación, como es el caso de distintos grises difusos.

Siguiendo con la analogía biológica, podemos considerar que la relación entre el espectro xDNA sin transformar y el espectro xDNAs escalado sería similar a la relación entre el fenotipo y el genotipo de un ser vivo. Del mismo modo que el fenotipo de un organismo vivo no sólo se deriva de su composición genética, sino también de su interacción con el entorno, el xDNA de una superficie es el resultado del material subyacente, caracterizado por xDNAs, y su interacción con el entorno, representado por las condiciones del proceso de aplicación. Al hablar de las transformaciones xDNA, debemos tener en cuenta los espectros transformados y los parámetros de transformación. Ningún número único puede captar toda la información de interés en estas situaciones. Conviene recordar que el motivo de usar índices u otros valores, como la fórmula de diferencia del color, es que su simplicidad y la cantidad de información que proporcionan compensan la información que se pierde con un solo valor único.

Describimos las fórmulas de diferencia que generalizan las funciones colorimétricas y las fórmulas de diferencia con datos de coordenadas xDNA. También se tienen en cuenta las fórmulas que utilizan directamente los datos sobre reflectancia, y las aplicaciones de todas estas fórmulas a los datos xDNA transformados espacialmente.

La fórmula DF

Del mismo modo que los datos colorimétricos se derivan de los espectrales utilizando las funciones de ponderación del observador y el iluminante, de las funciones CIELAB, y DE^* , DE_{94} , DE_{2000} y otras funciones de ponderación se pueden derivar datos colorimétricos de los espectros xDNA tridimensionales. Entre las posibles aproximaciones para generalizar las fórmulas de diferencia del color con espectros dimensionales superiores se cuentan las siguientes:

1. Calcular los datos colorimétricos como XYZ, LAB y fórmulas de diferencia en los distintos planos x, y, z. Combinar las fórmulas de diferencia calculadas en los distintos planos como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las fórmulas de diferencia de planos.
2. Calcular los datos XYZ en cada uno de los planos x, y, z. Utilizar estos valores como los componentes x,y,z de los datos de valores vectoriales X, Y, Z, y calcular la magnitud de los vectores X, Y, Z tridimensionales. Calcular los datos L, a, b y de diferencia de color utilizando las magnitudes unidimensionales X, Y, Z.



Utilizamos la notación DF para la fórmula de diferencia de color calculada generalizando el Delta E convencional con la aproximación 1. La curva xDNA puede ser la curva xDNA bruta o una de las curvas xDNA_t, xDNA_a o xDNA transformadas. Utilizamos DF_t, DF_a, y DF_s para los resultados obtenidos de calcular DF en curvas transformadas.

Puesto que las funciones colorimétricas se crearon para aproximar las diferencias perceptuales humanas, DF no es necesariamente la fórmula de diferencia óptima a aplicar a espectros xDNA transformados como xDNA_t, xDNA_a y xDNA_s. Sin embargo, las aproximaciones anteriormente descritas para generalizar las fórmulas de diferencia funcionan tanto en los espectros transformados como xDNA no transformados.

Análisis de los datos y resultados

A continuación, ofrecemos varios ejemplos de complejidad creciente. Los resultados que figuran más abajo utilizan un solo iluminador (ángulo de incidencia de 45 grados) y los 10 ángulos no especulares, como se muestra en la figura 3. Como xDNA representa esencialmente la desviación de la energía, empezamos ofreciendo un ejemplo básicamente sin desviación.

Spectralon™

El Spectralon es un material blanco difuso con una BRDF esencialmente hemisférica. Tiene una reflectancia del 99,1% en el espectro visible y difusa en todos los ángulos. Puesto que la BRDF es uniforme en todas las direcciones y en todas las longitudes de onda, los vectores serán todos iguales. En este caso, los resultados de las 31 longitudes de onda quedarán uno encima de otro. Las figuras 4a y 4b muestran los resultados. En estos gráficos (y en los posteriores) el eje z aparece en vertical, y es horizontal, y x está en el papel. Recuerde que el eje z corresponde a la dirección especular, y a la dirección de iluminación, y x se encuentra fuera del lateral del instrumento. Observe que la figura 4b ofrece el mismo resultado que la 4a, pero con el eje representado a una escala diferente. Las minúsculas diferencias que aparecen en la figura 4b son el resultado del proceso de lijado en húmedo del Spectralon. La figura 4c presenta el resultado que se obtiene al añadir un pigmento negro al Spectralon, mostrándose las reflectancias resultantes de 99,1, 80, 60, 40, 20, 10, 5 y 2%.

Mosaico de cerámica

Las figuras 5a y 5b muestran los resultados de una serie de mediciones realizadas en varios mosaicos de cerámica de la escala de grises. Los valores de reflectancia incluyen 1%, 3,5, 15, 32, 50 y 88%, respectivamente. En el gráfico b se observa la desviación fuera de plano longitud de onda a longitud de onda debida a la fina capa de esmalte cocida sobre el mosaico. Esto no aparece en las muestras de Spectralon.

Mosaicos BCRA rojos y verdes

La figura 6 muestra mosaicos BCRA rojos y verdes. La figura 6a muestra el xDNA Rojo. La figura 6b muestra las reflectancias espectrales brutas del Rojo. Se observa de nuevo la desviación fuera de plano de izquierda a derecha. Sin embargo, a diferencia de los mosaicos blancos, ésta no oscila longitud de onda a longitud de onda. Las figuras 6c y d son del mosaico verde, respectivamente. En este caso, la desviación fuera de plano forma un bucle, aunque en una escala de x pequeña.

Orgánicas de BASF en muestras de polipropileno

La figura 7 muestra una serie de distintas formulaciones de polipropileno con un pigmento 100% orgánico; 99,5% de pigmento orgánico con 0,5% de pigmento negro; 30% de pigmento orgánico con 70% de pigmento blanco; 15% orgánico con 85% blanco; 8% de pigmento orgánico con 92% de pigmento blanco, y 2% de pigmento orgánico y 98% de pigmento blanco. Entre las tinturas orgánicas figuran Violeta K5011, Azul K6330, Verde K9360, Amarillo K0961 HD, y Rojo K3911 HD.

Ejemplos

La figura 8 muestra las tinturas orgánicas de BASF en espectro cruzado a la máxima concentración en el espacio xDNA.

Ejemplos

La figura 9 muestra visualizaciones en el espacio xDNA representadas a través de la textura superficial.

Ejemplos

La figura 10 muestra formulaciones de la escala de grises en las mismas concentraciones, pero utilizando pigmentos blancos y negros.

Conclusión

Se ha presentado una nueva combinación de una función BRDF espacial (que incluye la geometría fuera de plano) y un sencillo modelo fenomenológico que capta las contribuciones de la formulación a la nanoescala y la microescala, así como las contribuciones a la apariencia general relacionadas con el proceso. Se ha presentado una geometría de muestreo espectrofotométrico preferida y ejemplos de formulación, variaciones de distribución entre lotes, variaciones de procesos y separabilidad de factores contribuyentes. Se ha presentado un método que llamamos xDNA y la métrica que se deriva de él para reducir la dimensionalidad de los datos, preservando las relaciones goniométricas críticas entre efectos perceptuales como aspereza y brillo y las diferencias de formulación y proceso.

Objetivos y actuaciones para el futuro

Seguimos intensificando nuestros esfuerzos de investigación y desarrollo de instrumentos portátiles de medición y comunicación de la apariencia más sólidos. Lógicamente, nuestros próximos pasos se encaminarán hacia mediciones distribuidas espacialmente, computación, representaciones de modelos y herramientas de comunicación.

Bibliografía

QED: The Strange Theory of Light and Matter, Richard P. Feynman, Princeton Science Library, 1971

Zur Elektrodynamik Bewegter Körper, Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, 1905

Multiple Scattering Processes, Harriet Kagiwada, Addison-Wesley Publishing, 1975

Farbenphysik Fur Industrielle Anwendungen, Georg A. Klein, Springer Verlag, 2004

Light and Matter, Yehuda B. Band, Wiley, 2006

Radiative Transfer, Chandrasekhar, Oxford University Press, 1960

A novel technique for analysis of electromagnetic scattering from microstrip antennas of arbitrary shape, Uckun, S.; Sarkar, T.K.; Rao, S.M.; Salazar-Palma, M., IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 45, Issue 4, Apr. 1997 Page(s): 485-491

A vector inverse algorithm for electromagnetic scattering, Borden, B.; U.S. Naval Weapons Center, China Lake, CA; SIAM Journal on Applied Mathematics (ISSN 0036-1399), vol. 44, June 1984, p. 618-626. 1984

Electromagnetic Scattering by a System of Dielectric Spheres Coated With a Dielectric Shell, Hamid, A. K. ; Hussein, Mousa I. ; Hamid, Michael, University of South Alabama, Mobile, Nov. 2003

Fast analysis of electromagnetic scattering from finite strip gratings on a grounded dielectric slab, Valero, Alejandro; Rojas, Roberto G., Radio Science, Volume 35, Issue 6, p. 1307-1314 (RaSc. Homepage), 2000

A Numerical Solution for Electromagnetic Scattering from Large Faceted Conducting Bodies by Using Physical Optics-SVD Derived Bases, Gianluigi Tiberi, Agostino Monorchio, Giuliano Manara and Raj Mittra, IEICE Transactions on Electronics, Vol E90-C, Number 2, pg 252-257, 2006

Finite Elements for Wave Electromagnetics, P. P. Silvester, G. Pelosi, IEEE Press: New York, 1994. ISBN 0-7803-1040-3. ix+534 pp.

Ilustraciones, tablas y figuras

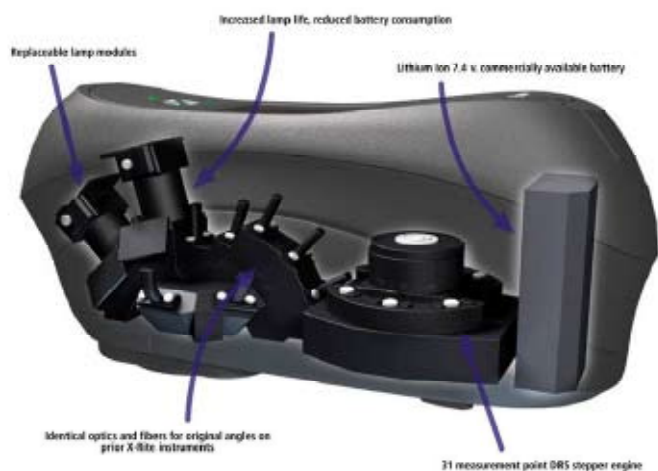


Figura 1. Unidad MA98 multiángulo – espectrofotómetro Gonio fuera de plano

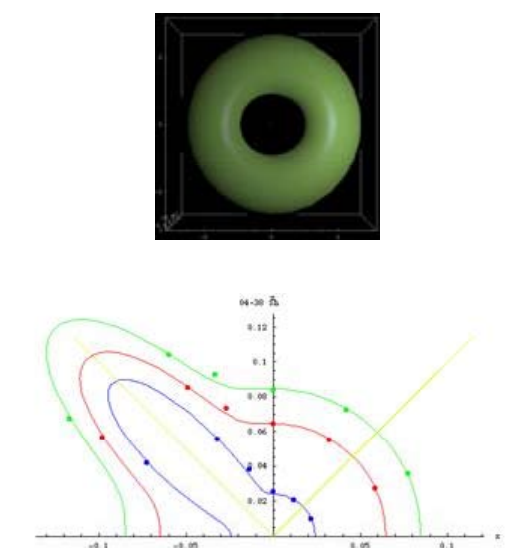


Figura 2. Figura de un modelo BRDF apto para la medición multiangular y el renderizado superficial correspondiente

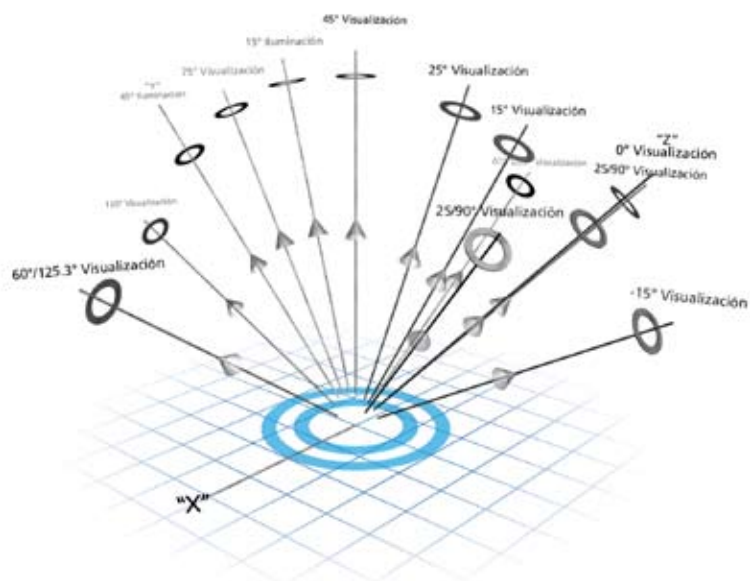
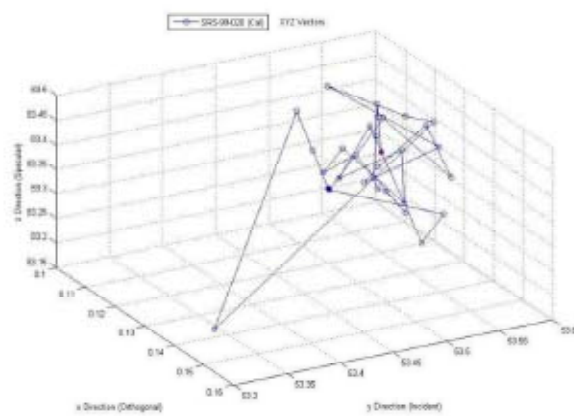
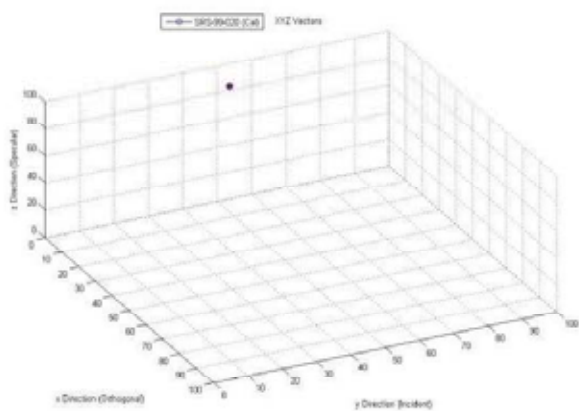
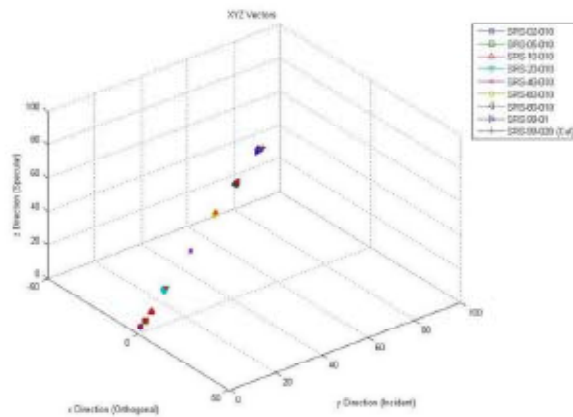
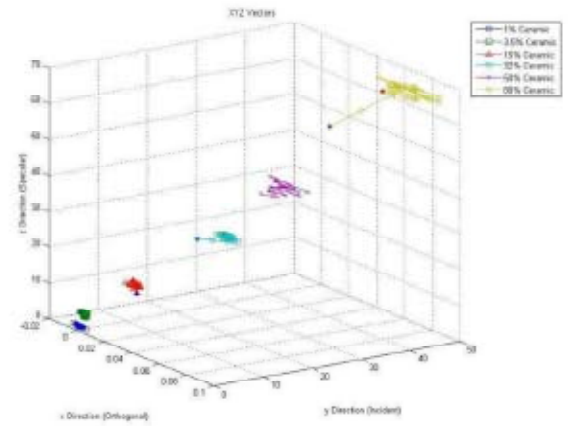
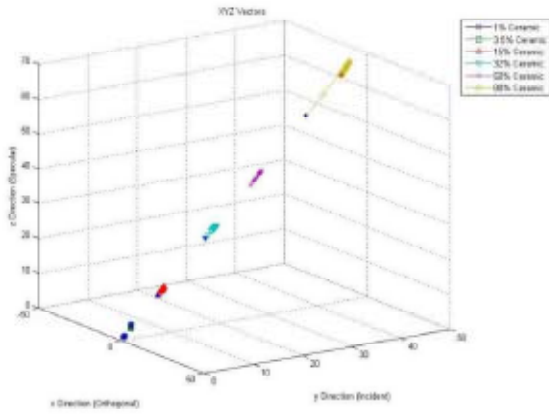


Figura 3. MA98 Geometrías y visualizaciones



Figuras 4a. y 4b. Resultados del Spectralon. La figura 4c muestra un pigmento negro añadido al Spectralon, indicándose las reflectancias resultantes de 99,1, 80, 60, 40, 20, 10, 5 y 2%





Figuras 5a. y 5b. Muestran los resultados de una serie de mediciones realizadas en varios mosaicos de cerámica de la escala de grises. Los valores de reflectancia incluyen 1%, 3,5, 15, 32, 50 y 88%, respectivamente

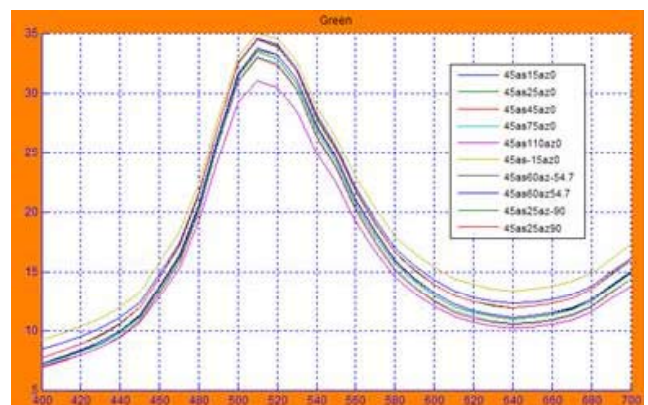
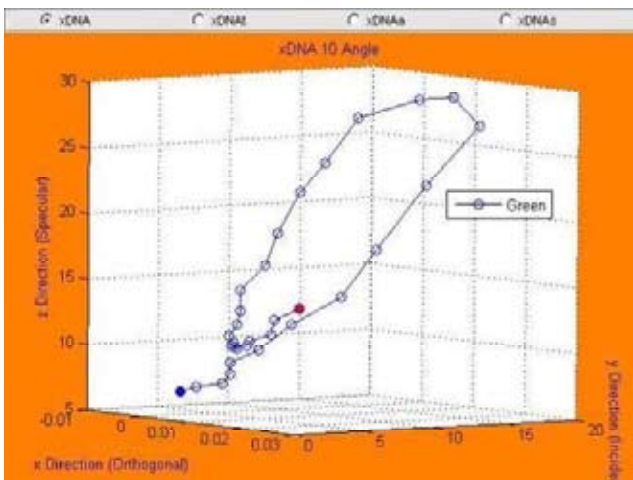
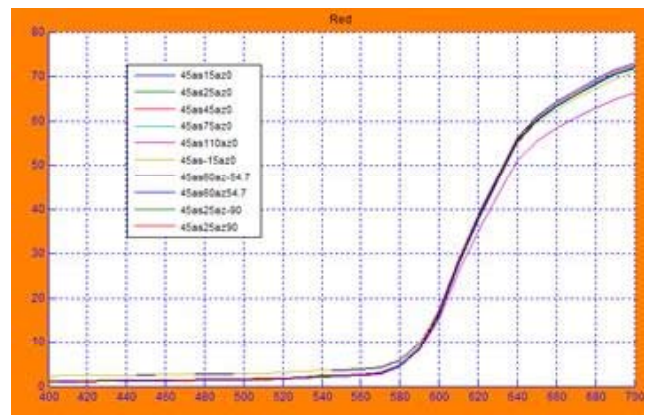
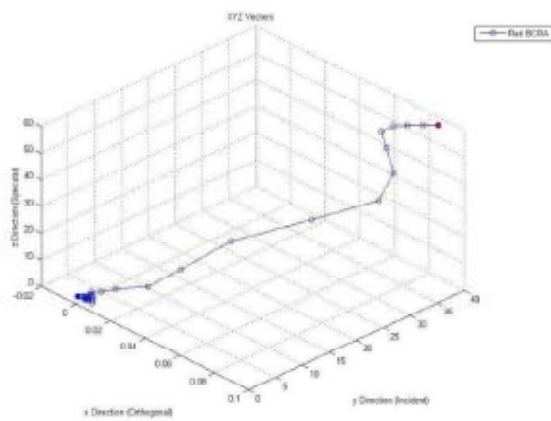
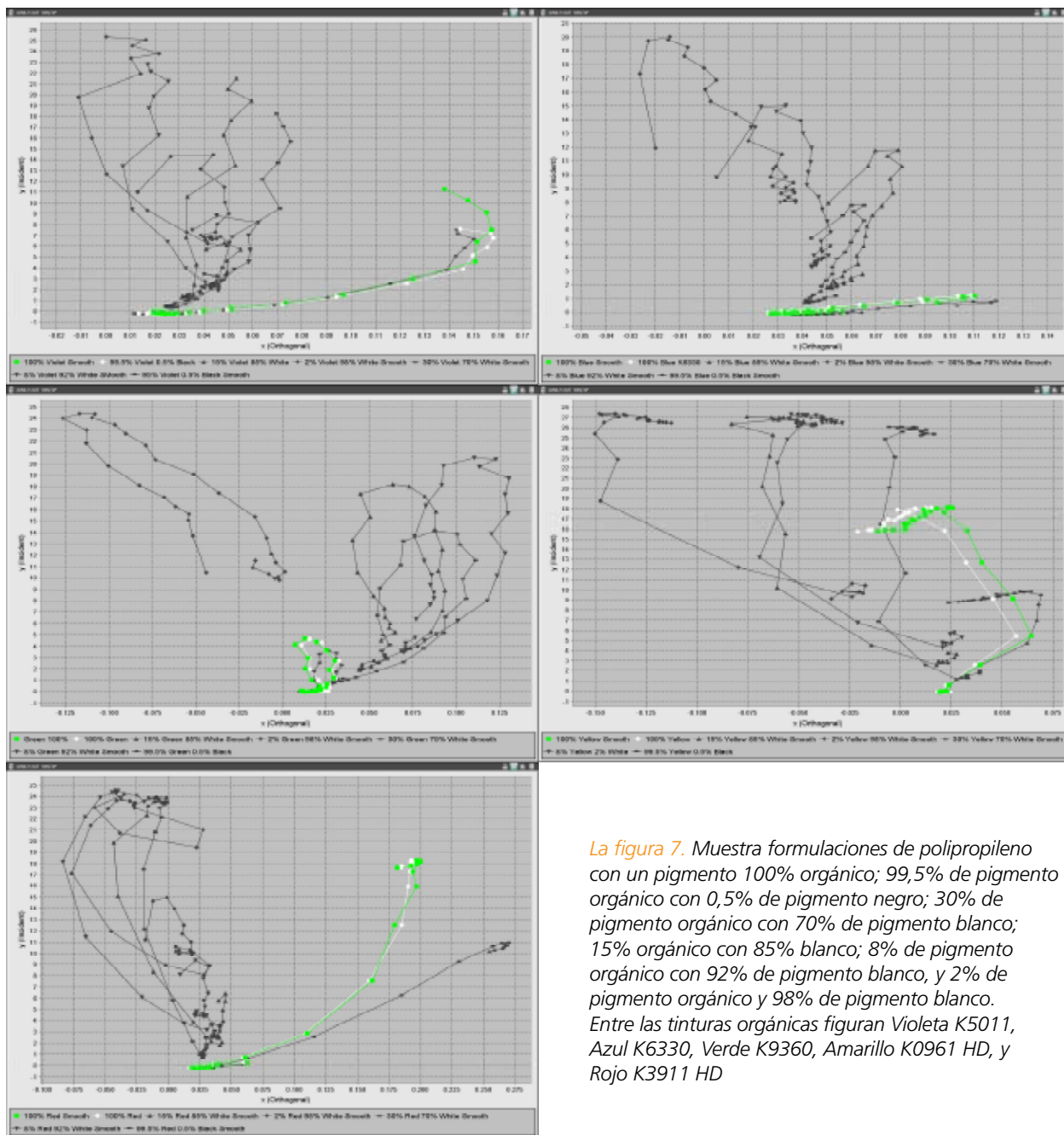


Figura 6. Muestra mosaicos BCRA rojos y verdes. La figura 6a muestra el xDNA Rojo. La figura 6b muestra las reflectancias espectrales brutas del Rojo. Las figuras 9c y d son del mosaico verde, respectivamente



La figura 7. Muestra formulaciones de polipropileno con un pigmento 100% orgánico; 99,5% de pigmento orgánico con 0,5% de pigmento negro; 30% de pigmento orgánico con 70% de pigmento blanco; 15% orgánico con 85% blanco; 8% de pigmento orgánico con 92% de pigmento blanco, y 2% de pigmento orgánico y 98% de pigmento blanco. Entre las tinturas orgánicas figuran Violeta K5011, Azul K6330, Verde K9360, Amarillo K0961 HD, y Rojo K3911 HD

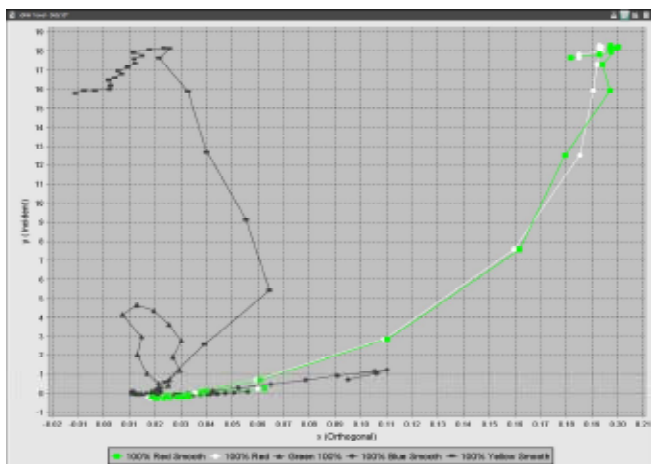


Figura 8. Muestra las tinturas orgánicas de BASF en espectro cruzado a la máxima concentración en el espacio xDNA

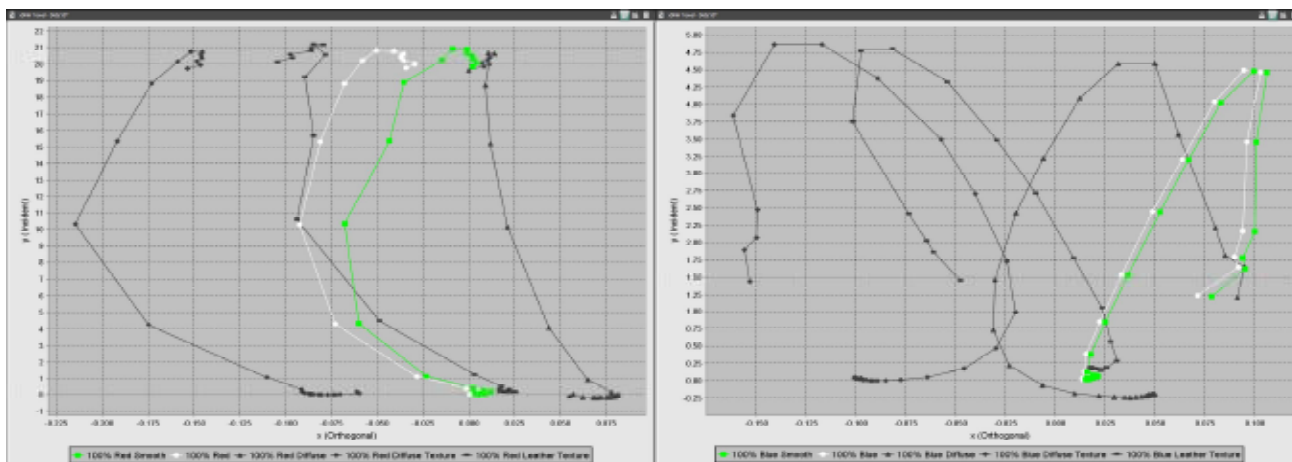


Figura 9. Muestra visualizaciones en el espacio xDNA representadas a través de la textura superficial

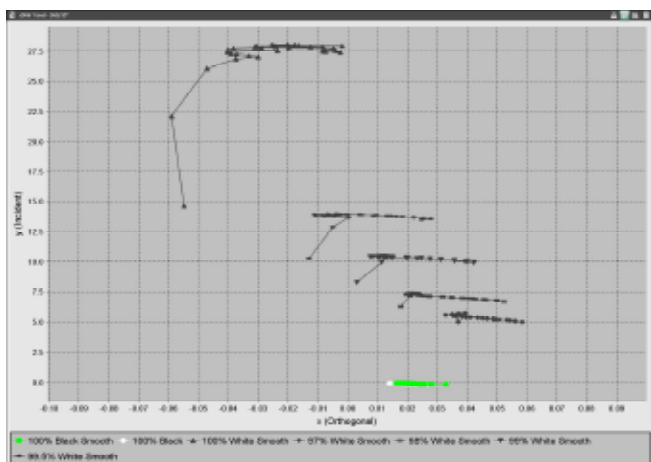


Figura 10. Muestra formulaciones de la escala de grises en las mismas concentraciones, pero utilizando pigmentos blancos y negros

