



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Validación y detección del  
efecto de textura sparkle  
mediante evaluaciones visuales

Omar Gómez Lozano



Tesis **Doctorales**

[www.eltallerdigital.com](http://www.eltallerdigital.com)

UNIVERSIDAD de ALICANTE

---

# Validación y detección del efecto de textura sparkle mediante evaluaciones visuales

---

Omar Gómez Lozano

Tesis presentada para aspirar al Grado de  
DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Instituto Universitario de Física Aplicada  
a las Ciencias y las Tecnologías

Doctorado en Ciencias y Tecnologías Físicas

Dirigida por:

ESTHER PERALES ROMERO

Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía

FRANCISCO MIGUEL MARTÍNEZ VERDÚ

Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía



---

**Dr. Francisco Miguel Martínez Verdú**, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Universidad de Alicante, y la **Dra. Esther Perales Romero**, Doctora contratada en el Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Universidad de Alicante,

**CERTIFICAN:**

Que la presente memoria “**Validación y detección del efecto de textura sparkle mediante evaluaciones visuales**”, presentada por **OMAR GÓMEZ LOZANO**, ha sido realizada bajo la dirección de Esther Perales Romero y co-dirigida por Francisco Miguel Martínez Verdú, en el Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y Tecnologías de la Universidad de Alicante, y constituye su tesis para optar al grado de Doctor.

Y para que así conste, presentan la referida tesis, firmando el presente certificado.

Alicante, 30 de Mayo de 2017

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Fdo: Dr. Francisco Miguel Martínez Verdú

Fdo: Dra. Esther Perales Romero



# Dedicatoria

A mi abuelo Salvador, una de las personas que más ha influenciado en mi vida, dándome los mejores consejos, guiándome y haciéndome una persona de bien, con todo mi amor y afecto.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



# Agradecimientos

Los que me conocen saben que soy un poco reservado, pero con estas breves palabras quiero agradecer públicamente a todas aquellas personas e instituciones que han posibilitado que esta tesis se haya desarrollado con éxito.

En primer lugar dar las gracias eternamente a mi madre M<sup>a</sup> Carmen, una luchadora nata, de la cual una de las primeras cosas que aprendí es que nada es imposible. Siempre me ha enseñado que todo esfuerzo tiene su recompensa y gracias a ella hoy soy quien soy. A mi hermano Abel, que siempre ha estado presente en cada nuevo proyecto que he emprendido, dándome su apoyo y motivándome hasta que lo conseguía.

A mi mujer María José, que ha sufrido todas y cada una de las etapas de la tesis, desde el retraso en la resolución de las becas, pasando por la estancia predoctoral, hasta finalmente su defensa pública. Darle las gracias porque siempre ha estado apoyándome y ofreciéndome ayuda independientemente de la situación y el problema a abordar. También me gustaría agradecer a Antonio y M<sup>a</sup> Carmen todo el apoyo, atención y consejos que he recibido, gracias a los cuales me ha servido para enfocar los problemas desde otra perspectiva y continuar adelante.

Quisiera dar las gracias a todo el grupo de Visión y Color de la Universidad de Alicante, especialmente a mi director Verdú, por haberme dado la oportunidad de trabajar en el grupo de investigación, de realizar esta tesis doctoral y por su gran dedicación, ayuda y consejos durante todo este periodo. A mi directora Esther de la que he aprendido innumerables cosas. Muchas gracias por tu paciencia, consejos y dedicación, estoy totalmente convencido de que serás una gran profesora de universidad y podrás compartir con mucha más gente toda esa fuente de conocimiento.

Sin olvidarme del resto del equipo, Valentín, Eli, Eduardo y Bárbara, los cuales también han tenido que soportar mis pequeñas "torturas" durante todo el experimental de la tesis. Agradecerlos infinitamente la buena predisposición a ayudarme y los buenos consejos que me han facilitado que el trabajo pudiera seguir adelante.



---

También quiero dar las gracias a todos mis amigos, ya que durante el transcurso de todos estos años de investigación, he pasado por diferentes etapas, algunas en las cuales no he podido corresponderos con todo el tiempo y atención que me hubiera gustado, por eso agradeceros todo el apoyo y ayuda, ya que el resultado final no hubiera sido el mismo.

Agradecer al Instituto de Óptica "Daza de Valdés" del CSIC de Madrid por permitirme realizar la estancia predoctoral en sus instalaciones, en especial a Joaquín y Alejandro. Gracias por el tiempo, dedicación y consejos, de los cuales conseguí aprender muchísimo durante esos meses.

Al Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía por permitirme realizar este trabajo y facilitarme los medios necesarios. Y al Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías por aceptarme en su programa de doctorado.

Para finalizar agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la concesión del proyecto DPI2011-30090-C02-02, la beca FPI (BES-2012-053080), al igual que la beca para la realización de la estancia predoctoral (EEBB-I-16-11432). Agradecer también la concesión del proyecto europeo xD-Reflect - Multidimensional reflectometry for industry, a la empresa Merck y al consultor de color Werner Rudolf Cramer, ya que gracias a la implicación de todos ellos se pudieron generar las muestras adecuadas para el desarrollo del experimental de la tesis.

GRACIAS A TODOS

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Resumen

Cuantificar la apariencia visual de los productos es esencial en muchas industrias como puede ser la del automóvil, plásticos, cosmética, etc., para un desarrollo eficiente del producto y su posterior control de calidad. Hay una necesidad específica, y siempre creciente, de desarrollar técnicas para medir la apariencia total de recubrimientos con pigmentos de efectos metalizados y especiales. El presente estudio se centra en uno de los principales atributos de textura visual: el *sparkle*.

Con el fin de desarrollar modelos capaces de medir este atributo, en primer lugar ha sido necesario diseñar experimentos psicofísicos para evaluar el sparkle percibido en muestras con diferentes pigmentos de efecto. El cambio en la apariencia visual de los recubrimientos es conocido como *efecto gonioaparente*, y es altamente dependiente de las condiciones de iluminación y de observación. Por lo tanto, se han examinado cuidadosamente diferentes condiciones independientes de iluminación y observación, para estudiar el efecto de textura sparkle.

El instrumento multiángulo denominado BYK-mac fue empleado para obtener la información instrumental de las diferentes muestras utilizadas en los experimentos psicofísicos. Este dispositivo es el único en el mercado capaz de proporcionar valores instrumentales sobre la textura del producto, aparte de los valores colorimétricos. El único inconveniente es que no se sabe casi nada acerca del modelo matemático implementado en el dispositivo para la medida de la textura, por lo que se desconocen las variables implicadas en el proceso de medida.

También se empleó el algoritmo desarrollado por el Instituto de Óptica del CSIC para el análisis de esta textura, así de este modo se tendría una alternativa a las valoraciones instrumentales proporcionadas por el BYK-mac con el objetivo de poder estudiar la correlación entre ambos modelos matemáticos, junto con las valoraciones visuales proporcionadas por los observadores.

Es muy importante disponer de un método reproducible y fiable para evaluar la apariencia visual de un material que integre color y textura, y que esté correlacionado con datos visuales e instrumentales, con el fin de mejorar el control de calidad de los productos. Por tanto, el objetivo de esta tesis es desarrollar y consolidar

---

una metodología fiable y útil a nivel industrial de evaluación visual del efecto de textura denominado sparkle, y en particular su distancia de detección.

Debido a la multitud de variables que afectan en la estimación y detección del efecto de textura sparkle, como puede ser el tipo de pigmento, el tamaño, la forma, la concentración, la orientación, la colorimetría de la muestra, las condiciones ambientales, etc., se ha optado por plantear, por primera vez en ciencia y tecnología de apariencia visual de materiales, diversos experimentos psicofísicos mediante el uso del diseño de experimentos para optimizar las diversas variables implicadas en cada experimento.

Para llevar a cabo todos los experimentos planteados se cuenta con un amplio número de muestras de diversos proveedores (SCHLENK, BASF Coatings, MERCK, ECKART), con diversos tipos de pigmentos (AluMotion, Variochrom, Stapa, Iriodin, Xirallic, Luxan, etc.) y con tamaños de pigmentos muy variados comprendidos entre los 5 - 90  $\mu\text{m}$ , cubriendo el máximo rango posible de tamaños.

La metodología estadística por excelencia para optimizar la experimentación se conoce como Diseño de Experimentos (DoE). En la mayoría de los diseños de experimentos planteados a lo largo de todo el trabajo, se ha optado por un diseño factorial  $2^2$ , puesto que se tenían dos factores o variables a dos niveles diferentes. En algunos casos se optó por un diseño factorial  $2^3$  debido al aumento de variables. En todos los diseños experimentales se pueden estudiar los efectos de los factores de forma individual, y en función del diseño escogido se podrán analizar además los efectos de las interacciones de distinto nivel (lineal o no lineal) entre los diferentes factores. Por tanto el objetivo principal del diseño de experimentos es el estudio de la influencia de diferentes variables, ya sean cuantitativas (tamaño, concentración, etc.) como cualitativas (forma, etc.) sobre la media de una respuesta, en nuestro caso la estimación y detección del efecto de textura sparkle.

Para el desarrollo de todos los experimentos psicofísicos se contó con un amplio número de observadores con una visión normal (color y agudeza visual). En total, se realizaron más de 35.000 evaluaciones visuales en varias cabinas calibradas de iluminación direccional. Posteriormente y para cada uno de los experimentos se estudió que las valoraciones de todos los observadores fueran consistentes y fiables, para ello se estudió la intra e inter-variabilidad mediante la fórmula de STRESS.

Se ha conseguido demostrar la influencia de los parámetros multiescala en la apariencia del sparkle y extraer qué variables afectan en mayor medida a la hora de detectar el efecto de textura sparkle. Esta cuestión era fundamental ya que, hasta la fecha, no existía ningún estudio previo que abordara estas cuestiones, lo que era de vital importancia para la industria analizar cómo se detecta la textura de una muestra en función de diversas condiciones, ya sean estructurales, ambientales, etc.

---

Además se ha implementado una metodología fiable y aplicable a otros tipos de pigmentos goniocromáticos existentes con efectos de textura novedosos. Se ha conseguido implementar el diseño de experimentos como herramienta principal para limitar los experimentos visuales a realizar, realizando el menor número de evaluaciones visuales posible y obteniendo unos resultados óptimos.

Gracias a los experimentos psicofísicos, se ha comprobado con éxito la correlación visual e instrumental de detección de sparkle entre el único dispositivo multiángulo existente en el mercado hasta la fecha, y las valoraciones visuales obtenidas de un gran número de observadores. Por lo que, si en un futuro aparecen nuevos instrumentos de medida del sparkle, se puede seguir la misma metodología de esta tesis.

A lo largo de la tesis se ha conseguido identificar claramente la influencia e interacción de la mayoría de las variables implicadas en la detección del efecto de textura sparkle. Entre todas ellas unas tienen más relevancia que otras a la hora de detectar el sparkle, como puede ser la influencia del fondo de la muestra o el tamaño de pigmento.

Ante estas afirmaciones se pone de manifiesto la dificultad de generar un modelo multidimensional no lineal, tanto con variables cuantitativas y cualitativas que integre todas las variables implicadas en el proceso de detección del sparkle por parte de un observador, ya que existen ciertas variables que un dispositivo a día de hoy nunca podrá medir o tener en cuenta como la influencia de la colorimetría de la muestra o la interacción entre pigmentos. Por consiguiente, esperamos también que este trabajo pueda ser inspirador y útil, por su carácter pionero e innovador, para trabajos posteriores en el ámbito de la apariencia visual de materiales, ya sea con esta textura visual (sparkle), u otras.

Universidad de Alicante



# Abstract

The quantification of the visual appearance products is essential in many industries such as automotive, plastics, cosmetics, etc., for an efficient product development and its subsequent quality control. There is a specific need, and growing, to develop techniques to measure the coatings total appearance with metallic and special effect pigments. The present study focuses on one of the main attributes of visual texture: *the sparkle*.

In order to develop models capable of measuring this attribute, it has been necessary first to design psychophysical experiments to evaluate the perceived sparkle in samples with different effect pigments. The change in the coatings visual appearance is known as the *gonioapparent effect*, and is highly dependent on illuminance and observation conditions. Therefore, different independent illumination and observation conditions have been carefully examined, to study the sparkle texture effect with the aim of discerning the different attributes.

The multi-angle device called BYK-mac was used to obtain the instrumental information of the different samples used in the psychophysical experiments. This device is the only one in the market capable of providing instrumental values on the product texture, apart from the colorimetric values. The only drawback is that nothing is known about the mathematical model implemented in the device for measuring the texture, so are unknown about the variables involved in the measurement process.

We also used the algorithm developed by the CSIC Institute of Optics for the analysis of the texture, in this way we would have an alternative to the instrumental valuations provided by the BYK-mac in order to be able to study the correlation between both mathematical models, along with visual assessments provided by observers.

It is very important to have a reproducible and reliable method to evaluate the visual appearance of a material that integrates color and texture, and that is correlated with visual and instrumental data, in order to improve the quality control of the products. Therefore, the aim of this thesis is to develop and consolidate a

---

reliable and useful methodology at the industrial level of visual evaluation of the texture effect called sparkle, and in particular their detection distance.

Due to the multitude of variables that affect the estimation and detection of the sparkle texture effect, such as the pigment type, size, shape, concentration, orientation, sample colorimetry, environmental conditions, etc., has been chosen for the first time in science and technology of visual appearance of materials, diverse psychophysical experiments using the design of experiments to optimize the various variables involved in each experiment.

In order to carry out all the experiments, we have a large number of samples from different suppliers (SCHLENK, BASF Coatings, MERCK, ECKART), with different pigments types (AluMotion, Variochrom, Stapa, Iriodin, Xirallic, Luxan, etc.) and with varying pigment sizes ranging from 5-90  $\mu\text{m}$ , covering the maximum possible sizes range.

The statistical methodology to optimize the experimentation is known like Design of Experiments (DoE). In most of the designs of experiments proposed throughout the work, we opted for a factorial design  $2^2$ , since there were two factors or variables at two different levels. In some cases, a  $2^3$  factorial design was chosen due to the increase in variables. In all experimental designs the effects of individual factors can be studied, and depending on the chosen design, the interactions effects of different levels (linear or non-linear) between the different factors. Therefore the main objective of the design of experiments is the study of the influence of different variables, either quantitative (size, concentration, etc.) as qualitative (form, etc.) on the mean of a response, in our case the estimation and detection of the sparkle texture effect.

For the development of all psychophysical experiments there were a large number of observers with normal vision (color and VA). In total, more than 35.000 visual evaluations were performed in several calibrated directional lighting booths. Subsequently and for each of the experiments we studied that the assessments of all the observers were consistent and reliable, therefore, we studied the intra-variability and inter-variability using the STRESS formula.

It has been possible to demonstrate the influence of multiscale parameters on the sparkle appearance and to extract which variables affect to a greater extent when detecting the sparkle texture effect. This issue was fundamental because, there was no previous study addressing these issues, which was of vital importance for the industry to analyze how the sample texture is detected depending on various conditions, whether structural, environmental, etc.

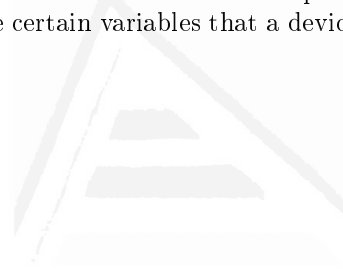
In addition, a reliable and applicable methodology has been implemented for other types of existing goniochromatic pigments with novel texture effects. It has been possible to implement the design of experiments as a main tool to limit the visual

---

experiments to be performed, making the fewest visual evaluations possible and obtaining the maximum results.

Thanks to psychophysical experiments, it has been successfully tested the visual and instrumental correlation of sparkle detection between the only multi-angle device on the market to date, and the visual assessments obtained from a large number of observers. Therefore, if new sparkle measurement instruments appear in the future, the same methodology of this thesis can be followed.

Throughout the thesis have been drawn conclusions that to date were unknown to the lack of studies of this type. Thanks to this work we have clearly identified the influence and interaction of most of the variables involved in the sparkle texture effect detection. In view of these statements, it is difficult to generate a non-linear multidimensional model, with both quantitative and qualitative variables that integrate all the variables involved in the sparkle detection process by an observer, since there are certain variables that a device can never measure or take into account.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante





# Índice general

Resumen	IX
Abstract	XIII
Índice general	XVII
Índice de figuras	XXI
Índice de tablas	XXIX
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Medida de los atributos de apariencia visual de materiales	2
1.3 Justificación	3
1.4 Desarrollo	5
1.5 Estructura de la tesis	5
2 Estado del arte	7
2.1 Apariencia visual de materiales	7
2.1.1 Necesidad de evaluación de la apariencia	9
2.1.2 Concepto de apariencia visual total	10
2.1.3 Evaluación visual de la apariencia	12

2.2	Pigmentos de efecto goniocromático . . . . .	15
2.2.1	Pigmentos metalizados . . . . .	17
2.2.2	Pigmentos perlados, de interferencia y difractivos . . . . .	25
2.2.3	Aplicaciones . . . . .	31
2.3	Caracterización de pigmentos de efecto goniocromático . . . . .	33
2.3.1	Identificación química y estructural . . . . .	34
2.3.2	Comportamiento óptico . . . . .	36
2.3.3	Instrumentación . . . . .	41
2.3.4	Medida del sparkle . . . . .	57
2.3.5	Métodos psicofísicos de medida usados en percepción visual . . . . .	63
2.3.6	Técnicas estadísticas multivariante . . . . .	65
2.3.7	Diseño de experimentos . . . . .	68
3	Objetivos . . . . .	77
3.1	Objetivo principal . . . . .	77
3.2	Objetivos específicos . . . . .	78
4	Determinación del escalado del sparkle mediante estimación de magnitud . . . . .	79
4.1	Introducción . . . . .	79
4.2	Materiales y Métodos . . . . .	80
4.3	Resultados . . . . .	84
4.4	Discusión . . . . .	90
4.5	Publicaciones . . . . .	92
5	Determinación de la correlación inter-instrumental y visual del efecto de textura sparkle . . . . .	93
5.1	Introducción . . . . .	93
5.2	Materiales y Métodos . . . . .	103
5.3	Resultados . . . . .	107
5.4	Discusión . . . . .	111
5.5	Publicaciones . . . . .	112

6	Correlación de la distancia de detección del sparkle con el tamaño y forma del pigmento	113
6.1	Introducción	113
6.2	Materiales y Métodos	118
6.3	Resultados.	127
6.3.1	Análisis DoE.	130
6.3.2	Validación inter-instrumental y visual	137
6.4	Discusión	139
6.5	Publicaciones.	140
7	Determinación de la influencia de la concentración/densidad de pigmentos en la distancia de detección del sparkle	141
7.1	Introducción	141
7.2	Materiales y Métodos	144
7.3	Resultados.	147
7.3.1	Análisis DoE.	151
7.3.2	Validación inter-instrumental y visual	154
7.4	Discusión	159
7.5	Publicaciones.	160
8	Determinación de la influencia del espectro de la fuente de luz, su nivel de iluminación y cromaticidad en la distancia de detección del sparkle	161
8.1	Introducción	161
8.2	Materiales y Métodos	165
8.3	Resultados.	167
8.3.1	Análisis DoE.	174
8.4	Discusión	177
8.5	Publicaciones.	178
9	Conclusiones	179
9.1	Conclusiones globales	179
9.1.1	Conclusiones parciales.	180
9.1.2	Balance de conclusiones.	182

10 Futuras líneas de investigación 183

Bibliografía 187



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Índice de figuras

1.1. Enfoques top-down y bottom-up de la interacción luz-materia-sistema visual. . . . .	2
2.1. Apariencia de objetos reflectantes. . . . .	9
2.2. Efecto de textura sparkle. . . . .	14
2.3. Sistemas de partículas diferentes en graininess. . . . .	15
2.4. Descripción de los ángulos de incidencia y observación relativos a la superficie. . . . .	19
2.5. Distribución de tamaños de partículas. . . . .	20
2.6. Partículas cornflake. . . . .	21
2.7. Partículas silverdollar. . . . .	22
2.8. Orientación de los pigmentos. . . . .	23
2.9. Pigmentos flotantes (Leafing). . . . .	24
2.10. Pigmentos no flotantes (Non-leafing). . . . .	24
2.11. Interferencias en una capa paralela plana con diferentes índices de refracción. . . . .	26
2.12. Pigmentos de efecto interferencia. . . . .	28
2.13. Dependencia del color de interferencia con respecto al espesor de la capa de dióxido de titanio. . . . .	28
2.14. Estructura de los pigmentos goniocromáticos. . . . .	29

2.15. Estructura esquemática de un pigmento de mica con dióxido de titanio con las cuatro interfases existentes. . . . .	30
2.16. Colores en el sector automoción más demandados durante el año 2016 (Fuente PPG). . . . .	31
2.17. Ejemplos de aplicación de los pigmentos de efecto en diversos sectores industriales. . . . .	33
2.18. Reflexión y refracción de la luz. . . . .	36
2.19. Reflexión y dispersión en la superficie y bordes de los pigmentos metálicos. . . . .	39
2.20. Diagrama simplificado mostrando la incidencia sobre diferentes superficies. . . . .	39
2.21. Diagrama simplificado mostrando la incidencia sobre un pigmento de efecto especial. . . . .	40
2.22. Propiedades ópticas de pigmentos de absorción, metálicos, perlas naturales y de efecto especial. . . . .	41
2.23. Ángulos de incidencia y reflexión. . . . .	44
2.24. Espectrofotómetro multiángulo Datacolor FX10. . . . .	46
2.25. Espectrofotómetro multiángulo X-Rite MA98. . . . .	47
2.26. Espectrofotómetro multiángulo BYK-mac. . . . .	48
2.27. Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de sparkle en la geometría 15°as15°. . . . .	49
2.28. Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de sparkle en la geometría 45°as45°. . . . .	50
2.29. Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de sparkle en la geometría 75°as75°. . . . .	50
2.30. Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de graininess. . . . .	51
2.31. Gonio-espectrofotómetro español (GEFE). . . . .	52
2.32. Cabina de iluminación byko spectra effect. . . . .	54
2.33. Brazo articulado de la cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para el cambio de la fuente y el nivel de iluminación. . . . .	55

2.34. Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para evaluación de sparkle. . . . .	55
2.35. Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para evaluación de color y graininess. . . . .	56
2.36. Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para evaluación de color y sparkle. . . . .	57
2.37. Histogramas para el cálculo de sparkle [102]. . . . .	60
2.38. Sistema de coordenadas del GEFE. . . . .	62
2.39. Representación geométrica del diseño $2^2$ . . . . .	70
2.40. Efecto de no interacción e interacción entre factores. (L: low; bajo. H: high; alto) . . . . .	72
2.41. Representación geométrica del diseño $2^3$ . . . . .	73
2.42. Calculo de los efectos principales y de interacción en un diseño $2^3$ [127]. . . . .	74
4.1. Distribución de los cuatro conjuntos de muestras en las gráficas características de representación del sparkle. . . . .	81
4.2. Orientación del pigmento paralela a la superficie del recubrimiento. . . . .	82
4.3. Orientación del pigmento no paralela a la superficie del recubrimiento. . . . .	82
4.4. Observadora y muestras de referencia (anclas) junto con la mascara empleada en el experimento psicofísico de estimación de magnitud. . . . .	84
4.5. Variabilidad inter-observador en el experimento psicofísico de estimación de magnitud. . . . .	85
4.6. Grado de correlación del sparkle para condiciones de iluminación bajas (800 lux) para las geometrías de $15^\circ$ as $15^\circ$ (izquierda) y $45^\circ$ as $45^\circ$ (derecha). . . . .	86
4.7. Grado de correlación del sparkle para condiciones de iluminación altas (2400 lux) para las geometrías de $15^\circ$ as $15^\circ$ (izquierda) y $45^\circ$ as $45^\circ$ (derecha). . . . .	86
4.8. Grado de correlación del sparkle intensidad para condiciones de iluminación bajas (800 lux) para las geometrías de $15^\circ$ as $15^\circ$ (izquierda) y $45^\circ$ as $45^\circ$ (derecha). . . . .	88



4.9. Grado de correlación del sparkle intensidad para condiciones de iluminación altas (2400 lux) para las geometrías de 15°as15° (izquierda) y 45°as45° (derecha). . . . .	88
4.10. Grado de correlación del sparkle área para condiciones de iluminación bajas (800 lux) para las geometrías de 15°as15° (izquierda) y 45°as45° (derecha). . . . .	90
4.11. Grado de correlación del sparkle área para condiciones de iluminación altas (2400 lux) para las geometrías de 15°as15° (izquierda) y 45°as45° (derecha). . . . .	90
5.1. Configuración de medida en función de la posición de los pigmentos.	95
5.2. Modelo del IO-CSIC [42]. . . . .	95
5.3. Gonioespectrofotómetro Español - GEFE. . . . .	99
5.4. Sistema de irradiación del GEFE [96]. . . . .	100
5.5. Sistema de posicionamiento de la muestra y de detección en el GEFE para medidas de textura visual de materiales. . . . .	101
5.6. Ejemplo de lo que sucede con ángulos de iluminación/observación concretos, en los que sólo la reflexión especular del pigmento número 1 llega a la cámara, los píxeles 2 y 3 aparecen como fondo oscuro [39].	102
5.7. Sistema de coordenadas de la muestra. . . . .	104
5.8. Imágenes de alto rango dinámico proporcionadas por el GEFE. . . . .	105
5.9. Algunas de las 53 muestras empleadas en el experimento de escalado del sparkle (Luxan - BASF). . . . .	106
5.10. Distribución de los dos conjuntos de muestras en las gráficas características de representación del sparkle. . . . .	106
5.11. Correlación inter-instrumental de todas las muestras. . . . .	107
5.12. Correlación visual e instrumental de las variables de medida en el GEFE. . . . .	109
5.13. Correlación visual e instrumental de las variables de medida en el BYK-mac. . . . .	109
5.14. Correlación instrumental y visual de todas las muestras analizadas con el BYK-mac para las geometrías de 15°as15° y 45°as45°. . . . .	110

6.1. Estructura de una pintura para automoción. . . . .	114
6.2. Pigmentos cornflake. . . . .	115
6.3. Pigmentos silverdollar. . . . .	116
6.4. Comportamiento óptico de los pigmentos metálicos. . . . .	116
6.5. Ley inversa del cuadrado. . . . .	117
6.6. Muestras Eckart. . . . .	119
6.7. Distribución de las muestras Eckart en la gráfica característica de sparkle. . . . .	120
6.8. Colorimetría muestras Eckart para la geometría 15°as15°. . . . .	121
6.9. Muestras con pigmentos silverdollar. . . . .	123
6.10. Muestras con pigmentos cornflake. . . . .	124
6.11. Distribución de las muestras con pigmentos silverdollar y cornflake en la gráfica característica de sparkle. . . . .	125
6.12. Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante. . . . .	126
6.13. Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico preliminar del análisis de la influencia del tamaño y forma del pigmento. . . . .	128
6.14. Distancia media de detección vs tamaño de pigmento ( $D_{50}$ ). . . . .	128
6.15. Distancia media de detección vs sparkle área y sparkle intensidad. . . . .	129
6.16. Distancia media de detección vs grado de sparkle del BYK-mac ( $S_G$ ). . . . .	129
6.17. Grado de sparkle del BYK-mac ( $S_G$ ) vs tamaño de pigmento ( $D_{50}$ ). . . . .	130
6.18. Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico para el análisis de la influencia del tamaño y forma del pigmento. . . . .	131
6.19. Interacción de la forma y el tamaño del pigmento en función de la distancia de detección del sparkle. . . . .	132
6.20. Diagrama de Pareto para las variables tamaño y forma del pigmento metálico en la distancia de detección del sparkle. . . . .	133
6.21. Superficie de respuesta para las variables tamaño y forma. . . . .	133
6.22. Ajuste matemático de todas las muestras. . . . .	134

6.23. Ajuste de las variables de sparkle con bandas de confianza al 95 % para pigmentos silverdollar. . . . .	135
6.24. Ajuste de las variables de sparkle con bandas de confianza al 95 % para pigmentos cornflake. . . . .	136
6.25. Correlación inter-instrumental de sparkle de muestras con pigmentos metálicos. . . . .	138
6.26. Correlación inter-instrumental y visual de muestras con pigmentos metálicos, tanto para el BYK-mac y GEFE. . . . .	139
7.1. Influencia del color en la apariencia del sparkle. . . . .	142
7.2. Influencia de la concentración de pigmentos de efecto en la apariencia del sparkle. . . . .	143
7.3. Influencia de la concentración de pigmentos de efecto en la apariencia del sparkle. . . . .	145
7.4. Conjuntos de muestras con variación de concentración de pigmentos (Stapa - Iriodin - Xirallic). . . . .	145
7.5. Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico de análisis de la concentración de pigmentos. . . . .	147
7.6. Concentración en masa de pigmentos Stapa Hydrolan (PMC) frente a la distancia media de detección de sparkle. . . . .	148
7.7. Concentración en masa de pigmentos Iriodin (PMC) frente a la distancia media de detección de sparkle. . . . .	149
7.8. Concentración en masa de pigmentos Xirallic (PMC) frente a la distancia media de detección de sparkle. . . . .	149
7.9. Correlación visual e instrumental en función de la concentración de pigmentos en la muestra. . . . .	150
7.10. Diagrama de Pareto para ver la influencia de la concentración en la detección del sparkle. . . . .	151
7.11. Influencia de la concentración en la detección del sparkle. . . . .	152
7.12. Correlación inter-instrumental de muestras con distintas concentraciones de pigmentos (sin muestras con pigmentos Xirallic). . . . .	154

7.13. Comportamiento instrumental de los pigmentos Stapa, Iriodin y Xirallic en función de la intensidad/contraste. . . . .	155
7.14. Comportamiento instrumental de los pigmentos Stapa, Iriodin y Xirallic en función del área/densidad. . . . .	156
7.15. Correlación inter-instrumental y visual de muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría de 15° a 15°. . . . .	157
7.16. Correlación inter-instrumental y visual de muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría de 45° a 45°. . . . .	158
8.1. Elementos básicos en la apariencia y el color de un objeto. . . . .	162
8.2. Iluminantes D50, D65, A y F10. . . . .	163
8.3. Esquema de temperaturas de color en grados Kelvin. . . . .	164
8.4. Muestras empleadas en el experimento visual de análisis de las condiciones ambientales (Luxan - Silverdollar - Xirallic). . . . .	166
8.5. Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico de análisis de las variables de contorno. . . . .	168
8.6. Influencia de la geometría de medida en la detección del sparkle para muestra con pigmentos metálicos. . . . .	169
8.7. Influencia de la temperatura de color (fría vs cálida) y del nivel de iluminación en la detección del sparkle para pigmentos metálicos. . . . .	170
8.8. Influencia de la geometría de medida en la detección del sparkle para la muestras con pigmentos Luxan. . . . .	171
8.9. Influencia de la temperatura de color y del nivel de iluminación en la detección del sparkle para muestras con pigmentos Luxan. . . . .	172
8.10. Influencia de la geometría de medida en la detección del sparkle para la muestras con pigmentos Xirallic. . . . .	173
8.11. Influencia de la temperatura de color y del nivel de iluminación en la detección del sparkle para muestras con pigmentos Xirallic. . . . .	174
8.12. Diagrama de Pareto para ver la influencia de las variables de contorno en la detección del sparkle. . . . .	175
8.13. Influencia de las variables de contorno en la detección del sparkle. . . . .	176

8.14. Superficie de respuesta estimada de las variables de contorno en la detección del sparkle. . . . .	177
10.1. Sistema Munsell para generar muestras ideales para realizar el experimento de la influencia de la colorimetría en la detección del sparkle. . . . .	184



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Índice de tablas

2.1. Reflectividad e índices de refracción y absorción para una luz incidente perpendicular en una longitud de onda concreta ( $\lambda=589.3$ nm) para los pigmentos metálicos más usados. . . . .	18
2.2. Tabla de signos para el diseño $2^2$ . . . . .	71
4.1. Conjunto de muestras goniocromáticas . . . . .	81
4.2. Datos de la correlación ( $R^2$ ) del sparkle intensidad para 800 y 2400 lux, y para las geometrías de $15^\circ$ as $15^\circ$ y $45^\circ$ as $45^\circ$ sin incluir el set 4 . . . . .	89
4.3. Datos de la correlación ( $R^2$ ) del sparkle área para 800 y 2400 lux, y para las geometrías de $15^\circ$ as $15^\circ$ y $45^\circ$ as $45^\circ$ sin incluir el set 4 . . . . .	89
5.1. Ajuste para los subconjuntos de muestras analizadas . . . . .	107
5.2. Ajuste de todas las muestras sin incluir las de pigmentos Luxan. . . . .	108
5.3. Ajuste para la correlación visual e instrumental de las variables de medida en el GEFE. . . . .	109
5.4. Ajuste para la correlación visual e instrumental de las variables de medida por el BYK-mac. . . . .	110
5.5. Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental para las geometrías de $15^\circ$ as $15^\circ$ y $45^\circ$ as $45^\circ$ . . . . .	110
6.1. Variables de los pigmentos . . . . .	115
6.2. Muestras Eckart azules . . . . .	119
6.3. Muestras Eckart grises . . . . .	119

6.4. Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras azules . . . . .	121
6.5. Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras grises . . . . .	121
6.6. Muestras con pigmentos silverdollar . . . . .	122
6.7. Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras con pigmentos silverdollar . . . . .	122
6.8. Muestras con pigmentos cornflake . . . . .	123
6.9. Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras con pigmentos cornflake . . . . .	124
6.10. Diseño de experimentos . . . . .	127
6.11. Correlación inter-instrumental de muestras con pigmentos metálicos	137
7.1. Características de las muestras del experimento de análisis de la concentración/densidad de pigmentos. DN=fondo negro, IzB=fondo blanco. . . . .	144
7.2. Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental para las geometrías 15°as15° y 45°as45° . . . . .	151
7.3. Variables y niveles en el diseño de experimentos en función de la concentración . . . . .	152
7.4. Optimización de la distancia de detección en la detección del sparkle.	153
7.5. Correlación inter-instrumental de muestras con distintas concentraciones de pigmentos . . . . .	154
7.6. Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental en función del Contraste/Sa para las geometrías 15°as15°, 45°as45° y 75°as75° . . . . .	155
7.7. Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental en función de la Densidad/Si para las geometrías 15°as15°, 45°as45° y 75°as75° . . . . .	156
7.8. Ajuste para muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría 15°as15°. . . . .	157

7.9. Ajuste para muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría 45°as45°. . . . .	158
8.1. Características de las muestras del experimento de análisis de las variables de contorno. . . . .	166
8.2. Diseño de experimentos para analizar las variables de contorno en la detección del sparkle. . . . .	175



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante





# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

En la industria automovilística, al igual que en otros sectores industriales como en impresión, plásticos, cosmética, textil, etc., los recubrimientos con texturas son esenciales para atraer a los clientes. La apariencia visual de estos productos implica una variedad de propiedades de atributos perceptuales (color, brillo, textura, etc.) y por lo tanto no existe ningún método satisfactorio para describir la apariencia total. Debido a la complejidad de medir la apariencia, el control de calidad visual de los productos a menudo requiere de las mediciones instrumentales de un número limitado de atributos, y se basa en gran medida en inspectores humanos. Para mejorar la eficiencia, existe un considerable interés en ser capaz de realizar mediciones objetivas y cuantitativas fiables de la apariencia de los productos en el menor tiempo posible.

La medición de la apariencia visual de los materiales se puede lograr a partir de una investigación de las relaciones entre los atributos percibidos por los observadores y los parámetros físicos obtenidos de las medidas instrumentales (figura 1.1). La expresión numérica de esta relación permite la predicción de atributos de percepción visual a partir de mediciones físicas. Los atributos de apariencia percibidos en los materiales se pueden cuantificar mediante evaluaciones visuales. Por otra parte, existen varias posibilidades para medir los parámetros físicos, éstos son dependientes de las propiedades físicas de los materiales, especialmente de sus propiedades ópticas. Las propiedades físicas están relacionadas con la estructura y los componentes de los materiales, y las propiedades ópticas son el resultado de las interacciones entre la luz y sus componentes pigmentarias.

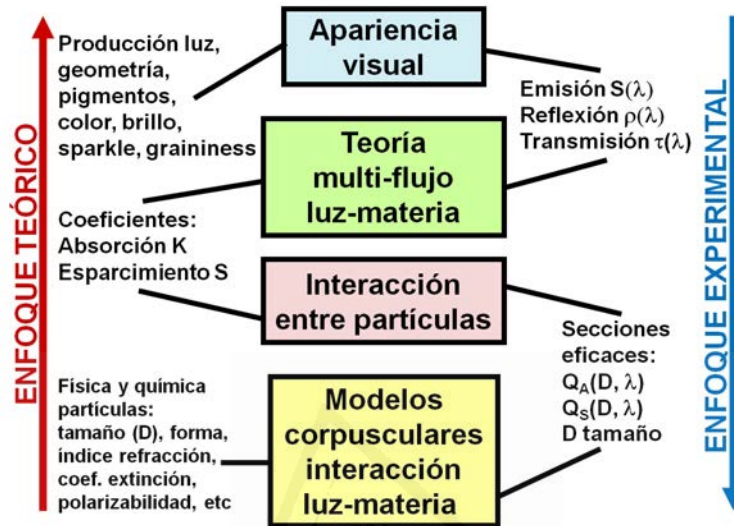


Figura 1.1: Enfoques top-down y bottom-up de la interacción luz-materia-sistema visual.

La presente tesis está centrada en el estudio híbrido (más enfoque experimental que teórico) de las diversas variables (estructurales, ambientales, etc) que influyen en la detección del sparkle de los recubrimientos mediante evaluaciones visuales, aplicando el diseño de experimentos y posterior análisis para corroborar si existe correlación con las medidas instrumentales, y la información conocida de los materiales a nivel estructural (micro, nano).

## 1.2 Medida de los atributos de apariencia visual de materiales

Algunas de las posibles e importantes medidas de las propiedades ópticas de materiales son el color, brillo y la textura, aunque estas medidas no son necesariamente independientes [1].

El estudio del color en los materiales, sean goniocromáticos o no, es muy activo, y la colorimetría está bien establecida como método para cuantificar el color. La información espectral de la luz reflejada por una superficie puede ser asociada como un parámetro físico y es posible realizar medidas usando dispositivos comerciales como un espectroradiómetro o un espectrofotómetro. Los parámetros colorimétricos pueden ser derivados basados en funciones de igualación del observador patrón

CIE, de manera que se correlaciona con la cantidad de color percibido. Además, un modelo de apariencia del color [2] es capaz de predecir los atributos perceptuales del color, como por ejemplo, el tono, el colorido y la claridad teniendo en cuenta las condiciones de observación.

La percepción del brillo está asociada con la forma en que la luz se refleja desde la superficie de un objeto en y cerca de la dirección especular [1]. Normalmente se usa un brillómetro para estas medidas, que dan una intensidad relativa de la luz reflejada como función de la iluminación y del ángulo de observación. Sin embargo, a diferencia del modelo de color, todavía no se ha establecido un modelo normalizado que se correlacione completamente con la percepción humana del brillo [3-5].

La textura es un término que se refiere a las propiedades espaciales que representan la superficie de un objeto [6]. La respuesta humana a la textura puede ser generalmente descrita en términos como gruesa, fina, granulada, suave, áspera, moteada, etc. En términos de reconocimiento humano, la textura es quizás intuitivamente obvia, pero hasta el momento, la única definición precisa acerca de este término es la expuesta en la normativa ASTM E284 [7].

Como puede verse, la medida de la apariencia visual total requiere de una investigación que pueda separar los distintos atributos de la apariencia. No hay un consenso total de cuántos de esos atributos existen o se necesitan para cuantificar y caracterizar la apariencia total. En el presente trabajo se va a estudiar un atributo concreto de textura como es el sparkle y se analizarán las diversas variables que influyen en su percepción, ya sean estructurales, como el tipo de pigmento, su tamaño, su concentración, la colorimetría de la muestra, etc., o variables de contorno como las condiciones de iluminación, la influencia del espectro de luz, etc.

### 1.3 Justificación

Debido al aumento en la demanda, por ejemplo, de pinturas en automoción con pigmentos de efecto especial, en este sector se vuelve de vital importancia poder caracterizar bien colores con pigmentos de efecto para poder reproducir el mismo acabado bajo diferentes etapas de producción, así como para el repintado de una zona concreta de un coche. Sin embargo, además de existir variaciones de claridad, tono y colorido, los pigmentos de efecto también presentan efectos de textura característicos conocidos como sparkle (o glint/glitter) y graininess (coarseness). Por tanto, la percepción visual de la muestra no sólo dependerá del color, sino que también estará influenciada por el efecto texturado que las partículas pigmentarias provocan en la muestra.

Del mismo modo que sucede con el color, estos efectos texturados también cambian con las condiciones de iluminación, por ejemplo, al observar la misma muestra con luz directa o difusa se observarán diferencias en la apariencia visual de la muestra. Además, también dependerán de otros parámetros como la distancia de observación, el ángulo de iluminación, el color de fondo, etc. Estos efectos de textura, junto con la variación de color dependiente del ángulo de iluminación y observación, ofrecen características visuales muy atractivas para estos materiales, por lo que hace que sean cada vez más demandados en el mercado, por ejemplo en la industria automovilística.

El sparkle es un efecto óptico que se caracteriza por ofrecer micro brillo, centelleo (destello) o un efecto diamante cuando la muestra es iluminada con un foco puntual de luz, como puede ser la iluminación procedente del sol directamente. El grado de sparkle (mayor o menor intensidad) depende de la reflectividad en el pigmento de efecto individual (copos o micro-escamas de aluminio, mica, etc), de la cantidad de pigmento de efecto, del tamaño de los pigmentos y de la orientación de las partículas pigmentarias entre otros. Actualmente sólo existe un instrumento en el mercado para medir los efectos de textura típicos de los colores goniocromáticos, el espectrofotómetro multi-ángulo BYK-mac. Este instrumento, además de disponer de 6 geometrías de medida para la caracterización del color, tiene una cámara CCD monocroma que actúa como detector para las medidas de textura. Las imágenes de la cámara se toman bajo diferentes condiciones de iluminación con el fin de simular una iluminación direccional directa para la medida del sparkle. En particular, el sparkle se evalúa bajo tres ángulos de iluminación:  $15^\circ$ as $15^\circ$ ,  $45^\circ$ as $45^\circ$  y  $75^\circ$ as $75^\circ$ .

Sin embargo, no se conoce públicamente, ni está regulado por normativas internacionales tipo ISO, ASTM o DIN, el algoritmo matemático y óptico para medir y calcular el grado de sparkle implementado por esa empresa. Por tanto existen muchas preguntas abiertas relacionadas sobre este efecto de textura: distancia visual de detección, geometrías de medida, la influencia del nivel de iluminación, efecto de la distribución espectral de la fuente de luz empleada, tareas de discriminación vs detección, influencia del color de la muestra (tono, claridad o colorido de la muestra), etc.

Estos nuevos efectos de textura son importantes para la discriminación visual de muchos materiales, y sin embargo, existen pocos estudios que aborden estos temas. Por tanto, es muy importante disponer de un método reproducible y fiable para evaluar la apariencia visual de un material que integre color y textura, y, que esté correlacionado con datos visuales e instrumentales con el fin de mejorar el control de calidad de los productos gonioaparentes.

## 1.4 Desarrollo

La textura sparkle no puede ser explicada por un único parámetro porque consiste en una combinación de varios atributos relacionados especialmente por lo que la finalidad del estudio es:

1. Suplir la falta de investigaciones sobre la apariencia visual del sparkle y cómo afectan las variables implicadas en el proceso de detección, debido al constante interés por parte de las industrias del sector en poder caracterizar adecuadamente el efecto de textura sparkle.
2. Diseñar y fabricar una cabina de iluminación para la observación del efecto de textura sparkle. Esta cabina permitirá el cambio de la fuente de luz para conseguir diferentes distribuciones espectrales, así como el cambio del nivel de iluminación. Además, gracias al diseño de la cabina propia de iluminación será posible evaluar el sparkle a diferentes geometrías de medida, y a diferentes distancias de observación.
3. Seleccionar y medir instrumentalmente (mediante el espectrofotómetro multi-ángulo BYK-mac) muestras proporcionadas por diferentes proveedores (BASF, LUXAN, MERCK, etc.) estableciendo diferentes criterios para agrupar las muestras en diferentes categorías: claridad, colorido, tipo y tamaño de partícula, concentración de pigmentos.
4. Estudiar la correlación visual e instrumental del sparkle.
5. Diseñar diversos experimentos psicofísicos que permitan analizar la influencia de las distintas variables en la detección y escalado del sparkle.

## 1.5 Estructura de la tesis

El bloque experimental de la tesis consiste en cinco capítulos. Se cita a continuación una breve descripción de cada uno de los capítulos.

- Capítulo 4: Comprobar el escalado del sparkle instrumental mediante estimación de magnitud.
- Capítulo 5: Medir, evaluar y corroborar si el algoritmo propuesto por el Instituto de Óptica del CSIC (IO-CSIC) se correlaciona con las medidas instrumentales proporcionadas por el BYK-mac, y con las medidas visuales proporcionadas por los diversos observadores en los experimentos psicofísicos realizados.

- Capítulo 6: Determinar la distancia visual de detección del sparkle y establecer una relación con el tamaño de partícula de los pigmentos de efecto y/o su forma.
- Capítulo 7: Determinar la influencia de la concentración/densidad de pigmentos en la distancia de detección del sparkle.
- Capítulo 8: Determinar la influencia del espectro de la fuente de luz y su rendimiento colorimétrico, así como el nivel de iluminación en la distancia de detección del sparkle.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## Capítulo 2

### Estado del arte

Este capítulo da una visión global sobre los pigmentos de efecto goniocromático. Empezando por su evaluación visual, continuando con las características, estructura y aplicaciones, y terminando con la caracterización, comportamiento óptico e instrumentación, y métodos psicofísicos empleados en la percepción visual de estos pigmentos.

Los contenidos están dirigidos a todo el público. Los fundamentos y aplicaciones de los pigmentos de efecto presentados aquí, sin duda ayudará a proporcionar conocimientos básicos a los que se inicien en este tema o a los que tengan cierto interés técnico. Además los profesionales del sector podrán profundizar más sus conocimientos previos sobre temas específicos.

#### 2.1 Apariencia visual de materiales

Los objetos de nuestro entorno están hechos por una gran variedad de materiales. La apariencia del color de los objetos está influenciada por diferentes factores, incluidos la geometría de iluminación, la forma del objeto y las propiedades reflectivas de los materiales. Usualmente, examinamos un objeto con nuestros ojos para determinar su conveniencia o utilidad para nosotros. Juzgamos si un objeto es viejo o nuevo, bonito o feo, etc, sin reconocer los procesos ópticos reales que nos dan las pistas. Un conductor juzga la presencia de agua o hielo en la carretera por su color oscuro o brillante, un agricultor juzga la calidad del suelo por su color y textura, un hombre juzga la limpieza de su camisa por la existencia de patrones específicos y por el grado de amarillez, la frescura de la carne es juzgada por su rojez, etc. Sin saberlo, todos esos juicios se basan en diversos eventos ópticos y visuales que se producen cuando la luz incide sobre dichos objetos.



La apariencia visual es el aspecto más importante para la representación de la calidad de un objeto. Cualquier industria manufacturera se preocupa mucho por la apariencia de sus objetos. La apariencia es el aspecto de la experiencia visual por la cual los materiales son reconocidos [8, 9]. De la apariencia, podemos decidir varios aspectos del objeto, como su edad, grado de adulteración, etc. Los aspectos geométricos y colorimétricos de la luz interactúan con el objeto de tal manera que los instrumentos más avanzados no pueden medir con plena satisfacción. Los científicos que estudian las propiedades ópticas de los materiales intentan aislar y medir diferentes aspectos de esta interacción de la luz con la materia (coloreada), con el fin de explicar los fenómenos de gran complejidad visual en términos más simples.

Sin embargo, tales simplificaciones tienen muchas limitaciones. Una definición completa de la apariencia de un objeto sería muy complicado, y nos dejaría muy lejos de nuestro objetivo. Los diferentes atributos de apariencia son evaluados bajo un ambiente determinado simple.

El aspecto visual de los objetos se rige por la forma en la que reflejan y transmiten la luz. El color de los objetos está determinado por las partes de luz blanca incidente reflejada o transmitida sin ser absorbida. Atributos adicionales de apariencia se basan en la distribución direccional de la luz reflejada o transmitida, descrita en términos de atributos tales como brillante, mate, claro, turbio, etc. La apariencia de los objetos reflectantes se determina por la forma en que su superficie refleja la luz incidente. Las propiedades reflectantes de la superficie pueden ser caracterizadas con un análisis más cercano de la topografía de la superficie, preferiblemente a un nivel micro-estructural (figura 1.1).

Las estructuras en la superficie y su textura superficial, están determinadas por las dimensiones entre 10 y 0.1 mm (el límite de detección del ojo humano es aproximadamente 0.07 mm). Estructuras y características más pequeñas de la superficie no pueden ser detectadas directamente por el ojo humano sin ayuda óptica, pero su efecto se hace evidente en los objetos o imágenes reflejadas en su superficie. Las estructuras de 0,1 mm o menos reducen la definición de imagen (DOI), las estructuras en el rango de 0,01 mm inducen halo/neblina, e incluso estructuras más pequeñas afectan el brillo de la superficie (figura 2.1).

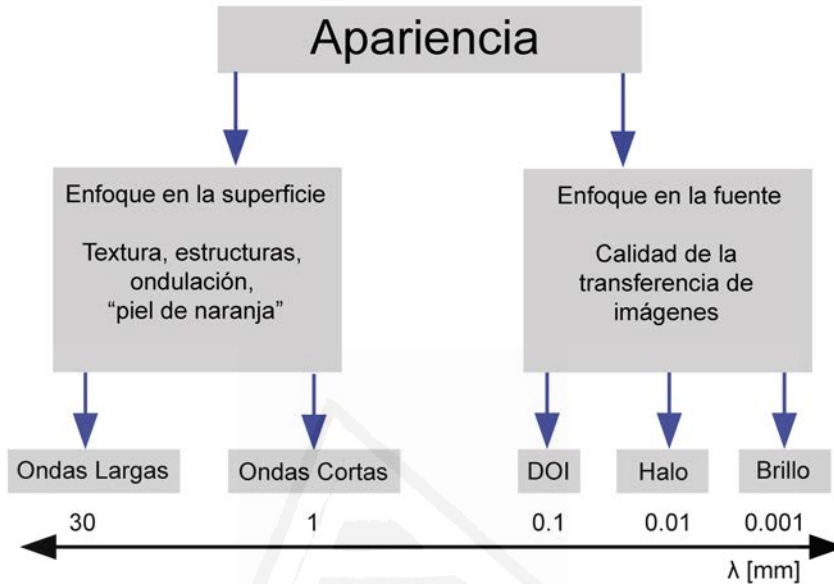


Figura 2.1: Apariencia de objetos reflectantes.

### 2.1.1 Necesidad de evaluación de la apariencia

Todas las industrias productoras están preocupadas con la apariencia visual de sus productos. Cuando los consumidores tienen que hacer una elección, todos los demás factores parecen iguales, ellos comprarán lo que mejor aspecto tenga. La apariencia del objeto decide la calidad del producto. La apariencia es la cualidad más rápidamente identificable responsable de la aceptación o rechazo de un producto. Los objetos con colores más brillantes son preferidos generalmente a los objetos con colores apagados. Los compradores también esperan uniformidad de la apariencia dentro de cualquier grupo del mismo producto. Cuando los consumidores observan una diferencia entre varios productos de un mismo tipo, asocian esa diferencia a una baja calidad. El atractivo visual y uniformidad de la apariencia tienen tal importancia que la identificación cuantitativa de la apariencia se exige en todos los mercados.

La apariencia abarca un gran número de aspectos visuales complejos. La percepción visual es un fenómeno psicológico, por lo que los fabricantes dependen en gran medida de observadores expertos que tienen la capacidad de hacer juicios para ajustar o controlar un proceso para producir la apariencia del producto deseado. Hasta finales del siglo XX, la evaluación de la apariencia ha sido más un arte que

una ciencia. El exceso de dependencia de las personas tiene varios problemas prácticos. La opinión de los expertos puede variar y crear conflictos para la aceptación del producto. Además, la capacidad humana varía con el tiempo, el estado de ánimo, la edad, y también de persona a persona. Durante mucho tiempo, la medición cuantitativa con instrumentos se ha visto como una manera de superar las evaluaciones cualitativas humano-dependientes.

Con desarrollos revolucionarios en la electrónica y la informática, y con complicado y avanzado cálculo, ahora es posible. Se han desarrollado muchas técnicas instrumentales y modelos computacionales satisfactoriamente y se están utilizando con éxito. Los expertos evaluadores de apariencia/color eran indispensables hace pocos años, pero hoy en día se ha reducido en gran medida la dependencia en estos individuos para la formulación de color, con algunas ventajas adicionales.

Para desarrollar tecnología de apariencia, del mismo modo que apariencia como ciencia, el color y otros atributos de apariencia tienen que ser expresados numéricamente. El cambio de evaluaciones cualitativas a cuantitativas por instrumentos ha enriquecido la tecnología de apariencia y particularmente la ciencia del color. Hay numerosas similitudes entre atributos de apariencia en textiles, pinturas, plásticos, papel, alimentación, cerámica y materiales similares, y se usan técnicas de medición de la apariencia similares. Es incluso posible asignar grados de calidad a esos productos en base a la medición de la apariencia. Productos de apariencia similar formarán un grupo, y por lo tanto el riesgo de rechazo será menor.

### 2.1.2 Concepto de apariencia visual total

Varios aspectos del concepto de apariencia total han sido descritos por Hutchings y Lozano [9, 10]. Las imágenes de apariencia juegan un rol importante en la dirección y control de la conducta humana. El concepto de apariencia total rastrea todas las escenas de fabricación de productos, diseño de interiores, bellas artes, etc. Aunque la percepción visual aparentemente parece ser independiente de la sensibilidad humana, algunas propiedades son percibidas de diferentes maneras por más de un sentido. Pueden surgir atributos visuales individuales de la combinación de las señales de los diferentes sentidos. Las imágenes de apariencia pueden ser de dos tipos:

1. La imagen de impacto es el reconocimiento inicial del objeto y un avance de opinión sobre el tema. Esto depende en gran medida de la experiencia y de la asociación.
2. Las imágenes de apariencia sensoriales pueden ser puramente sensoriales, emocionales o intelectuales.

La creación gradual de las respuestas de apariencia pueden describirse como sigue (figura 1.1):

**Paso 1:** Las moléculas y la geometría de las sustancias crean la estructura de cada elemento de una escena. Las propiedades de los objetos que influyen en las imágenes de apariencia son:

- Las propiedades ópticas tales como reflectancia, transmitancia, etc, en diferentes direcciones.
- Forma física, es decir, forma, tamaño y superficie de la textura. La superficie puede ser lisa, brillante, mate o rugosa. En cada caso el color será diferente. La textura rugosa cuando se ve con luz normal, mostrará dos tonos, uno más ligero debido a la parte de la superficie elevada, y otro más oscuro debido a las superficies más bajas.
- Aspectos temporales que cambian con el tiempo, como el movimiento.

El color y el diseño son combinados para identificar un objeto o para comunicar ciertos símbolos, por ejemplo los semáforos, o para hacer los objetos atractivos. El color puede ser una parte esencial del objeto o una propiedad secundaria como en una decoración o un ambiente. El diseño de una escena puede tener una, dos, tres o cuatro dimensiones, la cuarta dimensión serían los movimientos, como en las artes escénicas. La distancia de observación puede cambiar el color y la textura.

**Paso 2:** La estructura y el entorno (como la iluminación) interviene en la creación del estímulo visual. Las propiedades de la fuente de luz son caracterizadas por la distribución espectral y la intensidad en diferentes direcciones, rendimiento de color, etc. Factores ambientales inmediatos como los geográficos (estación, clima, etc), sociales y médicos (estado físico y mental del observador). Los juicios están también influenciados por nuestra experiencia y educación, más específicamente respuestas heredadas y aprendidas, como la memoria, la tradición, la cultura, la moda, las preferencias, etc.

**Paso 3:** Los estímulos son modificados por las características retinal y neural en las respuestas de apariencia. Los mecanismos receptores influyentes en el observador son las características de la visión del color (discriminación de color, la adaptación y la constancia, etc), efectos de envejecimiento y otros sentidos (oído, gusto, olfato, tacto.)

**Paso 4:** Las respuestas de apariencia y los factores comportamentales de los observadores afectan a la calidad de los juicios y sus preferencias. Es posible examinar una escena tomando parte en ella, observando los elementos, montando el conjunto y considerando como interactúan los elementos. Hutchings [11] ideó una disciplina técnica llamada Análisis del Perfil de Apariencia (APA) para describir elementos del material. Para productos alimenticios, las propiedades estructurales son definidas por dos atributos de percepción ligados, denominados textura visual y sabor visual. El problema surge para un completo APA de un producto o creación artística en la selección de los atributos apropiados para evaluar.

### 2.1.3 Evaluación visual de la apariencia

Introduciéndonos de una forma más concreta en el tema general del trabajo, los atributos de apariencia para los acabados goniocromáticos (metalizados, perlados, etc) pueden ser divididos en dos tipos dependiendo de la distancia de observación y las condiciones de iluminación. A medias distancias, de unos cuantos metros, se observan características de macro apariencia, como los cambios de color y de brillo. Por otra parte, a distancias más cercanas, se observan características de micro apariencia como la textura o que la distribución espacial de color del acabado es más aparente. McCamy [12, 13], a finales del siglo XX, da una visión completa sobre la apariencia y los atributos visuales de los recubrimientos con efectos especiales. Se van a revisar a continuación los términos asociados con el aspecto visual de recubrimientos empleando pigmentos goniocromáticos.

#### *Color*

El color de la carrocería de un coche, por ejemplo, depende del tipo de pigmento usado. Hay tres tipos principales de acabados, solido, metalizado y colores de interferencia. Los colores homogéneos sólidos convencionales fueron creados mediante el uso de pigmentos de absorción (esencialmente esféricos o isotrópicos). Las partículas del pigmento dan el acabado de color característico a través de la absorción selectiva de la luz incidente. Los colores sólidos se mantienen bastante constantes en su apariencia y color con el ángulo de visión y dirección de iluminación.

Los pigmentos de efecto juegan un papel más dominante en recubrimientos para automoción, ya que mejoran la apariencia del coche acentuando sus curvas. A diferencia de los colores sólidos, los acabados metalizados cambian de brillo y claridad con las condiciones de observación y de iluminación. En el caso de recubrimientos con pigmentos de interferencia, el colorido y el tono de color cambia también con el ángulo de observación y la dirección de iluminación.

#### *Brillo*

Como el color y la textura, comentados antes y después, respectivamente, el brillo pertenece a las componentes fundamentales de nuestra apariencia visual [14, 15] (figura 1.1). Nuestra percepción del brillo describe las propiedades de la geometría dependiente de una superficie [7, 8].

Numerosos autores han trabajado sobre la apariencia visual del brillo [4, 16-23]. En estas publicaciones se han definido numerosos atributos de brillo, en donde la mayoría de estos atributos vienen definidos en las siguientes normas ASTM [7, 24-27].

Pfaff [28] usa los atributos de brillo “metalizado” y “perlado”. Estos atributos son relevantes en el campo de los pigmentos de efecto.

#### *Brillo Metalizado*

De acuerdo con Pfaff [28], el llamado brillo metalizado es un atributo de percepción para la sensación visual asociada a un brillo de apariencia especial de una superficie metálica. El brillo metalizado es inducido por la reflexión especular de “pequeños espejos”. Los pequeños espejos son, o bien micro superficies situadas en la superficie del objeto o pigmentos en forma de escama embebidos en una matriz transparente. Los pigmentos metalizados son introducidos en cosmética, plásticos, tintas, etc, para darle al producto una apariencia como de brillo metalizado.

#### *Brillo Perlado*

El atributo de percepción denominado brillo perlado, resulta de la asociación con la apariencia del brillo de una perla como es descrito por Pfaff [28]. El brillo de las perlas parece venir de las profundidades del interior de la perla. El aparente brillo tridimensional es inducido por interreflexiones de las múltiples capas que componen la estructura de las perlas [29, 30]. El brillo, como de perla, es imitado por medio de algunos pigmentos de efecto especiales.

#### *Textura*

Además del color y el brillo, nombrados anteriormente, la textura es uno de los componentes fundamentales de la apariencia [14, 15] (figura 1.1). La textura describe las propiedades dependientes de una superficie, estructura, patrón o topografía superficial [6, 7].

En el estudio sobre la apariencia visual de la textura [31] se describen numerosos atributos relacionados con la textura. En relación con los pigmentos de efecto, algunos autores [32-34] utilizan ciertos atributos como “glint” y “rugosidad”. Los términos “sparkle” y “graininess” han sido usados por varios autores en diversos trabajos [35-47].

#### *Sparkle*

El termino sparkle viene definido por la norma ASTM E 284-13b [7] y considerado en numerosos trabajos, algunos de ellos citados anteriormente. Es un atributo de textura en el que se observan destellos brillantes sobre un fondo. Los pequeños puntos luminosos brillan más que el fondo y destacan sobre el.



**Figura 2.2:** Efecto de textura sparkle.

Aparte de objetos autoluminosos como las estrellas en el cielo, los destellos luminosos son producidos por reflexiones especulares de pigmentos con forma de escamas. Estos puntos luminosos de luz son claramente visibles bajo una intensa luz direccional. En base a esta afirmación, se va a definir las variables involucradas en la detección del sparkle, en este caso el sparkle intensidad ( $S_i$ ) y el sparkle área ( $S_a$ ). Según la normativa ASTM E284 [7], estos factores vienen definidos del siguiente modo, el sparkle intensidad es especificado como “la intensidad de los pequeños puntos luminosos en relación con la intensidad del fondo”, y el sparkle área es “el tamaño total de las pequeñas áreas luminosas aparentes por unidad de área”. El sparkle área y el sparkle intensidad se combinan mediante una fórmula en el representativo grado de sparkle [37, 48].

$$S_G = 0,35\sqrt{(S_i * S_a)} - 0,8 \quad (2.1.1)$$

Gracias al estudio de Kirchner et al. [35], se puso de manifiesto la necesidad de profundizar en la influencia de las diversas variables implicadas en la detección del sparkle, tales como la concentración y tamaño de los pigmentos, el contraste con el fondo de la muestra, las condiciones de iluminación y observación, etc.

Los parámetros de apariencia del sparkle percibido puede ser determinados mediante el análisis de imágenes con un instrumento como el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac, que se describirá en secciones posteriores.

### *Graininess*

El atributo de textura “granularidad”, “graininess” o “coarseness” describe el tamaño de los componentes en los que un sistema puede ser subdividido. Esta definición es dada por McCamy [13], pero la definición dada por la normativa ASTM E284 [7] es la siguiente, “el contraste percibido del patrón irregular exhibido cuando se

ve la muestra bajo iluminación difusa”. Algunos ejemplos pueden ser: azúcar, sal, palomitas, cereales, etc. La arena y la grava son ejemplos de sistemas poco y muy granulados respectivamente.



**Figura 2.3:** Sistemas de partículas diferentes en graininess.

Un sistema de partículas con poco graininess, como la arena (figura 2.3 izquierda) se compone de muchos componentes pequeños. En cambio pocos componentes grandes están presentes en un sistema de grano grueso con un alto graininess como puede ser la grava (figura 2.3 derecha).

El graininess aumenta a medida que aumenta el tamaño de partícula de los pigmentos de efecto. El graininess de los pigmentos de efecto es determinado mediante el análisis de imágenes por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac, a describir en secciones posteriores.

## 2.2 Pigmentos de efecto goniocromático

Los pigmentos de efecto han abierto nuevos caminos en la física del color, especialmente con respecto a la investigación, desarrollo y aplicación a escala industrial. La producción de color de los pigmentos de efecto es causado principalmente por procesos anisotrópicos como reflexión simple o múltiple, interferencia o difracción. Estos procesos no se pueden realizar con los denominados pigmentos de absorción. El término genérico de “pigmento de efecto” es inadecuado porque los colores generados por los pigmentos de absorción también están basados en un “efecto” óptico. Sin embargo, pigmento con forma de escama o pigmento laminar (multicapa), también denominados *flakes*, es una expresión correcta para este tipo de pigmentos. El color generado por los pigmentos de efecto es extremadamente dependiente del ángulo, tanto de la dirección de iluminación como la de observación.



Los pigmentos de efecto especial dan como resultado una sensación de color extraño para el sentido humano de color, porque nuestro sentido ha evolucionado para percibir principalmente colores de pigmentos de absorción. En un sentido práctico, los pigmentos de efecto necesitan unos métodos de fabricación más sofisticados en comparación con los pigmentos de absorción, y, también unas técnicas más amplias de caracterización, medida, aplicación y procesado.

Todos los tipos de pigmentos de efecto se componen de una partícula con forma laminar con un rango de tamaños típicos entre  $1\ \mu\text{m}$  y  $1\ \text{mm}$ . Esto es, entre 10-1000 veces más grande que los pigmentos de absorción. El espesor del pigmento de efecto tiene valores entre  $10\ \text{nm}$  y  $1\ \mu\text{m}$  [49, 50]. A causa de la forma de los pigmentos, el efecto de color resultante es cada vez distinto según la morfología de las partículas y según estén orientadas en el recubrimiento con respecto a la superficie. Del mismo modo que los pigmentos de absorción, los pigmentos de efecto pueden ser inorgánicos u orgánicos. Con respecto a los procesos de producción de color, se dividen en cuatro grupos, que por razones históricas se clasifican del siguiente modo:

1. Pigmentos Metálicos.
2. Pigmentos Perlados.
3. Pigmentos de Interferencia.
4. Pigmentos Difractivos.

En la literatura, los pigmentos de brillo nacarado a menudo son incluidos en la clasificación de pigmentos de interferencia [51-53]. Las leyes usadas para describir las propiedades ópticas de los pigmentos metalizados son esencialmente mediante óptica geométrica, todos los otros tipos de pigmentos de efecto son generalmente descritos por la óptica ondulatoria.

Los *pigmentos metalizados* consisten normalmente en un metal o una aleación de metales. El brillo metálico típico es uniformemente más brillante cuanto más paralelamente orientados estén los flakes/escamas con respecto a la superficie del recubrimiento. El llamado efecto metalizado es consecuencia principalmente de la reflexión direccional y difusa en la superficie y bordes de los flakes (micro-láminas).

En contraste, los *pigmentos perlados* se caracterizan porque están compuestos por dos o más capas con un alto índice de refracción, con valores comprendidos entre 1.5 y 2.9. El substrato/núcleo más comúnmente usado es la mica, pero también pueden emplearse metales u óxidos de metales. El brillo perlado específico depende de la variación de las capas. Este brillo es originado por una o múltiples reflexiones en las fronteras de las capas, seguido por las interferencias en las ondas de luz. Detrás de la función general de los *pigmentos de interferencia* están las diferentes capas ópticas, luego estos no requieren el uso de un substrato de mica. El subgrupo

de pigmentos de interferencia son los denominados pigmentos ópticamente variables. La alta relación de los índices de refracción, en conjunto con los diferentes espesores de las capas, hacen difundir la primera o más ordenes de interferencia de tal manera que se pueden observar una gran variedad de colores de interferencia en dependencia con el ángulo de observación.

La estructura de rejilla o “pila de lavar” de los *pigmentos difractivos* desvían la luz entrante. El efecto de color resultante puede ser atribuido también a la naturaleza ondulatoria de la luz. El substrato se compone de una sustancia altamente reflectante o incluso ferromagnética. El substrato es revestido simétricamente con vapor por ambos lados con varios materiales conocidos a partir de nanotecnología. Las partículas ferromagnéticas pueden ser orientadas con un campo magnético externo antes de la reticulación del aglutinante. Los colores inusuales producidos, a menudo impresionantes, requieren que los pigmentos de efecto se sometan a un examen más sutil y detallado comparados con los pigmentos de absorción [54, 55].

### 2.2.1 Pigmentos metalizados

Los pigmentos metalizados, generalmente son partículas metálicas, se basan principalmente en la reflexión especular de las partículas en forma de lamina. Este tipo de reflexión consiste en una superposición de componentes especulares y difusas superpuestas. Los flakes metálicos convencionales (generalmente de aluminio) tienen unas dimensiones que oscilan entre los 5  $\mu\text{m}$  hasta cerca de los 50  $\mu\text{m}$ , mientras que el espesor varía entre aproximadamente los 100 nm y 1  $\mu\text{m}$ . En algunos casos extremos, las partículas tienen unas dimensiones que son hasta 10 veces más grandes, como se verá más adelante, cuando se describan en profundidad las muestras empleadas para algunos de los experimentos realizados. La relación del espesor con el diámetro de la partícula se llama factor de forma y se extiende desde 1:50 a aproximadamente 1:500. Los flakes metálicos son usados en pinturas, lacas, materiales plásticos y tintas, también son empleados en productos químicos, materiales de construcción, explosivos o pirotécnicos, por ejemplo, como partículas reactivas [28, 56].

#### *Características*

En este trabajo se está interesado únicamente en el reflejo metálico producido por las diferentes partículas que componen el recubrimiento. Esta propiedad es causada, en términos físicos simples, por el hecho de que los átomos metálicos individuales pueden liberar fácilmente los electrones de enlace. En disposiciones en red, los átomos del metal pierden completamente los electrones de valencia. Estos electrones forman el gas de electrones que se distribuye entre los iones restantes de modo que cada ion se fija en una posición correspondiente de la red. A causa de su interacción con los electrones, una onda de luz externa procedente de una fuente

normal no puede penetrar el denso gas de electrones. La mayoría de la luz es más bien reflejada y la parte restante es absorbida con una pequeña profundidad de penetración. La reflexión y la absorción producen el típico brillo metálico y color característico natural de los metales [57].

El cambio en la densidad del gas de electrones en la superficie del metal da como resultado una dispersión de luz en el rango visible, además de otros fenómenos. Esto provoca un destello o un bajo efecto metálico coloreado. En la siguiente tabla se muestran los índices de refracción, absorción y reflexión aproximados para algunos de los metales más usados para la fabricación de pigmentos metálicos.

**Tabla 2.1:** Reflectividad e índices de refracción y absorción para una luz incidente perpendicular en una longitud de onda concreta ( $\lambda=589.3$  nm) para los pigmentos metálicos más usados.

Metal	Reflectividad $r(n, k)$	Índice de Refracción (n)	Índice de Absorción (k)
Ag	0.990	0.052	3.91
Al	0.912	1.181	6.99
Au	0.888	0.280	2.91
Cu	0.804	0.493	2.80
Zn	0.768	2.74	5.77
Ni	0.664	1.71	3.61
Fe	0.586	2.91	3.58
Mo	0.575	3.40	3.56
Ti	0.565	2.09	3.11
W	0.524	2.83	3.02

Además, señalar que la reflectividad real, aparte del tipo de metal empleado, depende de otros aspectos estructurales de las partículas, especialmente:

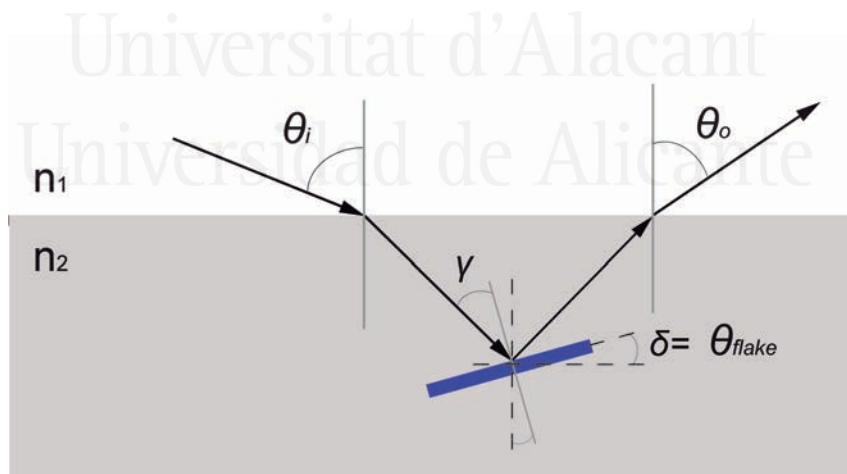
1. Tamaño y distribución de las partículas;
2. Forma de las partículas;
3. Espesor de la partícula;
4. Orientación del pigmento;
5. Comportamiento humectante del pigmento (leafing, non-leafing);

No es fácil, sin conocimiento sobre la orientación de las partículas, describir y medir el efecto metálico visualmente, ya que es combinación de numerosos efectos individuales.

1. Tono.
2. Blancura.
3. Brillo, luminosidad.
4. Poder colorante o poder cubriente.
5. Efecto Sparkle

En esta tesis en particular, se analizará en profundidad el efecto sparkle, como se explicará en capítulos posteriores. El *sparkle* o *grados de sparkle* consiste en pigmentos de efecto metálico con tamaños de partículas promedio superiores a  $25 \mu\text{m}$  [35, 55]. La definición precisa del término Sparkle según la norma ASTM E-284 [7] es “el aspecto de apariencia de un material que parece emitir o revelar diminutos puntos brillantes de luz que son notablemente más brillantes que su entorno inmediato y se hacen más evidentes cuando se varía como mínimo uno de los contribuyentes (observador, muestra, fuente de luz)”.

Para partículas de estas dimensiones o mayores, el ojo puede distinguir flakes individuales con una orientación igual a la de la superficie del recubrimiento. Esto es causado por el aumento de la intensidad de la luz reflejada direccionalmente en las superficies de las partículas más grandes. Como consecuencia de la orientación desigual de los flakes, los cambios del efecto sparkle dependen del ángulo de iluminación y de observación (figura 2.4).



**Figura 2.4:** Descripción de los ángulos de incidencia y observación relativos a la superficie.

En la figura 2.4, los ángulos polares  $\theta_i$  y  $\theta_o$  describen los ángulos de iluminación y observación,  $\gamma = \theta_{inc}$  y hace referencia al ángulo de incidencia sobre el pigmento,  $\theta_{flake}$  es la posición del pigmento de efecto y  $\delta$  es el ángulo de inclinación del pigmento [58]. El sparkle no está restringido únicamente a los pigmentos metalizados, como más adelante se estudiará, sino que puede estar presente en otros tipos de pigmentos.

### Estructura

#### Tamaño de partículas

Durante el proceso de fabricación y molienda, los pigmentos de efecto metalizado son convertidos en partículas extremadamente finas, con espesores comprendidos entre  $0.1 \mu\text{m}$  hasta  $0.3 \mu\text{m}$ , pero no es posible determinar con exactitud el tamaño de partícula, sino que se obtiene una función de distribución (figura 2.5) aproximadamente Gaussiana: un número limitado de partículas finas ( $D_{10}$ ), un gran número de partículas con tamaños medios ( $D_{50}$ ) y notablemente menos partículas gruesas ( $D_{90}$ ).

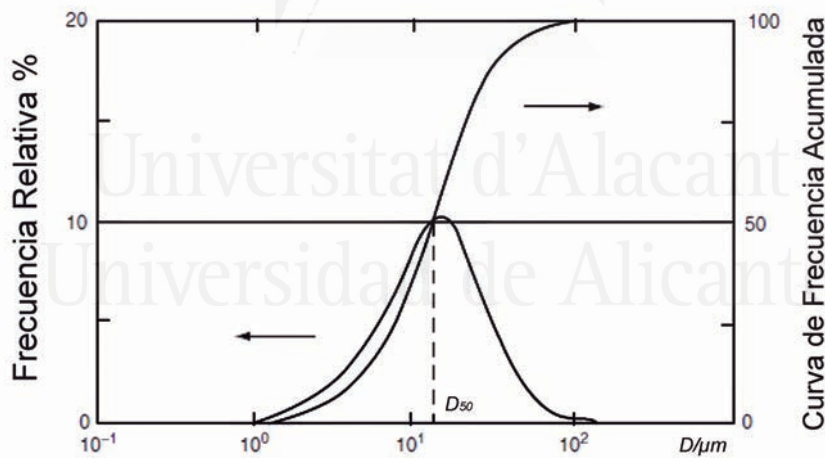


Figura 2.5: Distribución de tamaños de partículas.

#### Distribución de partículas

Como se ha descrito en el punto anterior, los pigmentos de efecto metalizado después de su proceso de fabricación no tienen un tamaño de partícula determinado. Esto significa que un producto con el mismo tamaño promedio de partícula, pero

con diferentes distribuciones de partículas producirá impresiones ópticas muy diferentes. Pigmentos con una amplia distribución de partículas, tienen una cierta cantidad de partículas gruesas junto con una alta proporción de partículas finas con una cantidad extremadamente alta de bordes y esquinas. Si el cociente superficie/borde es bajo genera propiedades ópticas moderadas: el brillo es bajo y el flop es pobre. El flop es entendido como la alteración de la claridad como función del ángulo de observación. En cambio, los pigmentos de efecto metalizado con una estrecha distribución de tamaños de partícula, tienen sólo una pequeña proporción de partículas finas. El cociente superficie/borde es alto y como consecuencia estos productos tienen alto brillo metálico y el flop es bueno (alto contraste claro-oscuro según la geometría de observación).

### Forma de las partículas

Además del tamaño medio de partícula ( $D_{50}$ ) y su distribución, la forma del flake también afecta al efecto metálico. La forma de las partículas varía dependiendo del proceso de producción. Pueden variar desde partículas con formas irregulares, conocidas como *Cornflakes* (figura 2.6) hasta partículas casi redondas con proporciones mínimas de dispersión que son conocidas como *Silverdollars* (figura 2.7). Además de su morfología especial, las partículas silverdollar tienen una distribución reducida de tamaños de partículas y esto mejora aun más sus propiedades ópticas.

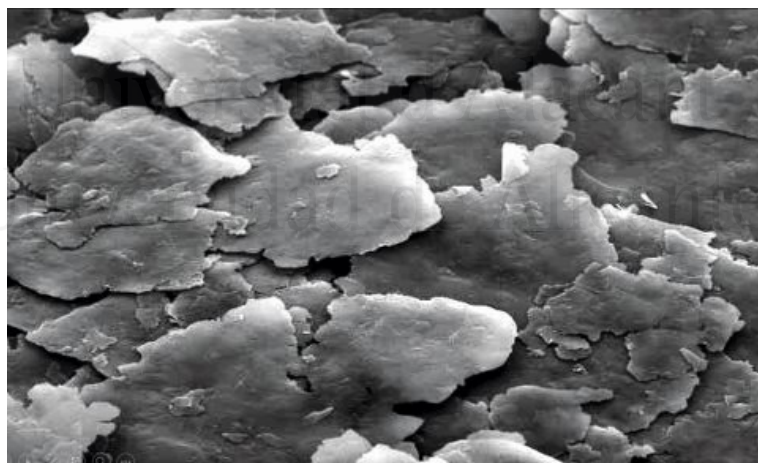


Figura 2.6: Partículas cornflake.

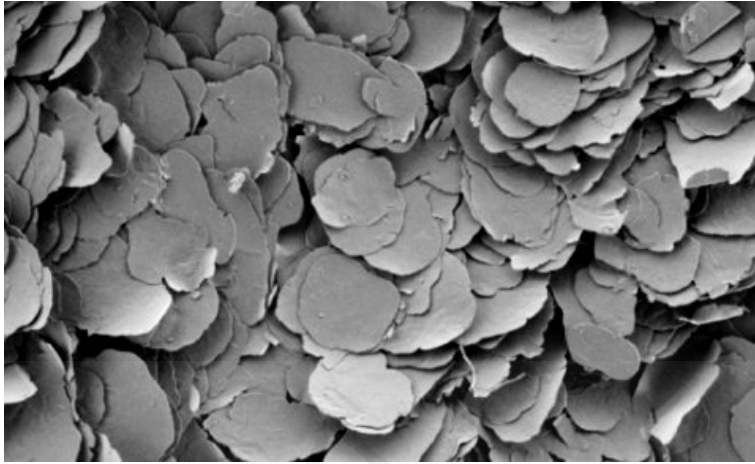


Figura 2.7: Partículas silverdollar.

### Espesor de la partícula

El espesor de la partícula influye en la movilidad que permite que las partículas puedan orientarse ellas mismas bajo un tiempo determinado (tiempo de secado de la pintura) paralelas a la superficie, resultando la dirección de reflexión máxima (los rayos incidentes son reflejados en una sola dirección).

### Orientación del pigmento

En primer lugar, la alineación de la partícula está determinada por las técnicas de producción empleadas. El máximo reflejo posible se logra mediante el paralelismo completo del flake con respecto a la capa superficial, esto es equivalente a un espejo (figura 2.8). Perturbaciones locales sobre la alineación paralela de la partícula en la pintura pueden ser provocadas por ejemplo por movimientos del disolvente y otros aditivos durante la evaporación, por lo que estos tipos de heterogeneidades conducen a moteados y floculación. Recubrimientos con bajo contenido en estado sólido muestran un efecto metalizado más distintivo que los sistemas con mayor contenido de estado sólido, esto es debido a que al bajar la viscosidad hace que los pigmentos se orienten mejor.

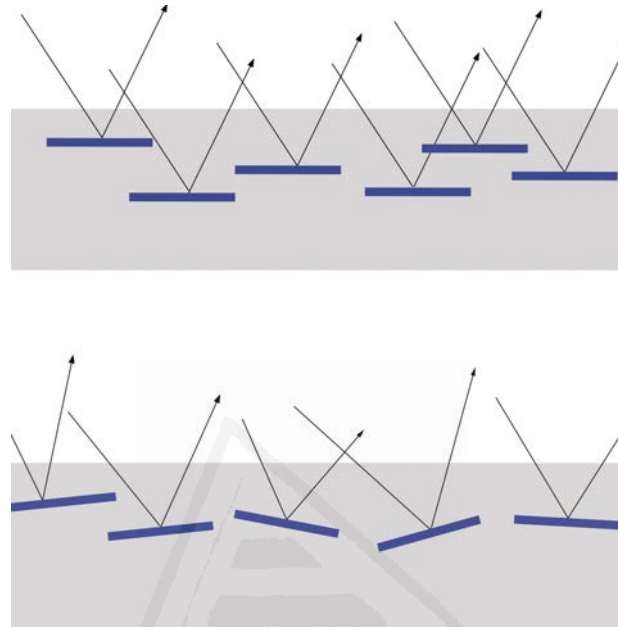


Figura 2.8: Orientación de los pigmentos.

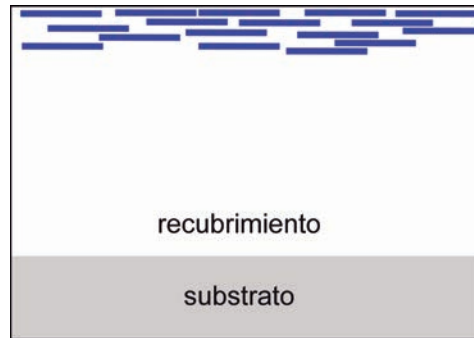
### Comportamiento humectante del pigmento

En los distintos procesos de fabricación se usan lubricantes para prevenir la soldadura en frío. La composición química del lubricante influye en el comportamiento humectante del pigmento metalizado de una forma característica. Como ejemplo, para pigmentos de aluminio la diferencia se da entre tipo *leafing* o *non-leafing* [53].

#### *Pigmentos flotantes (Leafing)*

Estos pigmentos tienen una tensión superficial muy alta, de manera que no se humedecen por la matriz ligante. A consecuencia de esto, flotan sobre la capa y se orientan ellos mismos en lo alto de la superficie (figura 2.9).

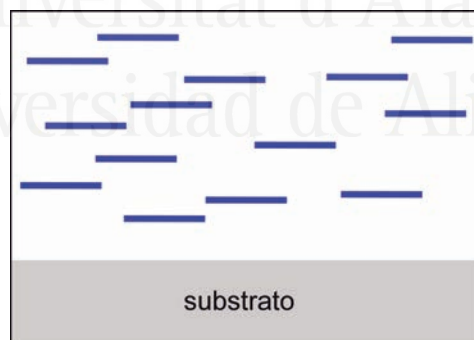




**Figura 2.9:** Pigmentos flotantes (Leafing).

*Pigmentos no flotantes (Non-leafing)*

Este tipo de pigmentos son aquellos que están totalmente humedecidos por el aglutinante y por lo tanto distribuidos uniformemente en toda la pintura (figura 2.10). Los ligantes normalmente son polares o altamente polares. La apariencia de los pigmentos no flotantes con respecto a los flotantes es que no es tan metalizada, pero el recubrimiento es absolutamente resistente. En algunos casos añadiendo aditivos fuertemente polares o aglutinantes a los recubrimientos, pueden convertir pigmentos flotantes en pigmentos no flotantes.



**Figura 2.10:** Pigmentos no flotantes (Non-leafing).

### 2.2.2 Pigmentos perlados, de interferencia y difractivos

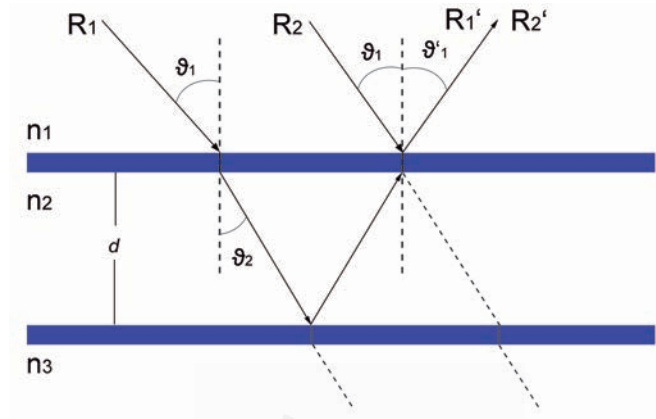
El origen del color que se obtiene con los pigmentos perlados y de interferencia, también llamados pigmentos de efecto especiales, se basa esencialmente en una interferencia constructiva. Los pigmentos perlados imitan el brillo nacarado de las perlas naturales. Los colores brillantes y brillos únicos se deben a interacciones de luz superpuestas como la absorción y reflexiones múltiples en los diferentes límites de las superficies de las partículas. Los pigmentos de interferencia generan sustancialmente más colores brillantes que los pigmentos perlados. Los términos pigmentos perlados e interferencia son a menudo erróneamente utilizados como sinónimos de ambos tipos de pigmentos, aunque sólo los pigmentos perlados tienen el brillo típico de las perlas naturales [59].

Las partículas de brillo nacarado y los pigmentos de interferencia consisten en capas con diferentes índices de refracción. Los espesores de capa son del orden de magnitud de las longitudes de onda visibles. El espesor total del flake varía desde los 30 nm hasta 1  $\mu\text{m}$ . Los pigmentos perlados, de interferencia y difractivos también pueden producir sparkle. Este fenómeno dependiente del tamaño es, en este caso, por lo general más oscuro que el brillo de los pigmentos metálicos debido a que la reflexión es causada solamente por la diferencia de índices de refracción en lugar de por una reflexión metálica.

#### *Características*

Las propiedades de producción de color de los pigmentos perlados, de interferencia y difractivos son dependientes de la geometría de la partícula, especialmente en las interacciones de interferencias de luz y las condiciones físicas de color que rodean a la partícula. De acuerdo a las ecuaciones descritas en la bibliografía [55], las leyes de interferencia son función de la longitud de onda  $\lambda$ , el índice de refracción en la interfaz  $n$ , el espesor  $d$  de cada una de las capas, y, el ángulo de observación o interferencia  $\vartheta_1$ .

$$G = 2d * \sqrt{n^2 - \sin^2(\vartheta_1)} + \frac{\lambda}{2} \quad (2.2.1)$$



**Figura 2.11:** Interferencias en una capa paralela plana con diferentes índices de refracción.

Como resultado de los diferentes índices de refracción, del mismo modo que la morfología de las partículas, las siguientes interacciones de luz contribuyen a la apariencia de color perlado y de interferencia de los pigmentos:

1. *Interferencia constructiva*: produce en ocasiones intensos colores que cambian en función del ángulo de observación, los diferentes colores y la dependencia del ángulo están dados por los índices de refracción, los espesores y el número de capas.
2. *Reflexión Única* en las interfases causan parte del brillo.
3. *Reflexión Múltiple* en las diferentes interfases de las capas transparentes o translúcidas causan el típico brillo nacarado de los pigmentos perlados.
4. *Dispersión* en los bordes o superficies rugosas de las partículas conduce a colores de interferencia mates.
5. *Absorción* reduce el brillo y depende del material de la capa.

Las diferencias de tamaños de partículas y de la composición del material permite la clasificación de los pigmentos de efecto especial como se describe en la bibliografía [28]. Las cinco clases de pigmentos más comunes son los siguientes: *silver white* (SW), *oro* (G), *óxido de hierro* (IO), *efecto interferencia* (IE) y *multi-color* (MC).

### *Pigmentos Silver White*

Los pigmentos silver white están compuestos de mica natural como substrato junto con una pequeña capa de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Con 40 nm a 60 nm, la capa de dióxido de titanio es muy fina, causando un efecto de interferencia de color blanco plateado. La impresión visual que surge de brillo y textura depende del tamaño de partícula de los pigmentos silver white.

### *Pigmentos de Oro*

Estos pigmentos, normalmente consisten en un substrato de mica natural con un recubrimiento de dos finas capas. Una capa de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) combinada con una capa de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El dióxido de titanio y el óxido de hierro se apilan, ya sea en dos capas separadas o mezclados juntos en una sola capa. La combinación de ambos óxidos induce a un color amarillo oro.

### *Pigmentos de Óxido de Hierro*

Un pigmento de óxido de hierro típico está compuesto de un substrato de mica natural con un recubrimiento de una fina capa de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El recubrimiento de óxido de hierro causa una impresión de color marrón rojizo oxidado.

### *Pigmentos de Efecto Interferencia*

Con respecto a los pigmentos anteriormente descritos, silver white, oro y óxido de hierro, al igual que los próximos tipos de pigmentos que se describirán, multi-color y sparkle, los llamados pigmentos de efecto interferencia (IE), son denominados así por el pronunciado efecto de interferencia producido en una sola capa. La fuerte influencia de la capa fina resulta en un cambio considerable en el color percibido debido a un cambio en la configuración geométrica.

Están compuestos por un substrato de mica natural más una capa de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). En comparación con los pigmentos silver white descritos anteriormente, la capa de recubrimiento es significativamente más gruesa.

Las capas de dióxido de titanio con un espesor entre 60 nm y 80 nm reflejan un color de interferencia amarillo. Un color de interferencia rojo es reflejado para espesores de capa entre 80 nm y 100 nm. Entre 100 nm y 140 nm, el color de interferencia reflejado es azul. El color de interferencia es verde para espesores comprendidos entre 120 nm y 160 nm. La luz transmitida tiene el color complementario de la luz reflejada [28] (figura 2.12).

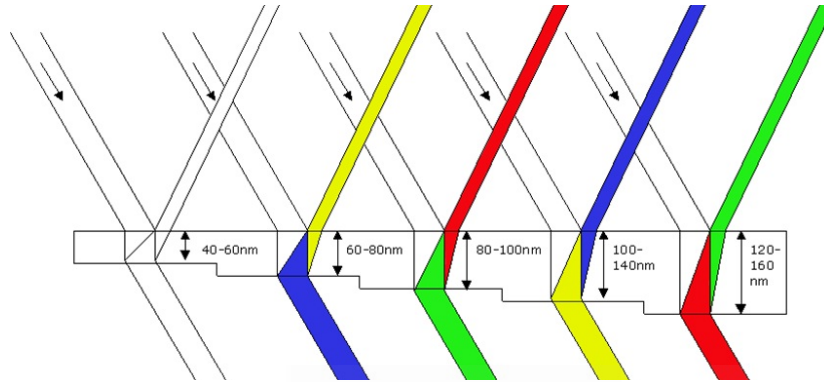


Figura 2.12: Pigmentos de efecto interferencia.



Figura 2.13: Dependencia del color de interferencia con respecto al espesor de la capa de dióxido de titanio.

### Pigmentos Multi-Color

Una versión mejorada de los pigmentos de efecto interferencia descritos anteriormente son los llamados pigmentos Multi-Colores (MC). Debido a la combinación de múltiples capas de recubrimiento alternando el índice de refracción, el cambio de color es más pronunciado que para los pigmentos de efecto especial con una sola capa de recubrimiento. Mientras que el color de un pigmento de efecto interferencia cambia de un gris acromático a un color cromático específico, el color de un pigmento multi-color cambia entre dos colores cromáticos específicos.

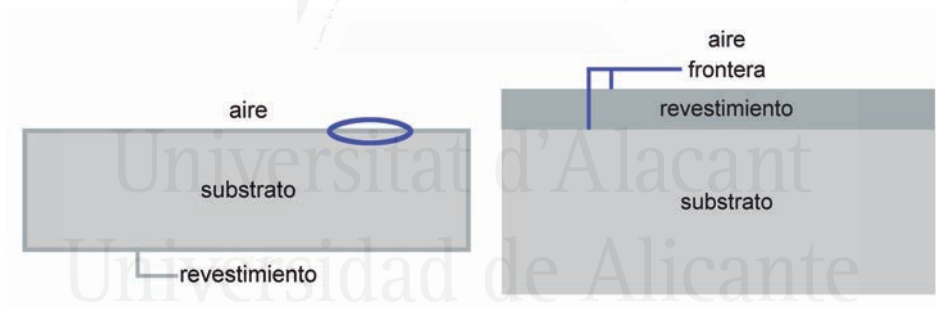
Están compuestos por un sustrato arbitrario con más de una capa de alto índice de refracción. Una capa intermedia de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) de baja refracción se encuentra siempre ubicada entre dos capas con alta refracción [28]. El cambio intenso de color de los pigmentos multi-color es visualmente más interesante que la apariencia de brillo y textura [60].

### ***Estructura***

En su forma y tamaño, los pigmentos de efecto especial difieren considerablemente de los pigmentos absorbentes convencionales. Los pigmentos absorbentes convencionales son partículas esféricas con diámetros inferiores a  $1\ \mu\text{m}$  [55]. En contraste con eso, estos pigmentos tienen forma de escamas/flakes con diámetros de hasta  $200\ \mu\text{m}$  [28].

De acuerdo con su tamaño de partícula, estos pigmentos son asignados a una de las cinco clases propuestas por Pfaff [28]. Estas cinco clases de partículas van desde los rangos de  $1\ \mu\text{m}$  hasta  $15\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$  hasta  $20\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$  hasta  $50\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$  hasta  $130\ \mu\text{m}$  y  $40\ \mu\text{m}$  hasta  $200\ \mu\text{m}$ . El tamaño de partícula de un pigmento de efecto especial arbitrario viene especificado normalmente en las fichas técnicas de los productores del pigmento.

El tamaño de partícula tiene influencia en la percepción visual del brillo y la textura. Por contra a esto, el color percibido depende principalmente de la estructura del pigmento de efecto. Estos pigmentos están compuestos por un núcleo en forma de escama cubierto con una o más capas de recubrimiento como se muestra en la figura 2.14.



**Figura 2.14:** Estructura de los pigmentos goniocromáticos.

### ***Substrato del Pigmento***

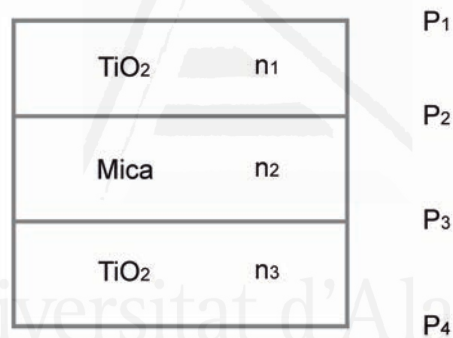
El núcleo transparente consiste en una mica natural o un material sintético. Este material sintético puede ser óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) o borosilicato. En contraste con la mica natural, que es un mineral perteneciente a un numeroso grupo de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos, los materiales sintéticos tienen un tamaño de partícula más grande, más aun en la estructura superficial y libres de impurezas colorantes.

### Revestimiento del Pigmento

La corteza del pigmento está formado por una o más capas delgadas de un óxido metálico de alta refracción. Los más usados son los siguientes: dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de hierro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dióxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) y óxido de cromo (III) ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

Comparado con los materiales del núcleo, los índices de refracción de los materiales de la corteza son mayores. Mientras que la mica tiene un índice de refracción sobre el 1.5 y el 1.6, los índices de refracción de todos los óxidos metálicos nombrados son superiores a 2.5. El elevado índice de refracción de la capa de recubrimiento induce a un efecto más o menos pronunciado de interferencia de la luz.

En los casos más simples, el pigmento metálico de óxido de mica consiste en tres capas con distintos índices de refracción:  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , donde  $n_1 = n_3$  (figura 2.15).



**Figura 2.15:** Estructura esquemática de un pigmento de mica con dióxido de titanio con las cuatro interfaces existentes.

En este caso hay cuatro interfaces ( $P_1P_4$ )

1.  $P_1P_4$ : medio exterior/óxido metálico.
2.  $P_2P_3$ : óxido metálico/mica

Cuando se examina un pigmento de mica con óxido de titanio, es fácil reconocer que el fenómeno de interferencia tiene lugar por la reflexión de las seis combinaciones de las interfaces. Algunas combinaciones como  $P_1P_2$  y  $P_3P_4$  o  $P_1P_3$  y  $P_2P_4$  crean fenómenos de interferencia idénticos. El espesor medio de la partícula está cercano a un valor estadístico medio. Los efectos de interferencia resultantes a partir de la interfase entre el recubrimiento de óxido metálico y el substrato de mica ( $P_2P_3$ ) se combinan juntos para crear un fondo blanco de reflexión. El color de interferencia

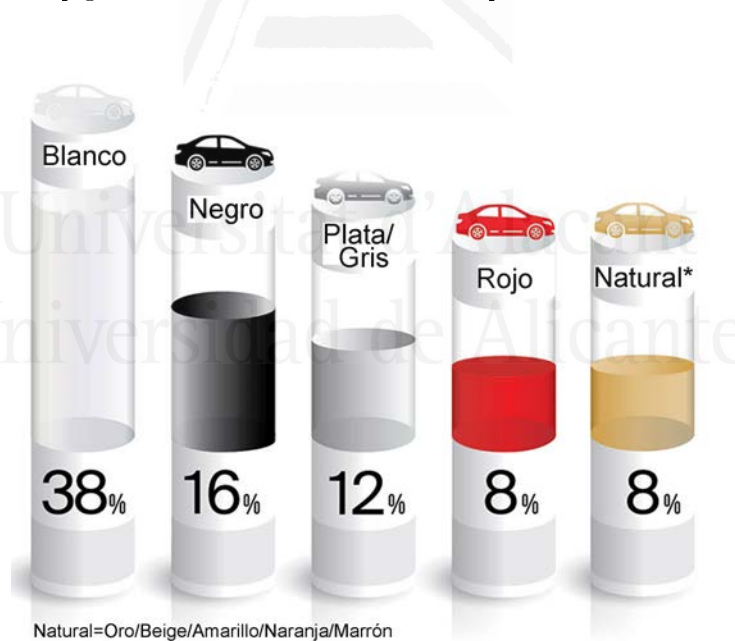
resultante a partir de un gran número de partículas de pigmentos sólo depende del espesor de la capa de óxido superior e inferior. [61, 62]

### 2.2.3 Aplicaciones

Debido a sus propiedades ópticas únicas y a su apariencia visual, los pigmentos de efecto son empleados en múltiples productos (figura 2.17). Algunos de los sectores industriales donde más se emplean los siguientes:

#### *Recubrimientos*

Aparte de las pinturas de absorción convencionales con pigmentos orgánicos e inorgánicos, los automóviles pueden estar recubiertos con pinturas de efecto metalizado y especial. Desde que se introdujeron en el mercado, los automóviles se recubren más frecuentemente con pinturas de efectos metalizados y especiales. En la figura 2.16 se muestran los colores más demandados en el sector automoción a nivel mundial, los cuales todos tienen en su composición en mayor o menor concentración pigmentos metalizados o de efecto especial.



**Figura 2.16:** Colores en el sector automoción más demandados durante el año 2016 (Fuente PPG).



Motocicletas y bicicletas son productos relacionados en los que también se emplean recubrimientos de efectos metalizados y especiales. Otros ejemplos de aplicaciones industriales con pigmentos de efecto se pueden encontrar en los utensilios de cocina, como frigoríficos, maquinas de café, en decoración como marcos, lámparas, en la industria textil como en telas, curtidos, etc.

### ***Plásticos***

La aplicación de pigmentos de efecto en la industria del plástico ofrece una amplia gama de productos, como pueden ser el ratón y teclado para el ordenador, carcasas para móviles, monturas de gafas, etc. Estos son solo unos pocos ejemplos ya que hay infinidad de productos realizados con materiales plásticos los cuales tienen pigmentos de efectos especiales. [28, 63].

### ***Cosmética***

Algunos de los ejemplos más importantes de la aplicación de los pigmentos de efecto en cosmética sería en sombras de ojo y esmaltes de uñas o pintauñas. Las barras de labios, lociones corporales, geles de ducha y champús para el cabello son otros productos cosméticos que contienen pigmentos de efecto para mejorar la apariencia visual de la piel y el cabello.

### ***Impresión***

Además de las aplicaciones descritas anteriormente en objetos tridimensionales como la piel, metal o plástico, los pigmentos de efecto son aplicados en multitud de materiales como papel, films, cartón, textil, cuero, etc. [28]. Las tintas con efectos especiales son impresas por motivos estéticos o de seguridad [16], como los billetes o entradas de eventos musicales y deportivos.

Son frecuentemente empleados en el área del diseño, joyas, perfumes, cajas de chocolate, paquetes de cigarros, etiquetas de vino, etc, son ejemplos típicos de aplicaciones en embalaje. Otros ejemplos son impresión de papeles de pared, papeles decorativos y textiles.



**Figura 2.17:** Ejemplos de aplicación de los pigmentos de efecto en diversos sectores industriales.

### 2.3 Caracterización de pigmentos de efecto goniocromático

Desde que los pigmentos de efecto son una clase de pigmentos propia [64], han sido evaluados en tests diferentes a los usados normalmente para pigmentos orgánicos e inorgánicos. Esencialmente existen dos tipos de tests: aquellos sobre el mismo pigmento, y, otros sobre el sistema de recubrimiento. En esta sección se está interesado únicamente en la caracterización directamente sobre el pigmento.

Los métodos de pruebas actuales para los pigmentos de efecto (flotantes y no flotantes) vienen compilados en la norma DIN 55923 [65].

#### *Tests sobre el pigmento*

1. Forma de la partícula
2. Tamaño de la partícula
3. Distribución del tamaño de partícula

Es especialmente importante determinar el tamaño de partícula y la distribución de tamaños de partícula, ya que ello va a determinar el efecto metalizado o especial.

### 2.3.1 Identificación química y estructural

En principio hay numerosas técnicas diferentes disponibles para determinar el tamaño de partícula y la distribución de los tamaños de partículas sólidas en forma de polvo y en sus preparaciones, como por ejemplo en pasta.

1. Análisis granulométrico
2. Análisis por sedimentación
3. Conteo electrónico
4. Métodos de difracción de luz (granulometría láser)
5. Análisis de imágenes (microscopía)

El significado de los resultados de la mayoría de los métodos están limitados por el hecho de que la forma de los pigmentos de efecto se desvía de la esférica.

#### *Análisis granulométrico*

Este método consiste en la determinación del tamaño de partícula por medio de tamices con diferentes tamaños de malla. Como su rango de medición sólo registra la fracción gruesa del espectro de tamaño de partícula, este proceso sólo es adecuado para pigmentos inorgánicos que se utilizan en pinturas de emulsión. En muchos casos es también de interés para determinar la fracción de residuo de partículas que son excesivamente grandes y que exceden claramente el tamaño medio de partículas. Este método no es apropiado para obtener información fiable sobre la distribución de tamaños de partícula, más aun para pigmentos orgánicos.

El procedimiento es el siguiente: el polvo de pigmento es suspendido en agua, y esta suspensión se vierte a través de un tamiz con una anchura de malla adecuada. El tamiz se lava varias veces con agua del grifo hasta que el agua de lavado se mantenga clara. El residuo de tamiz se seca, se pesa y se da como un porcentaje de la muestra original [66].

#### *Análisis por sedimentación*

En el análisis por sedimentación el tamaño de partícula se determina por la velocidad de sedimentación en un líquido definido. Los métodos por sedimentación tienen una importancia limitada a la hora de caracterizar la forma de la partícula, ya que la ecuación matemática de la sedimentación sólo es válida para partículas esféricas o cuasi-esféricas. Tales suposiciones conducen a resultados incorrectos,

debido al comportamiento especial en sedimentación de las partículas con forma de laminas.

#### *Conteo electrónico*

En esta técnica, el número de partículas con un determinado tamaño que pasan a través de aberturas definidas de diferentes diámetros están determinadas usando equipos electrónicos. La importancia de esta técnica esta también limitada por la extrema anisotropía de las partículas, de modo que estos métodos solo se utilizan para el control de calidad de la forma de las partículas para aplicaciones especiales, como por ejemplo, determinar la proporción de fracción de partículas muy gruesas.

#### *Métodos de difracción de luz*

La granulometría láser es actualmente el método más comúnmente usado para determinar la distribución de tamaños de partícula para los pigmentos de efecto. Pese a que esta técnica tiene algunas restricciones, en principio cumple con los requisitos de velocidad y reproducibilidad. Sin embargo, no está estandarizada y depende fuertemente de la configuración particular de cada equipo de medida.

Como se ha hablado anteriormente, la distribución de los tamaños de partícula por granulometría láser se caracteriza de forma concisa por tres valores (figura 2.5):

$D_{10}$  como medida de la fracción fina de la distribución de partículas, es decir, el 10 % de todas las partículas medidas son menores a este valor y el 90 % son mayores.

$D_{50}$  como medida de la media de la distribución de partículas, es decir, el 50 % de las partículas medidas son menores a este valor y el 50 % son mayores.

$D_{90}$  como medida de la fracción gruesa de la distribución de partículas, es decir, el 90 % de todas las partículas medidas son menores a este valor y el 10 % son mayores.

Una vez obtenidos estos tres valores se puede realizar un cálculo más realista del tamaño medio de partículas empleadas en el recubrimiento mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (2.3.1)$$

### 2.3.2 Comportamiento óptico

Cuando la luz se encuentra un objeto en su paso de propagación, un número de fenómenos físicos tienen lugar simultáneamente, los predominantes son:

1. Reflexión especular desde la interfaz del objeto (asociado con el brillo).
2. Dispersión dentro del material (asociado con la reflexión difusa y en ocasiones con transmisión difusa).
3. Absorción dentro del material (en gran parte responsable del color).

La reflexión y refracción de la luz ocurre cada vez que el haz de luz atraviesa la frontera entre dos materiales que no tienen el mismo índice de refracción, por ejemplo, cuando pasa de un medio a otro. En esa frontera, la luz incidente es parcialmente reflejada (de vuelta de la frontera) y parcialmente refractada (dentro del cuerpo del material), debido al cambio de índice de refracción. El proceso es mostrado en la [figura 2.18](#). La proporción de luz desde la frontera distinta a la refractada dentro del medio es determinada por la diferencia de índices de refracción entre los dos materiales y por el ángulo de incidencia que la luz ( $\phi$ ) hace con la frontera. Por ejemplo, una frontera entre aire y una superficie altamente brillante, como por ejemplo los pigmentos metálicos, reflejara más del 4 % de la luz incidente.

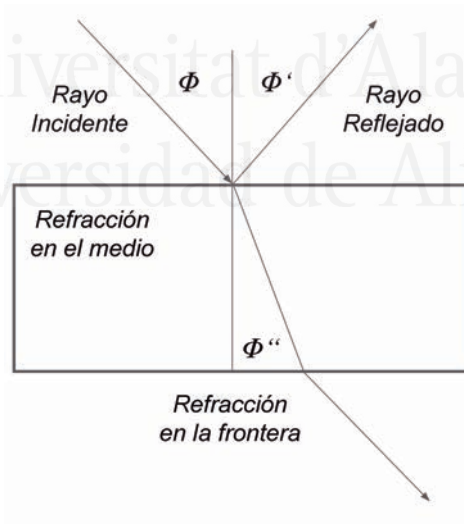


Figura 2.18: Reflexión y refracción de la luz.

### *Reflexión*

La reflexión de la luz ocurre cuando las ondas encuentran una superficie u otra frontera que no absorbe completamente la energía de la radiación y rebotan las ondas en la superficie. Si la luz reflejada vuelve antes de la interacción con el objeto, se lleva información geométrica como la rugosidad de la superficie o el brillo. La luz reflejada por la frontera tiene las propiedades espectrales de las fuentes de luz, ya que no ha interactuado con el material en absoluto, y el material no tiene margen para ninguna absorción. Si el objeto es iluminado con luz blanca, entonces el brillo o la luz reflejada de la frontera también son blancos.

### *Dispersión*

La dispersión o esparcimiento (figura 1.1) es un proceso que cambia la dirección de la luz y por lo general se asocia con la interacción de la luz con partículas pequeñas. Debido a la dispersión, la luz viaja en muchas direcciones distintas a la dirección de propagación. Partículas relativamente grandes, tales como pigmentos de dimensiones de más de  $2 \mu\text{m}$ , dispersan la luz por reflexión y refracción. Las partículas relativamente pequeñas, de menos de aproximadamente  $0.3 \mu\text{m}$ , dispersan la luz por difracción. Durante el día, cuando el sol está alto en el cielo, el cielo se ve azul debido a que la luz del sol azul se dispersa con mayor eficacia por partículas muy pequeñas en la atmósfera que la luz de longitudes de onda más largas. Al amanecer y al atardecer, cuando el sol está bajo en el horizonte, vemos más de la luz no dispersada, y el cielo se ve rojizo.

La mayoría de objetos que se ven son visibles debido a la dispersión de la luz de sus superficies. De hecho, éste es nuestro principal mecanismo de observación física [67]. La dispersión de la luz depende de la longitud de onda o frecuencia a la que se dispersa la luz. Dado que la luz visible tiene una longitud de onda del orden de una micra, objetos mucho más pequeño que éste no pueden ser vistos, incluso con un microscopio. Las partículas coloidales, tan pequeñas como un micrón, se pueden observar directamente en suspensión acuosa [68].

### *Refracción*

Cuando un rayo de luz cae sobre una superficie lisa y transparente, parte de la luz incidente se refleja en la frontera y otra parte se transmite en el material. La transmisión rectilínea o refracción de la luz a través del objeto es la desviación de la energía radiante de un camino recto al pasar de un medio a otro.

El paso de la luz permanece inalterable sólo cuando pasa a través de un vacío.

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \quad (2.3.2)$$

Cuando un rayo de luz pasa a través de un medio uniforme y no absorbente, como la atmósfera, el cristal o un cristal transparente, los fotones entrantes son absorbidos de forma continua y remitidos a su vez rápidamente por la interacción de los átomos. Esto hace más lenta la propagación de la luz: cuanto más denso es el medio, menor será la velocidad. Mientras que entra desde un medio a otro, el cambio en la velocidad de propagación de la luz está acompañado por el cambio en la dirección de propagación, a menos que la luz incidente sea normal o perpendicular a la interfaz de los dos medios. Cuando más denso es el medio, la dirección de propagación se moverá más cerca de la normal. El fenómeno se conoce como refracción. Un haz de luz cambia su dirección dos veces - una vez cuando entra desde el aire a un objeto (por ejemplo, vidrio) y de nuevo cuando sale del objeto y vuelve a entrar en el aire. La dirección de la luz dejando el objeto es la misma que el de la luz incidente, pero se produce una diferencia de camino debido al cambio doble de dirección (figura 2.18).

#### *Comportamiento óptico de los pigmentos metálicos*

Las propiedades ópticas de los pigmentos metálicos incluyen el brillo, el destello (sparkle y brillo metálico), el poder cubriente, saturación de color, el flop (cambio de claridad en relación con el ángulo de visión), etc. Estas propiedades de efecto metalizado están relacionadas con el tamaño de partícula, distribución de tamaño de partículas, forma de la partícula (cornflake, silverdollar), la rugosidad de la superficie, la orientación del pigmento en relación con la superficie y el comportamiento humectante del pigmento.

Con respecto al tamaño de partícula, la impresión visual creada depende de la relación entre la reflexión especular y la luz difusa dispersada. La proporción de luz especular reflejada aumenta con el tamaño del área de pigmento y la proporción de luz difusa dispersada aumenta con el número de aristas, que hacen que se disperse la luz (figura 2.19). Cuando más grande y grueso sea el tamaño de partícula (y más redonda la forma de la partícula) mayor será la proporción de luz especular reflejada y por lo tanto, mejor es el brillo, el destello, el flop y la saturación de color. Cuando más fino o delgada sea la partícula laminar, y más irregular sea la partícula, mayor será la proporción de luz difusa dispersa, por lo tanto, mayor será el poder cubriente o de cobertura (figura 2.20).

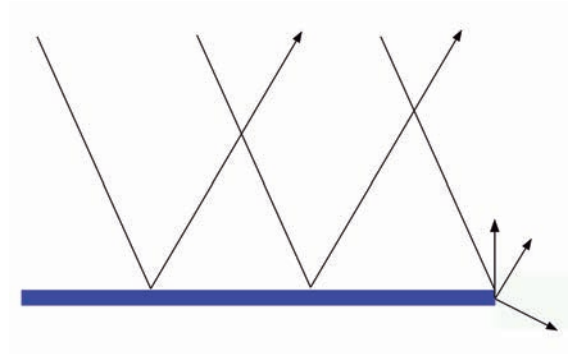


Figura 2.19: Reflexión y dispersión en la superficie y bordes de los pigmentos metálicos.

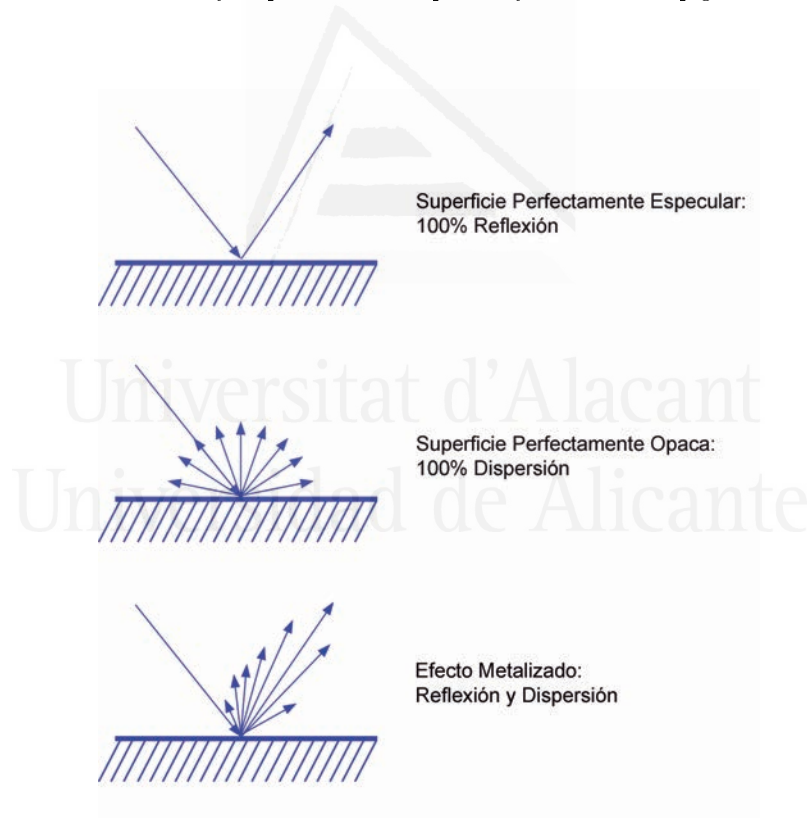
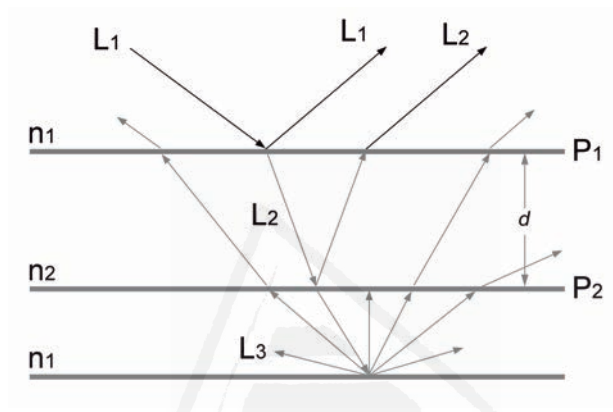


Figura 2.20: Diagrama simplificado mostrando la incidencia sobre diferentes superficies.



*Comportamiento óptico de los pigmentos de efecto goniocromático*

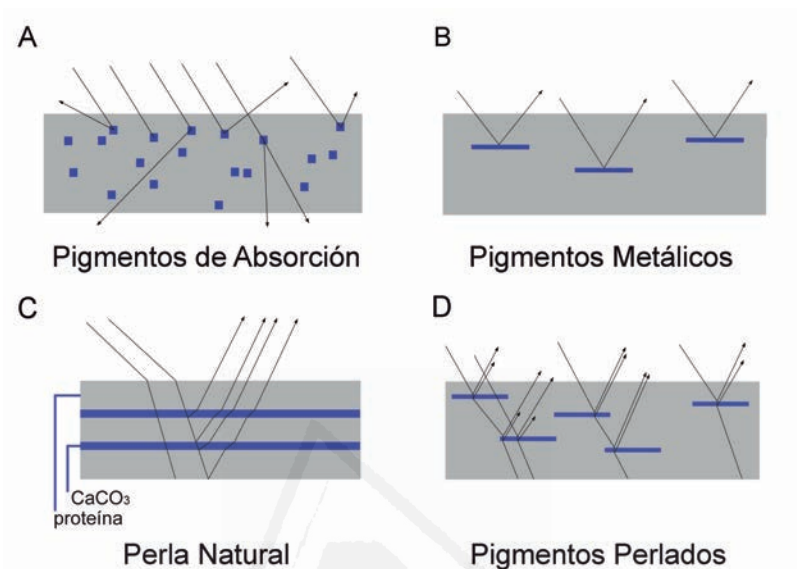
Los conocimientos físicos de los efectos de interferencia ópticos han sido objeto de numerosos trabajos [28, 54, 58, 61, 69-72]. Los principios ópticos de los pigmentos perlados/interferencia se muestran en la figura 2.21 para un caso simplificado de incidencia sin reflexión múltiple ni absorción.



**Figura 2.21:** Diagrama simplificado mostrando la incidencia sobre un pigmento de efecto especial.

En la interfase  $P_1$  entre dos materiales con índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , parte de la luz del haz  $L_1$  es reflejada ( $L'_1$ ) y parte transmitida ( $L_2$ ). Los ratios de intensidad dependen de  $n_1$  y  $n_2$ . En una disposición de múltiples capas que se encuentran en materiales perlados e interferencia/difracción (figura 2.22), cada interfase produce una reflexión parcial. Después de la penetración a través de diversas capas, dependiendo del tamaño y la diferencia entre  $n_1$  y  $n_2$ , prácticamente se obtiene la reflexión completa, siempre que los materiales sean suficientemente transparentes.

En pigmentos que simulan los efectos de las perlas naturales, el caso mas simple es una partícula con forma de lamina/flake con dos limites de fase  $P_1$  y  $P_2$  en las superficies superior e inferior de las partículas.



**Figura 2.22:** Propiedades ópticas de pigmentos de absorción, metálicos, perlas naturales y de efecto especial.

### 2.3.3 Instrumentación

Todos los instrumentos de medida óptica de objetos tienen esencialmente los mismos componentes. Estos componentes son la fuente de luz, el soporte para muestras, el sistema de detección y la unidad de procesamiento [73]. La información más importante sobre fuentes de iluminación y sistemas de detección más comunes se dan en la siguiente publicación [74].

#### *Fuente de luz*

Como ya es sabido, cualquier percepción visual de color, al igual que de brillo y textura está basada en la presencia de luz. La presencia de luz es garantía para objetos autoluminosos. En caso de que los objetos no sean autoluminosos, se debe proporcionar luz para poder percibir el color, brillo y textura. En cuanto a la percepción visual humana, la presencia de luz es también necesaria para evaluaciones perceptuales. Por lo tanto, los instrumentos ópticos para mediciones de objetos que no son autoluminosos están equipados internamente con una fuente de luz.

La tarea de la fuente de luz es la generación de la radiación electromagnética en el rango visible. Las fuentes de luz típicas usadas para mediciones ópticas en los dispositivos son fundamentalmente lámparas incandescentes, lámparas xenón o en ocasiones lámparas halógenas. Últimamente ya se están utilizando lámparas LEDs en algunos modelos.

#### *Detector óptico*

La función del sistema de detección óptico es la descomposición espectral y la captura cuantitativa de la luz reflejada. La descomposición espectral se realiza con una unidad de dispersión. Un elemento fotosensible es el responsable de la captura cuantitativa. Hay disponibles distintos tipos de unidades de dispersión y elementos fotosensibles. De su selección y combinación depende o se decide el tipo de detector óptico. Los detectores ópticos son, o bien detectores espectrales, radiométricos, o detectores de imágenes, como se describen a continuación.

#### *Detector espectral*

Como se ha mencionado anteriormente, un detector espectral, así como un detector de formación de imágenes, se compone de una unidad de dispersión y un elemento fotosensible.

En la unidad de dispersión, la luz se descompone espectralmente por medio de prismas, filtros de interferencia de banda estrecha o rejillas de difracción [73]. La dispersión espectral usando un prisma se basa en la dependencia del índice de refracción en la longitud de onda. Al entrar y salir del prisma, luz de diferentes longitudes de onda se refractan en diferentes direcciones. La técnica para utilizar un conjunto de filtros de interferencia de banda estrecha basados en sus diferentes propiedades espectrales. Las propiedades espectrales conocidas de los filtros permiten el cálculo de la reflectancia espectral.

Cada elemento fotosensible transforma la radiación electromagnética en una señal eléctrica. En otras palabras, un flujo de fotones se mide en forma de corriente eléctrica. Los originalmente fotomultiplicadores, ampliamente distribuidos, fueron sustituidos sucesivamente por fotodiodos. El funcionamiento de un fotomultiplicador se basa en el efecto fotoeléctrico externo producido en una capa fotoemisora. El componente principal de un fotodiodo es una capa fotoconductora induciendo un efecto fotoeléctrico interno. Dependiendo del modo de operación, la combinación de múltiples fotodiodos en un elemento fotosensible se denomina sensor de dispositivo de carga acoplada (CCD) o sensor semiconductor óxido-metal complementario (CMOS). En espectrofotómetros o escáneres, se utilizan sensores unidimensionales en línea. Las matrices de dos dimensiones se utilizan en sistemas de imágenes como cámaras.

### *Detector espectral-imágenes*

Al igual que el detector espectral, el detector de imágenes consiste en una unidad de dispersión y un elemento fotosensible. La unidad de dispersión y el elemento fotosensible de un sistema de detección de imágenes adicionalmente proporciona resolución espacial, mientras que la descomposición espectral está limitada a tres regiones. Las tres regiones son para longitudes de onda largas, medias y cortas. La cantidad de luz roja, verde y azul se detecta por medio de elementos fotosensibles. Un elemento fotosensible para la detección con resolución espacial se realiza como un sensor con una matriz bidimensional, ya sea con elementos fotosensibles de color o en blanco y negro [75].

### *Notación de geometrías*

En la práctica se han empleado diferentes notaciones de la configuración de geometrías de medidas óptica [60, 76-83]. El informe técnico CIE TC1-65 [15] y la normativa ASTM E 2175-01 [84] dan información general sobre la especificación geométrica multiángulo. Las normas ASTM E 2194-03 [85], ASTM E 2539-14 [86] y DIN 6175-2:2001-03 [87] listan algunas configuraciones geométricas preferenciales.

Todas las notaciones geométricas empleadas contienen información acerca de la ubicación de la fuente de luz y el sistema de detección con respecto a la superficie de la muestra. La declaración del ángulo de incidencia o iluminación y el ángulo de reflexión o detección parece ser obvio. En lugar de ángulo de reflexión, la notación más común usa el llamado ángulo especular contado desde la llamada dirección especular. Por lo tanto, estos son los ángulos esenciales para geometrías en el plano de incidencia; la fuente de iluminación, la normal a la muestra y el sistema de detección, se encuentran en el mismo plano. Los ángulos individuales vienen definidos en la normativa ASTM E 284-03a [7], en el informe técnico CIE TC1-65 [15] y en las siguientes secciones.

### *Ángulo de incidencia o ángulo de iluminación*

En el caso de los instrumentos ópticos, el ángulo de incidencia también se le denomina ángulo de iluminación. El ángulo de iluminación especifica la ubicación de la fuente de luz con relación a la superficie de la muestra. Esta especificación es utilizada por diversos autores [77, 79, 81, 83, 88]. La figura 2.23 muestra que el ángulo de incidencia/iluminación se cuenta desde el vector normal hasta el vector incidencia. El signo del ángulo de incidencia es siempre positivo. Esto no se mantiene necesariamente para el ángulo de reflexión.

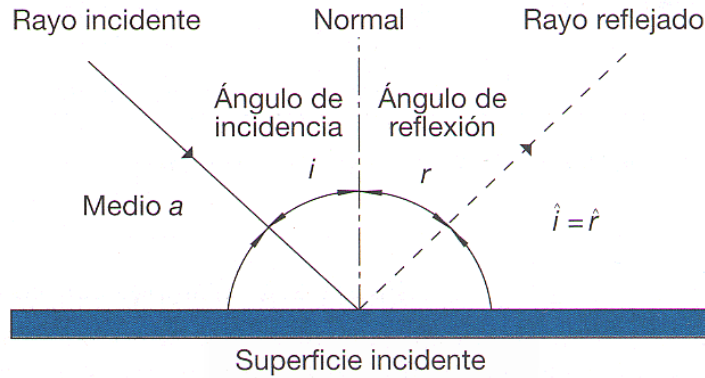


Figura 2.23: Ángulos de incidencia y reflexión.

#### Ángulo de reflexión o ángulo de detección

El ángulo de reflexión es contado desde la normal con un signo negativo, como muestra la figura 2.23. En este sentido, se especifica la ubicación del sistema de detección con respecto a la superficie de la muestra. El ángulo de reflexión también se llama ángulo de detección en el caso de instrumentos ópticos.

#### Ángulo aspecular

La otra posibilidad para especificar la ubicación del sistema de detección es utilizar el llamado ángulo aspecular. De acuerdo con el informe técnico CIE TC1-65 [15], el ángulo aspecular se define como la diferencia angular entre el vector de reflexión y el vector de brillo. Las geometrías con el ángulo aspecular positivo se les denomina geometrías *cis*, en cambio para geometrías con un ángulo aspecular negativo se les denomina geometrías *trans*.

Basados en los puntos anteriores, a continuación se van a detallar varios instrumentos ópticos para mediciones bidireccionales (BRDF - *bidirectional reflectance distribution function*), ya sea de color, brillo o textura. Se van a describir tanto dispositivos comerciales de medida como dispositivos goniocromáticos exploratorios.

### *Instrumentos comerciales multiángulo*

La mayoría de los dispositivos comerciales han sido diseñados para aplicaciones de control de procesos y control de calidad. Además de un rendimiento adecuado, incluyendo repetibilidad, reproducibilidad y exactitud [89], los requisitos de los instrumentos comerciales conciernen a su cómodo manejo. Esto implica, movilidad ilimitada, mediciones rápidas y evaluación automática. Por lo tanto, los instrumentos comerciales son sistemas principalmente portátiles, incluyendo un paquete de software. Llevan a cabo mediciones relativas utilizando un estándar blanco para la calibración.

La variación de la configuración geométrica se realiza por medio de variaciones en los ángulos introducidos en pasos discretos. Además del ángulo de incidencia, la variación del ángulo de reflexión o aspecular, respectivamente, llegó a ser aceptado en la comunidad de proveedores de instrumentos y por los usuarios. Esto se hace evidente en las configuraciones geométricas realizadas en los dispositivos multiángulos comerciales de medida.

Para los espectrofotómetros multiángulo Datacolor Multi FX10, X-Rite MA68II, BYK-mac, y X-Rite MA98, su reproducibilidad fue investigada por Chorro et al. [90]. El resultado del estudio fue que todos los instrumentos determinan significativamente diferentes datos, por lo que falta reproducibilidad entre instrumentos.

Aparte de la reproducibilidad, un buen rendimiento incluye la repetibilidad y la precisión. Los términos reproducibilidad, repetibilidad y precisión vienen explicados en la normativa ASTM E 2214 [91], además de en algunos libros y trabajos [73, 92, 93].

El rendimiento de tres espectrofotómetros multiángulo, Datacolor Multi FX10, X-Rite MA68II y el BYK-mac, fue investigado por Kehren et al. [89]. Se determinó que la repetibilidad a corto plazo da mejores resultados que a medio plazo. La reproducibilidad y la precisión es peor para configuraciones geométricas con detección cerca de la dirección especular. A continuación se realizara una breve descripción de los tres instrumentos citados anteriormente (Datacolor Multi FX10, BYK-mac y X-Rite MA98) para dar a conocer sus principales características.

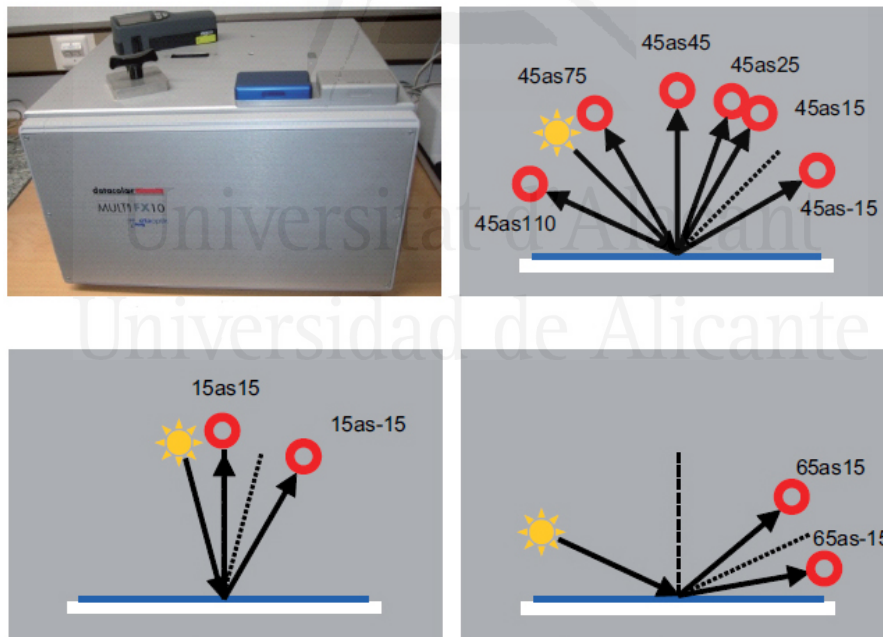
En los próximos meses, X-Rite va a lanzar al mercado un nuevo instrumento multiángulo, que incorpora una configuración óptica para medición de color (6 geometrías recomendadas en ASTM E2194 [85]) y también, como novedad, para sparkle y graininess. Concretamente, la medida de sparkle está configurada con ángulo de iluminación 15as, y propone 5 ángulos de observación/captura con una cámara de color (RGB).

*Espectrofotómetro multiángulo Datacolor Multi FX10*

Este instrumento fue creado y desarrollado por la compañía Datacolor AG [28, 94]. Es un dispositivo de sobremesa con una apertura rectangular de 22 mm por 69 mm (figura 2.24). Detrás de la abertura, diez combinaciones geométricas de iluminación y detección óptica se mueven de forma consecutiva. Por medio de unas guías de luz de fibra óptica, cada una de las tres iluminaciones están acopladas con una lámpara halógena. Del mismo modo, las geometrías de detección están acopladas con el monocromador. El sensor detecta la luz reflejada en un rango de longitudes de onda entre 400 nm y 780 nm en intervalos de 10 nm.

Los diez pares de geometrías, tanto de iluminación como de detección están dispuestos en forma de medio tubo. El movimiento del medio tubo para cambiar la disposición geométrica conlleva mucho tiempo. Una serie de medidas en las diez configuraciones de medida puede llevar unos 2 minutos.

Las otras representaciones de la figura 2.24, muestran las disposiciones geométricas de la fuente de luz y el sistema de detección relativos a la muestra.



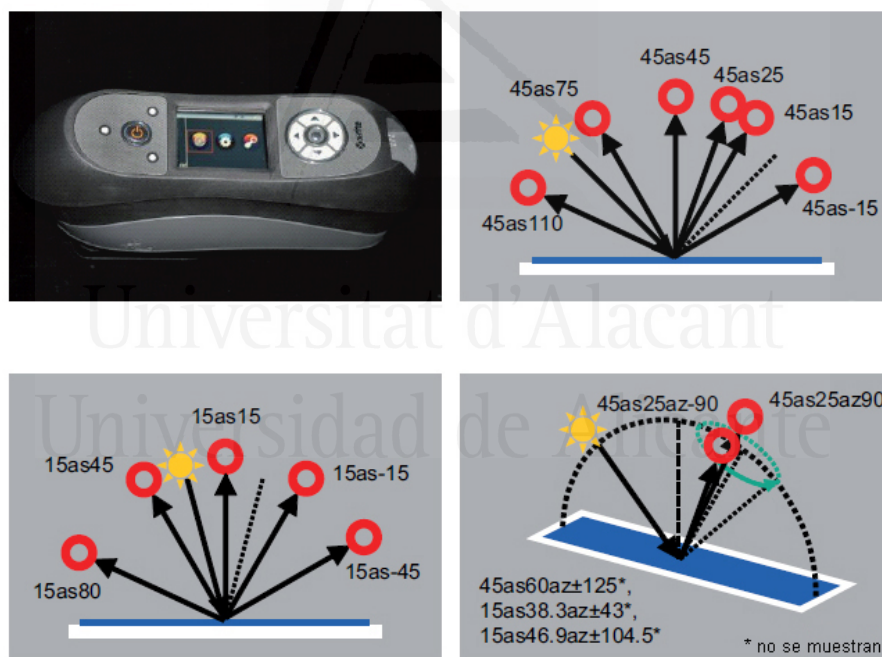
**Figura 2.24:** Espectrofotómetro multiángulo Datacolor FX10.

*Espectrofotómetro X-Rite multiángulo MA98*

Aparte del instrumento multiángulo MA68II citado anteriormente y nombrado en diversos trabajos [28, 77, 90], la empresa X-Rite proporciona nuevas versiones desarrolladas de este instrumento. El instrumento más avanzado es el dispositivo MA98 (figura 2.25).

En este instrumento, la muestra es iluminada mediante lámparas halógenas, con una abertura circular de 12 mm de diámetro. En el plazo de 2 segundos, todas las medidas espectrales en un rango de longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm en intervalos de 10 nm están acabadas.

En total este instrumento tiene 19 geometrías de configuración. Además de 11 geometrías en plano, el dispositivo tiene 8 geometrías fuera de plano. Todas estas configuraciones se muestran en las figura 2.25.



**Figura 2.25:** Espectrofotómetro multiángulo X-Rite MA98.



*Espectrofotómetro multiángulo BYK-mac*

Este dispositivo comercial está producido por la empresa BYK-Gardner. Tiene una abertura circular de 23 mm. Menos de 6 segundos son necesarios para realizar todas las medidas posibles en todas las configuraciones geométricas (figura 2.26).

Las medidas espectrales son realizadas en intervalos de longitudes de onda de 10 nm para un rango entre 400 y 700 nm para seis configuraciones geométricas. Estas seis geometrías se denominan 45°as-15°, 45°as15°, 45°as25°, 45°as45°, 45°as75° y 45°as110° [85] y se muestran en la figura 2.26b.

Además de las medidas espectrales en las seis geometrías detalladas anteriormente, el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac realiza mediciones de imágenes en tres configuraciones direccionales y una configuración difusa. Las tres configuraciones direccionales con ángulos de incidencia de 15°, 45° y 75° y un ángulo de reflexión de 0° se muestran en la figura 2.26c. La figura 2.26d muestra la geometría difusa d/0° con iluminación difusa y detección a 0°.

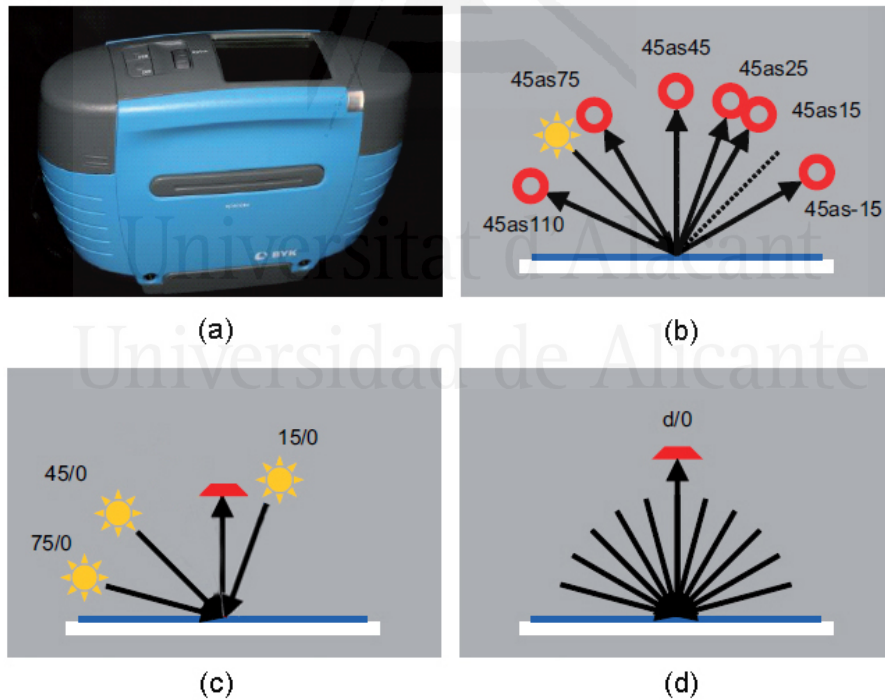
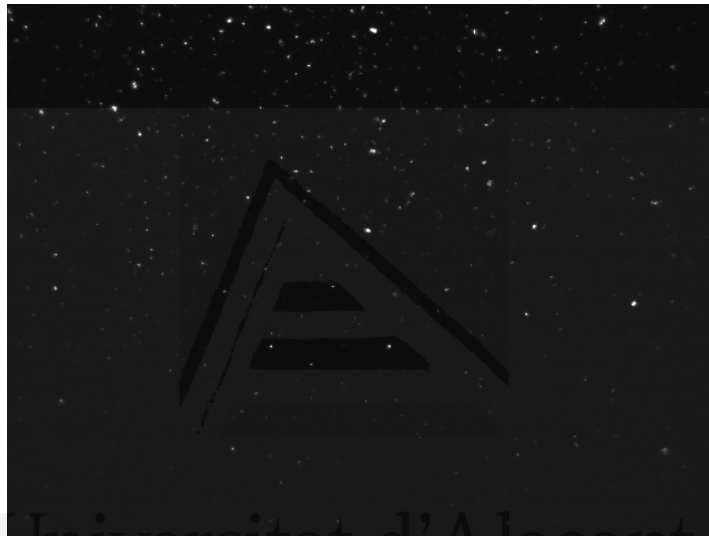
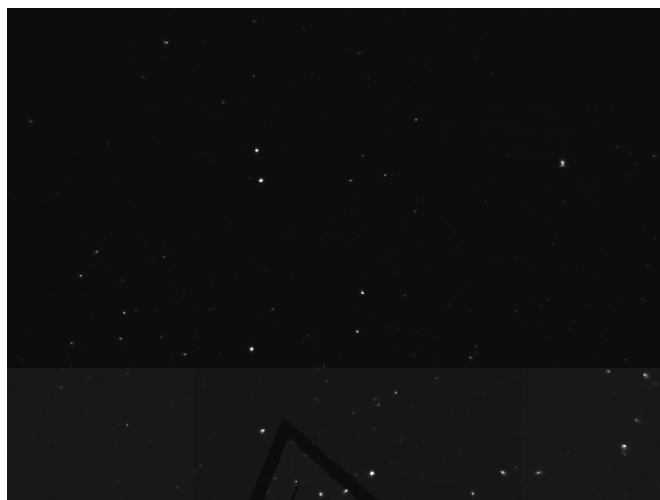


Figura 2.26: Espectrofotómetro multiángulo BYK-mac.

En la normal, se encuentra una cámara CCD integrada con un sensor que detecta la luz reflejada de un diodo emisor de luz blanca (wLED). Las imágenes grabadas son internamente usadas para determinar los parámetros de textura sparkle (figura 2.27) y graininess (figura 2.30). Como se ha nombrado anteriormente, estos parámetros son denominados como sparkle área (Sa), sparkle intensidad (Si) y el grado de sparkle (SG) para cada una de las tres geometrías bidireccionales, además del parámetro graininess (G) para la geometría difusa.



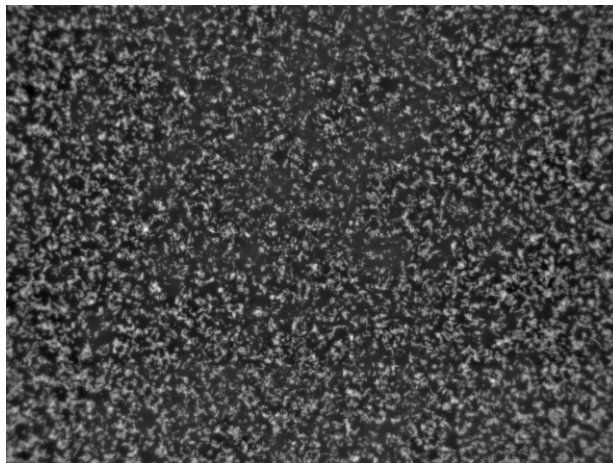
**Figura 2.27:** Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de sparkle en la geometría  $15^{\circ}$ as $15^{\circ}$ .



**Figura 2.28:** Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de sparkle en la geometría  $45^\circ$ as $45^\circ$ .



**Figura 2.29:** Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de sparkle en la geometría  $75^\circ$ as $75^\circ$ .



**Figura 2.30:** Imagen realizada por el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac para el cálculo de graininess.

La gran problemática que presenta este dispositivo es que es el único (hasta el año 2017) capaz de ofrecer valores instrumentales relativos a la textura del producto. Además se desconoce el algoritmo que se aplica sobre las imágenes captadas por el dispositivo para después proporcionar los 4 valores de textura, lo que hace que se generen incógnitas acerca de su funcionamiento y fiabilidad. Existen numerosos estudios/modelos que han investigado a fondo las variables implicadas en la evaluación del efecto de textura sparkle [35, 39, 42-44, 95]. Aunque existe una versión nueva del BYK-mac, denominada BYK-mac-i, en este trabajo se ha usado únicamente el primer modelo.

De todos los trabajos citados anteriormente, el modelo de Ferrero et al. [42] es de los modelos más actuales, el que más similitudes parece que tiene con respecto al proceso de evaluación producido por el BYK-mac, como veremos en esta tesis. En este modelo también se obtiene los resultados a partir de imágenes de las muestras, captadas mediante el gonio-espectrofotómetro español (GEFE)[96-98], y los factores más importantes que tiene en cuenta a la hora de aplicar el algoritmo son el contraste y la densidad de flakes/partículas que se encuentran en la muestra.

Como más adelante se abordará (Capítulo 5), se han realizado numerosas medidas teniendo en cuenta el modelo anteriormente citado, para posteriormente poder realizar una intercomparación entre los resultados proporcionados por el dispositivo BYK-mac, el modelo matemático propuesto por el IO-CSIC junto con las medidas realizadas con el GEFE y las valoraciones proporcionadas por los observadores durante los diversos estudios psicofísicos de escalado y detección.

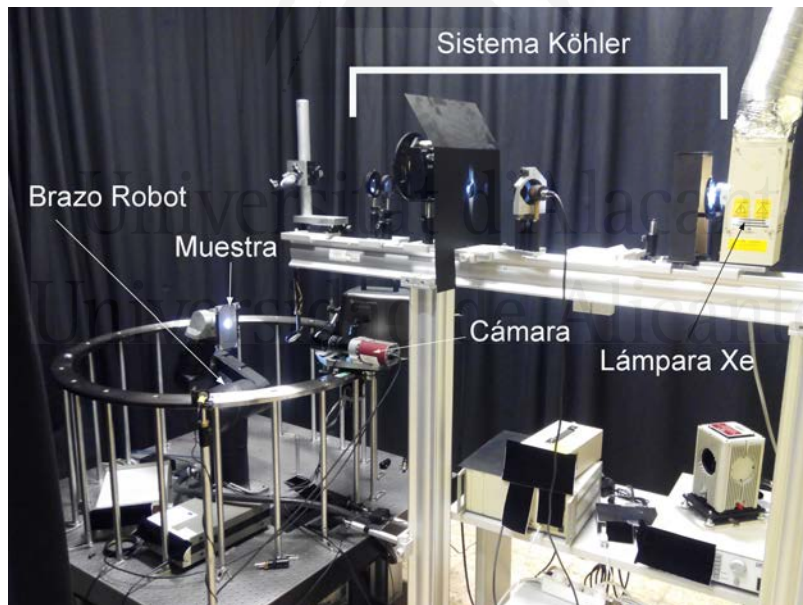
*Instrumentos goniocromáticos exploratorios para medida de textura*

Debido al interés en caracterizar la muestra de una forma global y completa, se han desarrollado diversos instrumentos no comerciales capaces de caracterizar la muestra de una forma más detallada, incluyendo valores referentes a la textura [75, 96].

A continuación se va a profundizar en el dispositivo desarrollado por el IO-CSIC, ya que en capítulos posteriores será empleado para comprobar la correlación visual e inter-instrumental entre las valoraciones visuales de los observadores y las valoraciones provenientes del dispositivo comercial BYK-mac.

*-Gonio-espectrofotómetro español (GEFE)*

El GEFE consta de tres sistemas: irradiación, posicionamiento de la muestra y detección (figura 2.31). El primero es fijo, mientras que los otros dos son móviles: la muestra se posiciona en cualquier orientación requerida respecto al haz incidente y el detector gira sobre un anillo dentado alrededor de ella. Esta disposición permite un muestreo rápido y preciso.



**Figura 2.31:** Gonio-espectrofotómetro español (GEFE).

El instrumento también incluye un sistema de alineamiento, basado en dos láseres colocados a  $45^\circ$  y a  $-45^\circ$  respecto a la dirección de incidencia. Este sistema de alineamiento físico da cuenta del origen de las coordenadas esféricas de incidencia y observación como el punto de cruce de los dos haces láser propagados en dos direcciones diametrales del anillo dentado. Con el GEFE es posible realizar medidas en 900 configuraciones geométricas que se corresponden con todas las combinaciones posibles de asignar a  $\theta_i$  y a  $\theta_s$  los valores de  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $70^\circ$  y a  $\phi_i$  y a  $\phi_s$  los valores de  $-120^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $180^\circ$ , como más adelante se estudiara en profundidad.

Hasta ahora solo se han nombrado dispositivos/modelos matemáticos que nos proporcionan ciertos valores instrumentales referentes ya sea, al color, brillo o textura. Uno de los aspectos fundamentales de este trabajo es ver cómo afectan esos factores a los observadores, por lo que resulta de vital importancia tener instrumentación adecuada para poder comparar posteriormente con los resultados instrumentales y analizar si existe una correlación adecuada. En este caso, las cabinas de iluminación son parte fundamental del proceso, ya sea cabinas de iluminación comerciales o cabinas de iluminación exploratorias. A continuación se van a describir los dos modelos empleados en el desarrollo de este trabajo.

#### *Cabina de iluminación byko spectra effect*

Esta cabina está desarrollada y fabricada por la empresa BYK-Gardner, la misma que proporciona el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac.

La apariencia de los acabados con efectos está influenciada por diferentes ángulos y condiciones de observación. Con esta cabina es posible controlar ambos parámetros para garantizar una evaluación objetiva de la impresión total del color de los acabados con efecto goniocromático. Esto ayuda a mejorar la comunicación y reducir los rechazos de productos.

Tiene 6 ángulos definidos de observación para la evaluación del color, consiste en un soporte en el que se puede variar la inclinación para poder evaluar en los siguientes ángulos:  $45^\circ$ as $-15^\circ$ ,  $45^\circ$ as $15^\circ$ ,  $45^\circ$ as $25^\circ$ ,  $45^\circ$ as $45^\circ$ ,  $45^\circ$ as $75^\circ$  y  $45^\circ$ as $110^\circ$ . El sistema de iluminación también pivota, intentando asegurar una correlación con los resultados del dispositivo multiángulo BYK-mac.

Para la evaluación del efecto de textura sparkle, se emplea iluminación directa por un conjunto de tres LEDs, simulando la luz directa del sol [99]. Las geometrías de medida son las siguientes:  $15^\circ/0^\circ$  ( $15^\circ$ as $15^\circ$ ),  $45^\circ/0^\circ$  ( $45^\circ$ as $45^\circ$ ) y  $75^\circ/0^\circ$  ( $75^\circ$ as $75^\circ$ ). Un aspecto muy importante a tener en cuenta de esta cabina de iluminación a la hora de evaluar el sparkle, es que se puede ajustar el nivel de iluminación, para poder evaluar también como afecta este atributo a la hora de detectar sparkle.



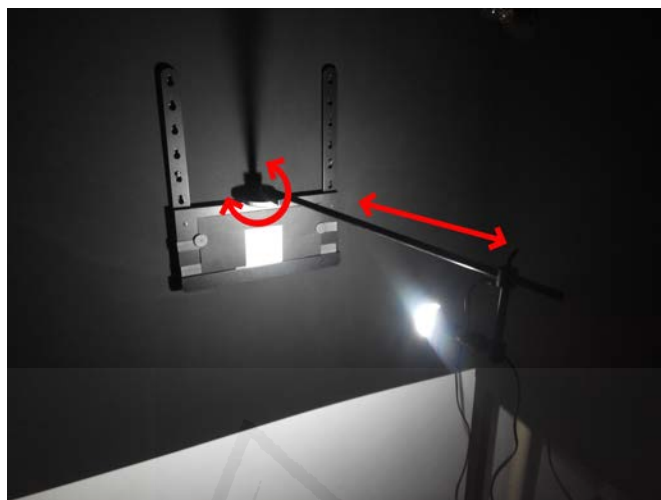
**Figura 2.32:** Cabina de iluminación byko spectra effect.

#### *Cabina de iluminación GVC-UA*

Esta cabina de iluminación fue diseñada y fabricada íntegramente por el grupo de Visión y Color del Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Universidad de Alicante para satisfacer las demandas que el mercado exige y poder realizar estudios psicofísicos que con las actuales cabinas comerciales existentes en el mercado no se podrían llevar a cabo.

El objetivo primordial de esta cabina es para la observación del efecto de textura sparkle. En ella se permite el cambio de la fuente de luz para conseguir diferentes distribuciones espectrales, así como el cambio del nivel de iluminación, gracias a la posibilidad de desplazar la fuente de luz a través de un brazo articulado, el cual también nos facilita el ángulo de iluminación según la posición donde se situó. (figura 2.33).

Gracias al diseño de la cabina, es posible evaluar el sparkle en cualquier geometría de medida y a diferentes distancias de observación. La cabina está compuesta además por una estructura negra mate a su alrededor que facilita que el observador tenga las menores interferencias posibles y se centre únicamente en las valoraciones visuales, como muestra las siguientes figuras.



**Figura 2.33:** Brazo articulado de la cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para el cambio de la fuente y el nivel de iluminación.



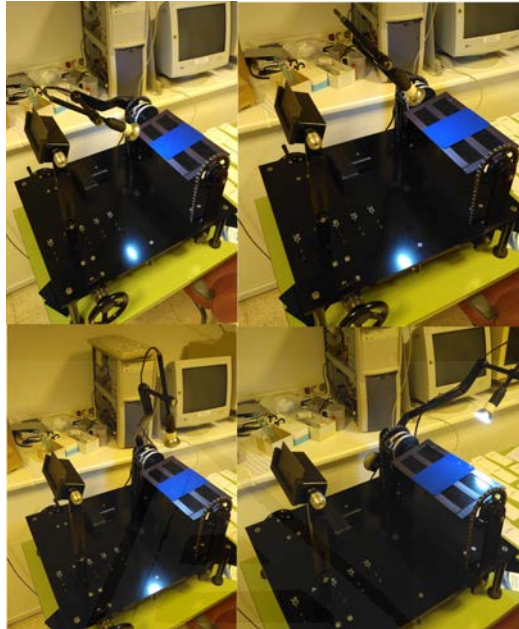
**Figura 2.34:** Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para evaluación de sparkle.



Recientemente, y no utilizada en esta tesis doctoral, el grupo de Visión y Color ha diseñado y fabricado una cabina novedosa para graininess (figura 2.35), y otra cabina de iluminación direccional para color y sparkle (figura 2.36).



**Figura 2.35:** Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para evaluación de color y graininess.



**Figura 2.36:** Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante para evaluación de color y sparkle.

#### 2.3.4 Medida del sparkle

Existe mucha literatura sobre la medida del sparkle que será introducida en esta sección. En el estudio científico de la apariencia visual de la textura para recubrimientos con efectos especiales, un aspecto en particular de la apariencia que siempre ha sido considerado es el sparkle, glint o glitter, como se ha citado previamente en los trabajos de McCamy [12, 13]. Las medidas instrumentales de macro apariencia como puede ser el color, están realizadas habitualmente por métodos macroscópicos usando un espectroradiómetro o un espectrofotómetro. Sin embargo, en general, estos instrumentos proporcionan la información de la integración espacial de una zona que es demasiado grande para resolver los detalles necesarios para el análisis de la textura. Por lo tanto, deben ser empleados métodos microscópicos, empleando una cámara CCD o un microespectrofotómetro para analizar la información de la textura. Para la textura en general, se han propuesto una gran variedad de métodos computacionales con el fin de describir la textura numéricamente basándose en la información obtenida a partir de una imagen digital bidimensional.

El estudio de Arai y Baba [100] investigó la textura para recubrimientos metalizados y perlados basándose en la captura de imágenes digitales bidimensionales usando una cámara para una geometría 45/0.

Posteriormente se plantearon numerosos modelos para el análisis de la textura mediante la captura de imágenes, como fueron los modelos de S. Ershov et al. [43], R. Durikovic et al. [44], E. Kirchner et al. [101], Z. Huang et al. [102] y los más recientes, el de F.J. Burgos [75] y el de A. Ferrero et al. [42], que a su vez dicho modelo ha sido estudiado en este trabajo, como más adelante se citará en diversos capítulos.

Partimos de que una imagen puede ser definida como una función bidimensional de intensidad de luz  $f(x, y)$ , donde  $x$  e  $y$  representan las coordenadas espaciales y el valor de  $f$  en un punto cualquiera  $(x, y)$  es proporcional al brillo (o nivel de gris) de la imagen en ese punto. Una imagen digital es una imagen  $f(x, y)$  que se ha discretizado tanto en las coordenadas espaciales como en el brillo; y puede considerarse como una matriz cuyos índices de fila y de columna identifican un punto de la imagen y el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de gris en ese punto. Los elementos de una distribución digital de este tipo se denominan elementos de la imagen o más comúnmente píxeles, abreviatura de su denominación inglesa “picture elements” [103].

Al existir una variedad de texturas, para su análisis no existe una única teoría, sino que en cada caso es preciso aplicar un método adecuado [6]. No existe una clasificación estándar de los métodos para análisis de textura, en esta revisión presentamos aquellas que más destacan: Métodos estructurales o sintácticos, y, métodos estadísticos.

#### *-Métodos estructurales*

En los métodos estructurales, consideran la textura como una composición de elementos primitivos (características) bien definidos distribuidos con algún patrón de repetición. En la literatura [6] estos métodos de análisis se conocen como descripción de textura sintáctica, debido a que utilizan gramáticas que definen ciertas reglas de las primitivas. Algunos de estos métodos encontrados son: gramáticas de cadenas de formas, gramáticas de grafos y agrupamiento de primitivas en texturas jerárquicas [104].

#### *-Métodos estadísticos*

En los métodos estadísticos, se distinguen los de primer y segundo orden [105]. Los estadísticos de primer orden involucran píxeles simples, por ejemplo en un histograma normalizado de los niveles de gris de una imagen, se pueden considerar datos como la media, varianza, suavidad, sesgo, correlación, energía o entropía para caracterizar una textura. Los estadísticos de segundo orden consideran propiedades de pares de píxeles, por ejemplo métodos de matrices de co-ocurrencia, los

cuales consideran características como energía, entropía, contraste, homogeneidad, y correlación [6].

### Medidas estadísticas de primer orden

Los estadísticos de primer orden involucran píxeles simples, y se definen sobre un histograma. El histograma es una herramienta asociada a la característica color de una imagen, permite obtener la distribución por aparición (frecuencia) de los niveles de color, es decir, el número de píxeles de cada color que presenta una imagen. Aunque se pierde información espacial, puede ser útil para identificación de características u objetos visuales en una imagen. Es ampliamente utilizado tanto para rasgos globales como locales. Asimismo, para almacenamiento y recuperación se puede considerar como un vector de frecuencias de dimensión  $k$ , en donde  $k$  es el número de colores que aparecen en una imagen, y cada elemento del vector es la frecuencia de aparición de un color  $(f_1, f_2, \dots, f_k)$  [106, 107].

Para caracterizar una textura en un histograma normalizado de los niveles de gris de una imagen, se toma en cuenta la distribución de los valores de intensidad espacial de una imagen.

A continuación se presentan las fórmulas matemáticas que definen algunos estadísticos de primer orden: la media de intensidad ( $m_1$ ), la varianza ( $\sigma_2$ ), el coeficiente de asimetría ( $\gamma_1$ ) y el coeficiente de kurtosis ( $\gamma_2$ ).

-**Momento** de orden  $k$ :  $m_k = E[i^k] = \sum_{i=0}^{255} i^k p(i)$

donde  $p(i)$  = número de pixels con intensidad  $i$  / número total de pixels

-**Nivel medio** de intensidad:  $m_1 = E(i)$

-**Momento central** de orden  $k$ :  $\mu_k = E[(i - m_1)^k] = \sum_{i=0}^{255} (i - m_1)^k p(i)$

-**Varianza** de la intensidad:  $\mu_2 = \text{Var}(i) = \sigma^2$

-Coeficientes de **asimetría**:  $\mu_3, \gamma_1 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$

-Coeficientes de **kurtosis**:  $\mu_4, \gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$

En la figura [figura 2.37](#) se observa un histograma de los que emplea el BYK-mac para el cálculo del efecto de textura sparkle, para posteriormente proporcionar los dos valores característicos de textura como son el sparkle intensidad y el sparkle área.

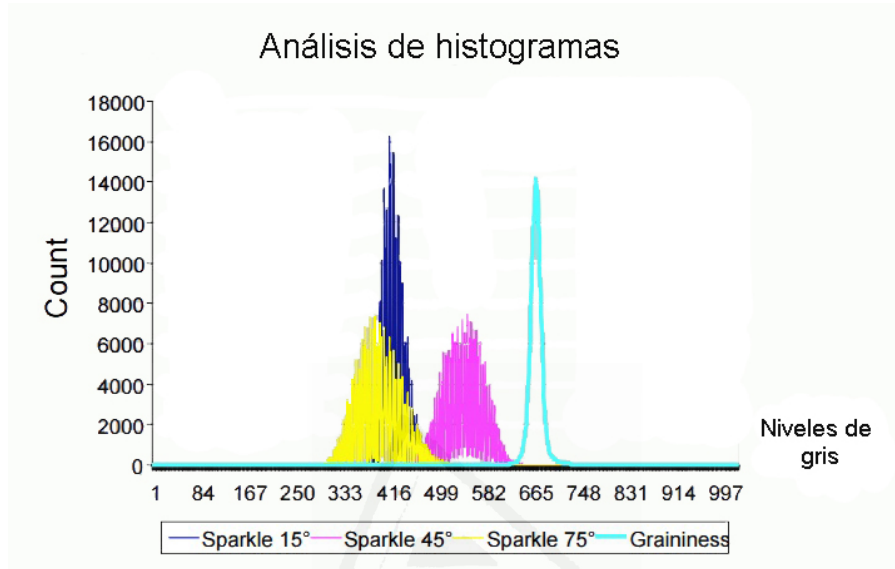


Figura 2.37: Histogramas para el cálculo de sparkle [102].

El histograma de una imagen digital con  $L$  niveles de gris en el rango  $[0, L-1]$  es una función discreta de la forma:

$$h(r_k) = \frac{n_k}{N} \quad (2.3.3)$$

donde:

$r_k$  es el  $k$ -ésimo nivel de gris

$n_k$  es el número de píxeles en la imagen con el nivel de gris  $r_k$

$N$  es el número total de píxeles de la imagen

$k = 0, 1, 2, \dots, L-1$  niveles de gris

Las intensidades o niveles de gris están representadas a lo largo del eje  $x$ , mientras que el número de ocurrencias para cada intensidad se representan en el eje  $y$ . Debe remarcarse que la frecuencia de aparición de cada nivel de gris en el histograma se muestra siempre en forma relativa (0-1) debido al hecho que el valor absoluto puede variar bastante en función del tamaño de la imagen, así como también puede variar el máximo valor a representar.

Este sería un ejemplo para el tipo de imágenes que toma el dispositivo BYK-mac, las cuales obvian la colorimetría de la muestra. Si se quisiera valorar la influencia del color del fondo de la muestra en la detección del sparkle, no se puede hablar de un único histograma que caracterice a la imagen sino de tres histogramas, uno para cada color (RGB, por ejemplo) o por geometría (figura 2.37). Si bien el uso del histograma y sus posteriores modificaciones son más aplicables a imágenes en escala de grises.

### Medidas estadísticas de segundo orden

Los estadísticos de segundo orden consideran propiedades de pares de píxeles, por ejemplo métodos de matrices de co-ocurrencia, el cual es una distribución de pares de niveles de gris, es decir son histogramas de dos dimensiones. A continuación, se presentan las fórmulas matemáticas que definen algunos estadísticos de segundo orden para caracterizar textura en una imagen: la energía (ASM), la entropía ( $H_{xy}$ ), el contraste (CON), y la homogeneidad (IDF). Asimismo, se explican el significado de los valores alto y bajo de cada característica.

**-Segundo Momento Angular - Energía:**  $ASM = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} p(i, j)^2$

donde  $i$  es el número de filas y  $j$  es el número de columnas, y  $p(i, j)$  es la probabilidad de co-ocurrencia de los valores de gris  $i$  y  $j$ , para una distancia dada.

**-Contraste:**  $CON = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} (i - j)^2 p(i, j)$

**-Entropía:**  $H_{x,y} = -\sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} p(i, j) \log_2 p(i, j)$

**- Momento Diferencial Inverso - Homogeneidad:**  $IDF = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} \frac{p(i, j)}{1 + (i - j)^2}$

Algunos de los modelos matemáticos para el cálculo del sparkle citados anteriormente hacen uso de estas medidas estadísticas para posteriormente obtener parámetros concretos de textura como pueden ser la densidad de pigmentos y el contraste [42].

Para ello, el modelo de Ferrero et al. se basa en las capturas de imágenes realizadas con el GEFÉ en blanco y negro (subsección 2.3.3) en las geometrías concretas que se quieran estudiar.

Se seleccionan las geometrías de medida que resultan de la combinación de los ángulos de iluminación con respecto a la normal de la superficie ( $\theta_i$ ) desde  $15^\circ$  hasta  $75^\circ$  (con pasos angulares de  $30^\circ$ ) y ángulos de observación ( $\theta_s$ ) desde  $0^\circ$  hasta  $70^\circ$  (con pasos angulares de  $10^\circ$ ), siempre en el plano de incidencia ( $\varphi_s - \varphi_i = 0^\circ$  y  $180^\circ$ , donde  $\varphi$  representa el ángulo de azimut) (figura 2.38).

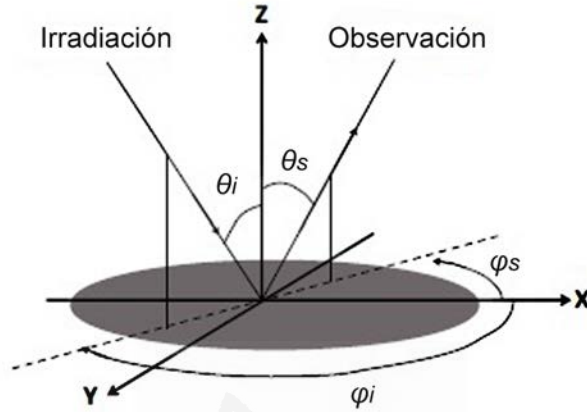


Figura 2.38: Sistema de coordenadas del GEFE.

Después de adquirir las imágenes de alto rango dinámico a las geometrías correspondientes, se procede a aplicar el modelo matemático desarrollado en el IO-CSIC para la medida del sparkle y de este modo obtener los descriptores necesarios, en este caso el contraste y la densidad de pigmentos. La obtención de estos descriptores se describe a continuación.

El contraste conjunto de puntos brillantes ( $C_{sp}$ ), es la mediana de los contrastes de puntos brillantes superiores a un contraste umbral ( $C_{th}=0.5$  para este trabajo, pero esto es función de la luminancia del fondo) dentro de un área de medición lo suficientemente grande como para considerar el valor estadísticamente significativo (más de 10 puntos brillantes). La densidad de puntos brillantes ( $d_{sp}$ ) es el número de puntos brillantes por área con valores de  $C_s$  mayores que el contraste umbral  $C_{th}$ .  $C_s$  es el contraste de un solo punto brillante de la imagen. De acuerdo con esta metodología, la variación de estas variables con la geometría se obtiene a partir de las medidas y se ajusta mediante las siguientes formulas:

$$C_{sp} = C_{sp,0} + C_{sp,1} \exp\left(\frac{\theta_{flake}^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (2.3.4)$$

$$d_{sp} = d_{sp,0} + d_{sp,1} \exp\left(\frac{\theta_{flake}^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (2.3.5)$$

En capítulos posteriores se definirán, analizarán y compararán estas variables obtenidas con este modelo matemático con respecto a las variables instrumentales proporcionadas por el BYK-mac.

Del mismo modo, y debido a la reciente publicación (Diciembre 2016) del modelo de medida de textura (sparkle y graininess) propuesto por Burgos [75] del CD6 de la Universidad Politécnica de Cataluña, no se ha podido incluir en esta tesis una comparación visual e instrumental para corroborar los datos aportados por dicho modelo, por lo que queda pendiente de realización en un futuro.

### 2.3.5 Métodos psicofísicos de medida usados en percepción visual

La psicofísica ha sido definida como “una parte de la psicología experimental que investiga las correlaciones y regularidades entre la intensidad y la calidad del estímulo, por una parte, y la percepción y los juicios acerca de ella, por otra; es decir, investiga la relación del organismo (especialmente el humano) con su medio físico concreto y los juicios que forma el hombre acerca de estas percepciones” [108].

Usualmente esta técnica se usa para medir el desempeño de un observador en una tarea visual. En esta sección se citaran diversos métodos que pueden emplearse para medir la percepción visual (detección, discriminación y estimación). Fundamentalmente, hay dos tipos de tareas a la hora de evaluar: el ajuste, donde los observadores tienen que ajustar el estímulo de acuerdo con la tarea que se pide, y los juicios, donde los observadores tienen que clasificar el estímulo percibido.

En general, las técnicas psicofísicas se han empleado para determinar el tipo de relación existente entre ciertos estímulos y diferentes tipos de respuestas y experiencias fenomenológicas, evaluadas mediante la identificación, reconocimiento o tiempo de reacción ante tales estímulos. Sin embargo, en un principio estas técnicas se emplearon principalmente para estudiar los procesos implicados en la detección de estímulos, es decir, determinar el valor mínimo de estímulo que es posible detectar y la discriminación entre varios estímulos, es decir, la capacidad para detectar un cambio mínimo entre dos valores distintos de estímulos.

Los métodos psicofísicos constituyen un tipo de investigación preciso, que permite cuantificar cuatro tipos básicos de comportamientos perceptivos: la detección (ser consciente de su presencia), el reconocimiento (familiaridad con el estímulo), la estimación (asignar valores numéricos a la intensidad de estimulación presentada) y la discriminación (diferenciar unas propiedades estimulares de otras). Las personas difieren unas de otras en cuanto a sensibilidad para detectar, estimar, discriminar, etc. Y para medir la sensibilidad (sensaciones subjetivas) la psicofísica propone el uso de escalas, cuyos límites (superior e inferior) vienen determinados por los um-



brales. En este trabajo se centrará principalmente sobre las técnicas de detección y estimación (escalado) que entre otras se describirán a continuación.

### ***Técnicas de detección***

Este grupo de técnicas psicofísicas está centrado en cómo los sistemas sensoriales responden a los cambios de la “energía” o la intensidad (intrínseca) del estímulo. La energía se puede encontrar en diferentes formas de estimulación, tales como: electromagnética (luz), mecánico (sonido, el tacto, el movimiento), químicos (sabor, olor) o térmicos (calor, frío). La idea principal de la teoría de detección se centra en la cantidad de cambio de energía, a partir de cero, que se necesita para que el cambio sea percibido por una persona [109, 110]. Entre los diferentes métodos existentes [111], nos centraremos en el método del ajuste el cual es uno de los más antiguos y fundamentales de la psicofísica.

#### ***-Método del ajuste***

El método del ajuste viene definido, por ejemplo, en la normativa ASTM E 1808-96 [112]. Ésta es una de las técnicas más fáciles. En este método, el observador controla la magnitud del estímulo y lo cambia hasta el punto que es detectable o diferente a una referencia dada o del punto de partida. El umbral se calcula en base al promedio de muchos ensayos por uno o más observadores.

Una de las desventajas de esta técnica es que el observador tiene el control sobre los estímulos y se pueden sesgar los resultados debido a la variabilidad del observador. Este método se utiliza a veces en estudios de percepción de color/textura como punto de partida para diseñar experimentos más complejos [111].

### ***Técnicas de discriminación***

La discriminación visual es una habilidad viso-perceptiva que nos permite detectar, diferenciar y seleccionar estímulos visuales, basándonos en los atributos que los caracterizan. Además, la habilidad de discriminación visual contribuye a la segmentación de la figura-fondo, las relaciones viso-espaciales, la memoria y la lógica visual. De esta manera, la persona puede manipular objetos y estímulos visuales de su entorno natural.

#### ***-Elección forzada***

En cada ensayo se presentan dos estímulos (simultánea o secuencialmente), uno de los cuales es el estímulo target (diana) y el observador debe responder, por ejemplo, en qué lado aparece el target o si apareció en primer o en segundo lugar.

*-Elección forzada entre dos alternativas (2AFC)*

En cada ensayo se presentan dos estímulos o por parejas (simultánea o secuencialmente), uno de los cuales es el estímulo estándar (Std) y el otro el estímulo de comparación (Cmp). El observador debe establecer alguna comparación entre ellos y responder, por ejemplo, si  $Cmp > Std$  (Cmp es mayor en intensidad que el Std) o  $Cmp < Std$  (Cmp es menor en intensidad que el Std) [4].

*Técnicas de estimación (escalado)*

El método de estimación de magnitud también viene descrito en la normativa ASTM E 1808-96 [112]. En este método se presentan estímulos de diferente intensidad a los observadores y éstos deben realizar estimaciones numéricas sobre la magnitud de la sensación que produce cada uno de ellos. El procedimiento adopta dos modalidades: en una de ellas se presenta un estímulo de intensidad fija y el experimentador comunica que la sensación producida por dicho estímulo tiene un determinado valor numérico. En los siguientes ensayos, se presentan una serie de estímulos diferentes al estímulo de referencia y la tarea del observador consiste en asignar números a la sensación producida por cada uno de los estímulos en relación con el valor de sensación del estímulo de referencia. La otra modalidad consiste en presentar estímulos aleatoriamente y el observador emite el juicio sobre la magnitud de la sensación asignando valores numéricos, en este caso no se le presenta al observador ningún valor como referencia.

Los resultados suelen ser muy parecidos en una u otra modalidad. Se suelen realizar dos o tres sesiones con cada observador. Los resultados de todos los observadores se combinan para determinar la escala utilizando como promedios la mediana o la media geométrica. No es aconsejable utilizar la media aritmética ya que este promedio es muy sensible a estimaciones engañosas.

### **2.3.6 Técnicas estadísticas multivariante**

Para la evaluación de los resultados experimentales están disponibles diversas medidas y métodos estadísticos [113, 114]. En principio, las técnicas estadísticas univariantes se distinguen de las técnicas estadísticas multivariantes.

En las técnicas estadísticas univariantes, se considera una única variable estadística. Por lo tanto, las relaciones con las otras variables se descuidan. En contraste con esto, en las técnicas estadísticas multivariantes se considera más de una variable. En este caso se consideran las posibles relaciones entre las variables y sus variaciones conjuntas. A continuación se van a citar algunas de las técnicas estadísticas multivariante más importantes.

### ***Escalado multidimensional***

El escalado multidimensional es, en lo fundamental, un procedimiento para el análisis de datos de proximidad. La proximidad entre dos estímulos puede concebirse de dos maneras distintas:

-como la semejanza entre ambos estímulos.

-como la disparidad entre ambos estímulos.

Si se concibe de la primera de las maneras, entonces un valor numérico alto indicaría que los estímulos están próximos, mientras que si se concibe de la segunda manera, un valor numérico alto indicaría que los estímulos están alejados, distantes.

Más concretamente, el escalado multidimensional puede definirse como un procedimiento que toma como entrada un conjunto de desigualdades y ofrece como salida una configuración de puntos, de forma que las distancias entre puntos en el espacio representen lo mejor posible las desigualdades entre estímulos, en el mundo empírico. En el escalado multidimensional se establece, pues, una analogía fundamental entre el concepto psicológico de desigualdad y el concepto geométrico de distancia. En la mayoría de los modelos de escalado multidimensional, las distancias en que se convierten las proximidades son euclidianas, pero también pueden estimarse otros tipos de distancia. Desde el punto de vista de los modelos, las desigualdades se conciben como distancias que contienen error [115].

El criterio principal para la definición de los modelos de escalado multidimensional es la relación que se establece entre desemejanzas y distancias. Otros criterios, más secundarios, son la forma de los datos de entrada y la forma de la salida. Un claro ejemplo de este procedimiento de análisis aplicado sobre el efecto de textura sparkle fue aplicado por O'Neill et al. [116].

### ***Análisis componentes principales***

El análisis de componentes principales (PCA) trata de explicar la estructura de las variancias y covariancias de un conjunto de variables  $X_i$  mediante unas cuantas combinaciones lineales de ellas, llamadas componentes principales. Estos componentes principales no están relacionados entre sí, y cada uno maximiza su variancia. El PCA aspira a “reducir” el número de dimensiones o simplificar los datos y facilitar su análisis e interpretación.

La “reducción” o simplificación es posible porque frecuentemente mucha de la variabilidad de los datos se puede explicar por un número pequeño  $k$  de componentes principales, que es mucho menos que  $p$ , el número inicial de variables  $X_i$  (o dimensiones). De esta manera el conjunto original se reduciría de  $n$  mediciones sobre  $p$

variables a  $n$  mediciones sobre  $k$  componentes. El investigador puede ahora concentrarse sobre los  $k$  componentes, y descubrir dimensiones o rasgos más interesantes o informativos para fines descriptivos o de interpretación, que los que hubiera podido descubrir analizando directamente los datos de las variables originales.

### ***Suma residual estandarizada de cuadrados o STRESS***

En trabajos previos [117, 118], el término suma residual estandarizada de cuadrados o índice de STRESS fue propuesto como una medida adecuada del rendimiento de una fórmula de diferencia de color con respecto a un conjunto de datos visuales. Este índice se puede emplear también para determinar el significado estadístico de la diferencia entre el rendimiento de dos fórmulas de color con respecto a los mismos datos visuales, o, como veremos en esta tesis, con otros atributos visuales de apariencia.

El índice de STRESS puede ser empleado para determinar la variabilidad entre observadores, que es un factor muy influyente bien conocido en la mayoría de experimentos psicofísicos [119, 120]. En estudios experimentales, se describen dos tipos de variabilidad entre observadores: la precisión del observador o variabilidad inter-observador (la desviación entre los resultados medios de cada observador con respecto a la media de los resultados de todos los observadores), y variabilidad intra-observador o repetibilidad del observador (la desviación entre los resultados dados por un observador en las diferentes repeticiones realizadas para el mismo experimento).

$$STRESS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta E_i - F_1 * \Delta V_i)^2}{\sum_{i=1}^N (F_1^2 * \Delta V_i^2)}} \quad (2.3.6)$$

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta E^2}{\sum_{i=1}^N (\Delta E_i * \Delta V_i)} \quad (2.3.7)$$

donde:

$i = 1, \dots, N$  es un set de parejas de muestras.

$\Delta V_i$  es la diferencia visual percibida entre dos muestras bajo unas condiciones de iluminación y observación fijas.

$\Delta E_i$  es la diferencia calculada.

$F$  es un factor de escala.

### 2.3.7 Diseño de experimentos

Las personas realizan experimentos frecuentemente; trabajadores de una ciudad buscan el camino más corto y/o rápido para llegar a trabajar, en cada casa o restaurante se experimenta con las recetas de cocina para mejorar el sabor de los platos servidos o se analizan distintas alternativas para mejorar el estado físico. En la industria, la experimentación suele utilizarse básicamente en dos áreas: el diseño y la optimización de procesos y productos. La experimentación proporciona en estos casos la descripción aproximada de cómo se comportan los procesos y/o productos, restringida a una región de interés. La mejora de los procesos es generalmente el objetivo hasta que este alcanza el nivel deseado [121].

Pero, la mayoría de los problemas industriales están condicionados por el tiempo y el presupuesto, lo que supone una limitación importante a la hora de experimentar. Por eso todas las empresas deberían intentar responder antes de realizar sus experimentos la siguiente pregunta, ¿Cómo puedo obtener de los experimentos la mayor información posible y de la manera más eficiente?

La bibliografía clasifica las estrategias utilizadas para llevar a cabo las experimentaciones constantes en las empresas en tres categorías [122]: mejor acierto (Best Guess), un factor por vez (OFAT), y siguiendo una metodología estadística (DoE). La estrategia de “mejor acierto” consiste en, utilizando el conocimiento previo sobre el proceso en cuestión, modificar las variables involucradas y conducir las pruebas bajo condiciones en las cuales se esperan los mejores resultados. Dicha estrategia carece de rigor científico ya que se basa únicamente en la intuición y la experiencia. La estrategia de “un factor por vez” consiste en ir modificando cada vez un solo factor (variable), dejando constantes el resto de factores, y distinguir los efectos que tiene sobre la respuesta cada factor por separado. Esta estrategia, a pesar de ser la más utilizada en las empresas y seguir el “método científico”, es ineficiente para hallar las mejores condiciones del proceso. Además, no detectan sistemáticamente las posibles relaciones (interacciones) lineales o no lineales que pueden existir entre varios factores [123].

Es por ello necesario, y más eficiente en términos de los resultados obtenidos y número de experimentos, utilizar como estrategia para la experimentación una metodología estadística preestablecida para poder planificar y analizar correctamente los experimentos. Como afirma Deming [124] (considerado uno de los padres de la Calidad Total), “no hay conocimiento que pueda contribuir tanto a mejorar la calidad, la productividad y la competitividad como el de los métodos estadísticos”.

La metodología estadística por excelencia para optimizar la experimentación se conoce como Diseño de Experimentos, la cual se abrevia como DoE proveniente de su significado en inglés: “Design of Experiments”. Se define simplemente como un método para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación [125]. Más precisamente, puede ser definido como realizar un conjunto de pruebas

(ensayos) en las cuales se realizan cambios voluntarios a los parámetros de control de un proceso o sistema, para observar e identificar las razones de los cambios en la variable de salida o respuesta del proceso [122, 126].

En el diseño de experimentos aquellas variables que podemos controlar se denominan “factores” y los valores que se pueden modificar se los conoce como “niveles”. Aquello que se pretende mejorar, estudiar y optimizar se le denominara respuesta u objetivo de optimización, la cual se define cuando se tiene claro el problema que se pretende abordar en la experimentación, en nuestro caso, la influencia de las diferentes variables en la detección del efecto de textura sparkle. En todos los diseños experimentales se pueden estudiar los efectos de los factores de forma individual, y en función del diseño escogido se podrán analizar además los efectos de las interacciones de distinto nivel entre los diferentes factores. Por tanto el objetivo principal del diseño de experimentos es el estudio de la influencia de diferentes factores sobre la medida de una respuesta.

Los pasos para plantear cualquier clase de diseño de experimentos son:

1. Definir la respuesta o respuestas a optimizar, e indicar si el valor óptimo es concreto, o si se pretende maximizar o minimizar, o incluso un valor 0 (como una igualación visual).
2. Definir los factores, y sus niveles, que se van a incluir.
3. Seleccionar el tipo de diseño que se ajuste más a las posibilidades de la experimentación. Calcular el número de muestras (ensayos) para cada diseño completo. Siempre es conveniente aleatorizar los experimentos para evitar el sesgo de los resultados, es decir, minimizar los efectos de las variables que no se pueden controlar.
4. Realizar los experimentos, medir y recoger las respuestas correspondientes.
5. Análisis estadístico del diseño.

### ***Diseño factorial***

Existen numerosos tipos de diseños de experimentos, pero en este trabajo únicamente nos interesa el diseño factorial para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta.

El diseño factorial es aquel en el que se tienen dos o más factores, los cuales tienen dos o más niveles, y se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. Estos factores se estudian porque en principio se piensa (como hipótesis) que tienen un efecto conjunto de éstos sobre una respuesta. El efecto de un factor se define como

el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia, éste se conoce como efecto principal porque se refiere a los factores de interés primordial del experimento.

Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños de gran valor práctico.

Estos diseños se utilizan en experimentos en los que intervienen  $k$  factores, y cada uno de ellos tiene 2 niveles (bajo y alto), los cuales pueden ser cuantitativos (temperatura, presión, tiempo, etc.) o cualitativos (máquinas, operadores, proveedores, etc.). Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen  $2^k$  observaciones y se conoce como diseño factorial  $2^k$ . Este diseño es particularmente útil en las primeras fases del trabajo experimental, cuando hay muchos factores por investigar. Con este diseño se hace menor número de experimentos que con las que pueden estudiarse  $k$  factores en un diseño factorial completo, ya que cada factor tiene sólo dos niveles. Debe suponerse que la respuesta es aproximadamente lineal en el intervalo de los niveles elegidos de los factores.

*-Definiciones y diseño  $2^2$*

Es el tipo más sencillo de diseño experimental  $2^k$ . En este diseño se tienen dos factores A y B, cada uno con dos niveles. Lo usual es considerar estos niveles como los niveles bajo y alto del factor. El diseño  $2^2$  se suele representar por un cuadrado como el que se ilustra en la [figura 2.39](#).

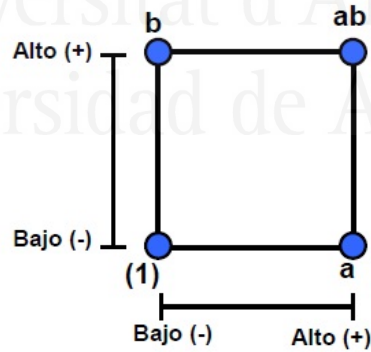


Figura 2.39: Representación geométrica del diseño  $2^2$ .

A esta representación se le conoce como representación geométrica del diseño  $2^2$ . En esta representación cada vértice del cuadrado corresponde a una combinación diferente de tratamientos (niveles) en el diseño factorial.

Como ejemplo, si existen dos factores A y B con a niveles para A y b niveles para B, entonces cada experimento contiene ab combinaciones de los tratamientos. Cuando los factores A y B, están cada uno a dos niveles A<->, A<+>, B<->, B<+>, el factorial se indicaría como un  $2^2$  y constaría de cuatro posibles combinaciones de tratamientos, representadas como:

**Tabla 2.2:** Tabla de signos para el diseño  $2^2$

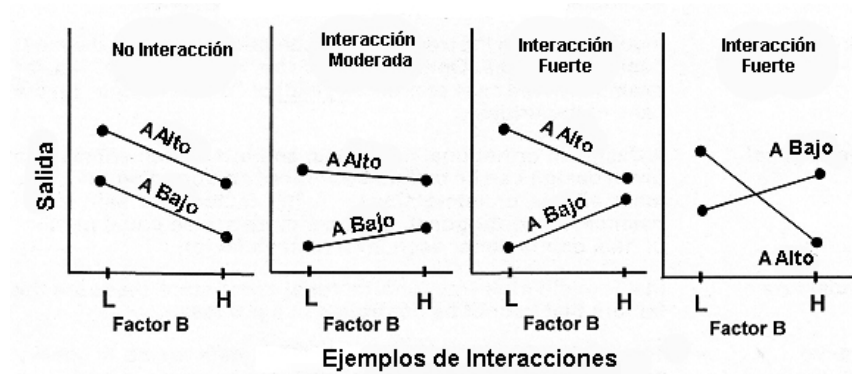
A	B	AB	Notación
-	-	+	-1
+	-	-	a
-	+	+	b
+	+	-	ab

Los efectos de interés en el diseño  $2^2$  son los efectos principales A y B, y la interacción entre los dos factores AB. El análisis factorial implica análisis de los efectos de los factores a fin de constatar si el efecto de un factor es independiente del otro factor o si por el contrario existe interacción. Para comprender mejor esto, se debe aclarar cómo medir el efecto en los experimentos factoriales. Esto es, conocer lo siguiente:

*Efecto principal:* Es igual a la respuesta promedio observada en el nivel alto de un factor, menos la respuesta promedio en el nivel bajo de éste.

*Efecto de interacción:* Cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que está otro de los factores, se dice que estos factores interactúan significativamente. Se pueden ilustrar gráficamente estos efectos. Así vemos que en la [figura 2.40](#) izquierda no existe interacción, pero en la última gráfica de la misma figura sí hay interacción entre los factores A y B, como se muestra a continuación.





**Figura 2.40:** Efecto de no interacción e interacción entre factores. (L: low; bajo. H: high; alto)

En el análisis de los resultados de un diseño factorial  $2^2$ , como el mostrado anteriormente, es necesario estimar los efectos principales y las interacciones. De no detectarse interacción, los efectos principales serán entonces las mejores estimaciones de los efectos y sobre los cuales se basarían las interpretaciones de la investigación. En caso contrario es necesario examinar e interpretar la naturaleza de la interacción. Cuando una interacción es grande, los efectos principales correspondientes tienen muy poco significado práctico. El conocimiento de la interacción AB es generalmente más útil que el conocimiento del efecto principal de A, puesto que el efecto del factor A depende de los niveles del factor B, o viceversa.

Muchas veces se utiliza el método de analizar los factores individualmente, cuando lo más apropiado es hacerlo simultáneamente, ya que si estudiamos los factores por separado nos dará un resultado que puede no corresponder a situaciones reales del experimento, con lo cual se podría generar confusión y tal vez gastos innecesarios.

*-Diseño factorial con tres factores*

En los diseños factoriales  $2^3$  se tienen tres factores de interés A, B y C a dos niveles cada uno. Los ocho tratamientos del diseño  $2^3$  se pueden representar geoméricamente como un cubo similar al que se muestra en la figura siguiente:

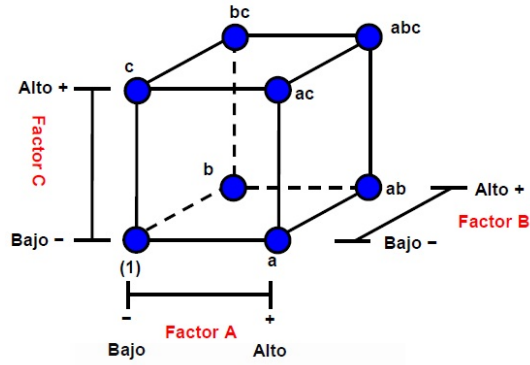


Figura 2.41: Representación geométrica del diseño  $2^3$ .

Un experimento con tres factores tendrá ocho tratamientos, los cuales se escriben en un orden fijo llamado orden estándar. Sean tres factores A, B y C, cada uno con dos niveles llamados bajo y alto. De acuerdo con la nomenclatura anterior para los diseños  $2^2$ , el orden estándar es como sigue: (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc. Ahora bien, los efectos simples de un factor se determinan por diferencias entre combinaciones con el nivel y sin el nivel del factor. Por ejemplo, el efecto principal de A es el promedio de los cuatro efectos simples de dicho factor:

$$A = (1/4)[(abc - bc) + (ab - b) + (ac - c) + (a - (1))] \quad (2.3.8)$$

En este experimento se tienen tres interacciones de primer orden (AB, AC y BC) y una interacción de segundo orden (ABC). Esta última es más compleja de interpretar que las de primer orden, pero en la práctica casi siempre es pequeña, y por eso no se tiene en cuenta para un análisis simultáneo de los factores. En experimentos con un mayor número de factores, las interacciones de segundo orden y de orden superior se confunden con el error experimental y no se analizan independientemente.

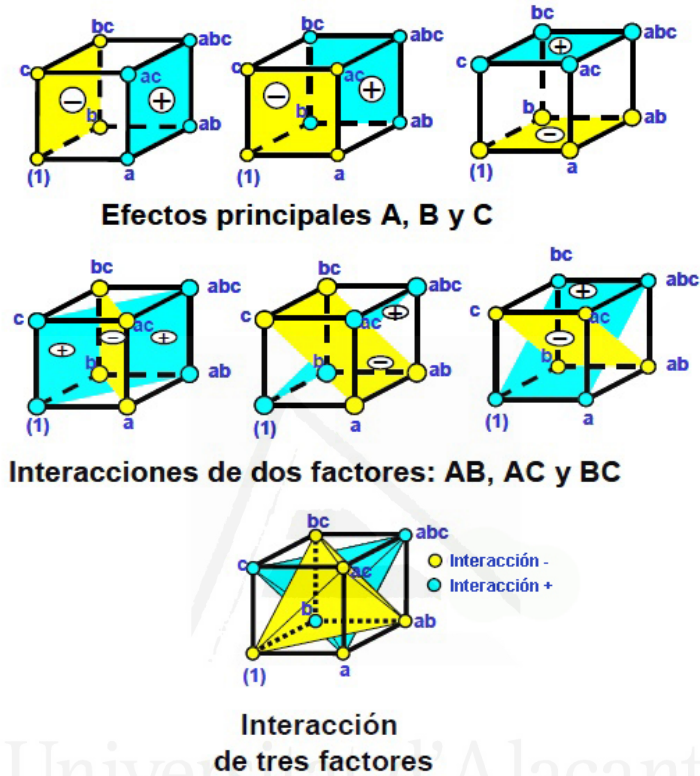


Figura 2.42: Cálculo de los efectos principales y de interacción en un diseño  $2^3$  [127].

### Aplicaciones del DoE

Todos los tipos de industrias se pueden beneficiar del DoE, incluso aquellas de servicios [128]. La aplicación del Diseño de Experimentos puede presentar máximos beneficios cuando éste se aplica a la investigación y al diseño de nuevos productos [128]. Montgomery [129] comentaba al respecto: “La mayoría de las industrias estuvieron trabajando durante más de 75 años para mejorar la eficiencia de los procesos. Para aquellos casos en los que consiguieron una mejora importante en la eficiencia de los procesos puede que no haya mucho lugar para mejoras importantes. Pero en el diseño de productos, las oportunidades de mejora son casi ilimitadas, debido a que la mayoría de los costes de un producto (coste de producción, garantías, reparaciones, re-trabajos, servicio post-venta, etc.) vienen predeterminados por la etapa de diseño”.

El DoE se puede utilizar en las industrias [126, 128, 130-132], entre otros, para :

1. Mejorar los procesos, ya sea mejorando su eficiencia, su confiabilidad o su rendimiento.
2. Asistir en la solución de problemas.
3. Aprender de los procesos y sus fallos.
4. Establecer relaciones de causa-efecto entre las “entradas” (input) de un proceso y sus “salidas” (output).
5. Identificar los factores que tienen el mayor y el menor impacto en los procesos y/o productos.
6. Lograr una producción de productos que cumplan con las especificaciones.
7. Establecer una región (o ventana) del proceso donde unos factores pueden operar, averiguando la sensibilidad al cambio de algunos factores en la respuesta.
8. Fijar especificaciones y tolerancias lógicas para los productos y procesos.
9. Obtener una ecuación polinómica (u otra expresión matemática) que modele el comportamiento de la respuesta de un proceso en una región de variación de los factores.
10. Verificar si la solución adoptada para mejorar un proceso, realmente obtiene los resultados esperados.

Ademas no sólo las áreas de manufactura o I+D pueden beneficiarse de esta técnica, sino que recientemente surgieron aplicaciones de la técnica en el marketing [133], en las finanzas [134], o incluso en pinturas [126], entre otras áreas de la empresa.



## Capítulo 3

# Objetivos

Como ya se ha mencionado, en los últimos años ha aumentado considerablemente el interés por los pigmentos de efecto goniocromático debido a sus atractivas características visuales (cambio de color al cambiar el ángulo de iluminación y observación, y efectos de textura). Sin embargo, existen pocos estudios que aborden las cuestiones antes ([sección 1.4](#)) planteadas.

Concretamente, en esta tesis doctoral se plantean diferentes aspectos relacionados con el efecto de textura sparkle, y, en particular, sobre su detección y estimación.

### 3.1 Objetivo principal

El objetivo de esta tesis doctoral es dar respuesta a las preguntas relacionadas con los efectos de textura, cuya finalidad principal es desarrollar y consolidar una metodología fiable y útil a nivel industrial de evaluación visual del efecto de textura denominado sparkle.

Ante la falta de investigaciones relacionadas con la apariencia visual del efecto de textura sparkle, y debido al interés por parte de las industrias en ser capaces de caracterizar correctamente el sparkle, se planteó un trabajo basado en analizar la influencia de las distintas variables multi-escala implicadas en la detección y estimación del sparkle.

Debido al gran número de variables implicadas (estructurales, ambientales, colorimétricas, etc), es necesario disponer de un gran volumen de muestras, con características muy concretas, que a su vez derivaría en un excesivo número de evaluaciones visuales a realizar en los experimentos psicofísicos. Se aplicará, como estrategia de solución, el diseño de experimentos para optimizar al máximo todas

las variables que influyen en la detección del sparkle, y de este modo poder analizar cuáles de ellas influyen con mayor relevancia en la percepción de este efecto de textura.

### 3.2 Objetivos específicos

1. Comprobar el escalado instrumental del sparkle mediante estimación de magnitud. Para ello se evaluará el grado de sparkle en diferentes geometrías de medida, para posteriormente mediante la realización de evaluaciones visuales poder correlacionar las medidas instrumentales con un juicio visual.
2. Corroborar si el modelo reciente de sparkle propuesto por el Instituto de Óptica del CSIC (IO-CSIC) se correlaciona con las medidas instrumentales proporcionadas por el BYK-mac, y con las medidas visuales proporcionadas por los diversos observadores en los experimentos psicofísicos realizados en cada uno de los experimentos propuestos a lo largo de la tesis.
3. Determinar la distancia visual de detección del sparkle y establecer una relación con el tamaño de partícula de los pigmentos de efecto y/o su forma.
4. Determinar la influencia de la densidad/concentración de pigmentos de efecto en la detección del sparkle.
5. Determinar la influencia del espectro de la fuente de luz y su rendimiento colorimétrico, así como el nivel de iluminación en la percepción del sparkle.

Se decidió seguir el orden de capítulos arriba descrito por las siguientes razones, en primer lugar, y como ya se ha citado anteriormente, al no conocerse nada acerca del algoritmo de medida implementado por el dispositivo BYK-mac, era de vital importancia conocer la fiabilidad de las medidas del dispositivo comercial y la correlación existente con lo que el observador detecta. Seguidamente, y en relación con la misma temática, se consideró realizar la comparación visual e instrumental con el novedoso algoritmo de medida del sparkle planteado por el Instituto de Óptica del CSIC.

Una vez corroborado o no la existencia de correlación visual e instrumental, se procedió a estudiar como afectan las diversas variables estructurales implicadas en el proceso de detección del sparkle.

Para concluir, y no menos importante, analizar la influencia de la iluminación, ya sea la variación de la fuente de iluminación, el nivel de iluminación o la geometría de iluminación.

## Capítulo 4

# Determinación del escalado del sparkle mediante estimación de magnitud

### 4.1 Introducción

Resulta de vital importancia en la industria el poder corroborar lo que el observador predice junto con lo que el dispositivo estima, ya que el control de calidad es uno de los aspectos más importantes en la competitividad industrial. El alto coste de la inspección visual humana ha hecho promover y desarrollar sistemas capaces de resolver las tareas de forma automática. Una de las mayores dificultades dentro de la inspección es la supervisión de la apariencia visual. Ésta es encargada, en la mayoría de las ocasiones, a inspectores humanos. El sistema de visión humano es adecuado para su funcionamiento en un mundo de variedad y cambio, mientras que el proceso de inspección visual industrial, requiere de la observación de una escena repetida de forma que se puedan detectar diferencias o anomalías. La exactitud del sistema humano de visión empeora con el trabajo repetitivo y monótono. El resultado es una inspección lenta, cara y errática. La inspección visual automatizada es, obviamente, la alternativa a los inspectores humanos, liberándolos de tan fatigante trabajo.

En este capítulo se va a estudiar la correlación visual e instrumental del efecto de textura sparkle para un amplio grupo de muestras con pigmentos gonioaparentes de diferentes proveedores, algunos de estos pigmentos son muy característicos y comunes en la industria, y otros pigmentos son más recientes y novedosos [135].



El objetivo principal es estudiar si los valores instrumentales proporcionados por el BYK-mac se correlacionan con los datos visuales aportados por un amplio grupo de observadores, que obviamente no participaron en su diseño y calibración [136].

Para el desarrollo experimental se ha empleado el método psicofísico de estimación de magnitud, como se ha citado en apartados anteriores (subsección 2.3.5). A cada observador se le pidió realizar una valoración subjetiva sobre la magnitud visual de la textura de cada una de las muestras. La instrucción concreta fue la de en base a la intensidad y al área de los puntos brillantes realizar una ponderación sobre la textura que se percibía. El atributo a valorar en este caso fue el sparkle general. Los observadores debían dar valores numéricos según la estimación de sparkle que ellos detectaban en función de cada una de las muestras, y sin conocer por anticipado la relación instrumental del BYK-mac (Ecuación 2.1.1).

Esta técnica psicofísica fue empleada por primera vez por Stevens et al. [137] y ha ganado recientemente en aceptación general [111]. Es una técnica de escalado subjetiva por la cual se escalan las magnitudes de los atributos percibidos, gracias a la cual, se ha podido comprobar/validar el escalado instrumental del BYK-mac que hasta la fecha nadie lo había hecho, pese a ser el único dispositivo comercial capaz de proporcionar medidas de textura. Y por otra parte, es necesario conocer que el dispositivo comercial realiza unas medidas fiables, así de este modo, a la hora de desarrollar los experimentos visuales de detección tener más confianza.

## 4.2 Materiales y Métodos

Un total de 91 muestras con pigmentos metálicos y de interferencia de diferentes proveedores (BASF, ECKART, MERCK) fueron empleadas para este experimento. Para la mayoría de las muestras no se conocía la formulación exacta de la composición de la pintura (tipo y forma del pigmento, concentración, etc). Para este experimento no es relevante conocer la formulación de las muestras, ya que este capítulo está enfocado únicamente en estudiar la correlación visual e instrumental. Obviamente se posee cierta información parcial sobre la composición de las muestras como son los tamaños medios de los pigmentos ( $D_{50}$ ), que oscilan entre las  $9 \mu\text{m}$  y las  $92.5 \mu\text{m}$  (tabla 4.1). De este modo se cubre todo el rango posible de tamaños de pigmentos y no se estudian únicamente los tamaños característicos empleados en la industria. Por otro lado, la influencia del color/claridad del fondo de la muestra en la detección del sparkle no se ha incluido en este capítulo. Los datos instrumentales proporcionados por el BYK-mac se muestran en la figura 4.1.

Tabla 4.1: Conjunto de muestras goniocromáticas

	Número de Muestras	Tipo de Pigmento	Tamaño de Pigmento	Color Muestra
Set 1 (BASF)	29	Interferencia	Sin Datos	Variable
Set 2 (Merck)	30	Interferencia	9-25.5 $\mu\text{m}$	Variable
Set 3 (Merck)	10	Metálicos	9-35 $\mu\text{m}$	Gris
Set 4 (Eckart)	22	Mica Sintética	25-92.5 $\mu\text{m}$	Negro

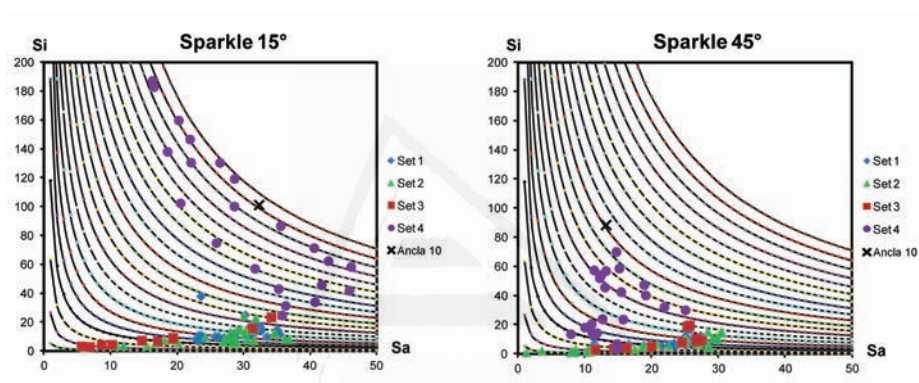


Figura 4.1: Distribución de los cuatro conjuntos de muestras en las gráficas características de representación del sparkle.

Para realizar el experimento psicofísico se empleó una cabina de luz direccional, en este caso en concreto, se utilizó la cabina comercial byko-spectra (subsección 2.3.3), la cual es del mismo fabricante que el BYK-mac. Se emplearon dos geometrías de medida, la  $15^\circ\text{as}15^\circ$  y  $45^\circ\text{as}45^\circ$  siguiendo la nomenclatura ASTM, o  $15^\circ\text{x}:0^\circ$  y  $45^\circ\text{x}:0^\circ$  siguiendo la nomenclatura CIE [138], y dos niveles de iluminación (800 y 2400 lux) [139]. La razón de usar estas dos geometrías de medida es para ver la influencia de la orientación de los pigmentos sobre la detección del sparkle, porque se tiene la hipótesis de que los pigmentos que se observan a  $15^\circ\text{as}15^\circ$  y  $45^\circ\text{as}45^\circ$  corresponden a aquellos flakes/pigmentos que están bien orientados con respecto a la superficie (figura 4.2). Sin embargo, los pigmentos que se observan en la geometría de  $75^\circ\text{as}75^\circ$  son aquellos que no están paralelos a la superficie del recubrimiento (figura 4.3) [140].

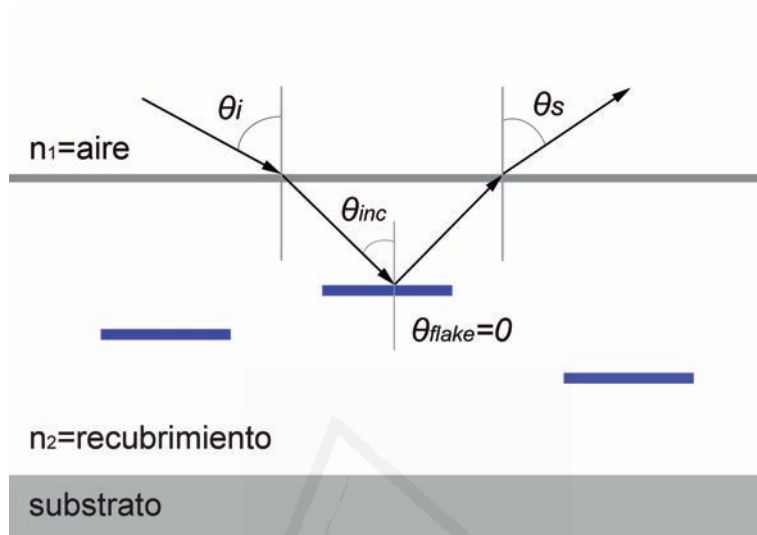


Figura 4.2: Orientación del pigmento paralela a la superficie del recubrimiento.

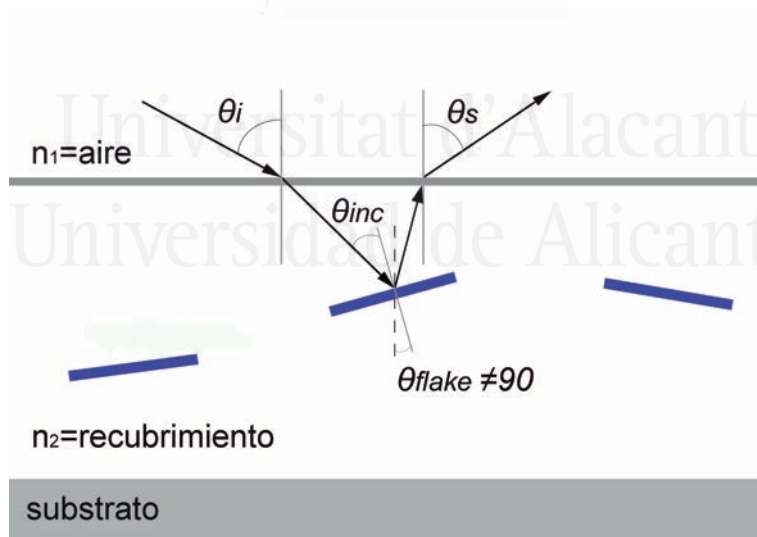


Figura 4.3: Orientación del pigmento no paralela a la superficie del recubrimiento.

Los dos niveles de iluminación fueron empleados para ver cómo afectan sobre la estimación del sparkle. Hay que mencionar que se ha seleccionado la cabina de iluminación byko-spectra porque en ella es posible realizar medidas de sparkle en las mismas geometrías de medida que con el BYK-mac y variar el nivel de iluminación [139], calibrado por el grupo de Visión y Color en 2012.

Once observadores (7 hombres y 4 mujeres), con edades comprendidas entre los 25 y los 50 años, con una visión normal tomaron parte en este experimento. La mayoría de los observadores eran estudiantes o miembros del personal de la Universidad de Alicante, y, gran parte de ellos no tenía experiencia previa de trabajo en la industria del color. Cada observador realizó 3 repeticiones por cada muestra, para cada geometría y para cada nivel de iluminación, realizando un total de 1.092 valoraciones visuales por cada observador. Por tanto, para este experimento se realizaron un total de 12.012 valoraciones visuales.

Las muestras fueron presentadas de forma aleatoria a los observadores en sesiones de 30 minutos, para de este modo conseguir que el observador mantuviera la concentración lo más constante posible y así evitar cambios bruscos en las valoraciones debidos a la fatiga. Antes de cada sesión, los observadores se adaptaban a la oscuridad durante un periodo de 5 minutos, además de que se les realizaba una explicación clara y concisa sobre el concepto de sparkle [7].

Se empleó el método convencional de estimación de magnitud [115, 141], como se ha descrito anteriormente, en el que al observador se le pide que asigne números en proporción a la magnitud del estímulo (anclas). Este método se ha seleccionado debido a que hay muy pocos estudios psicofísicos relacionados con el efecto de textura sparkle, y, también porque es más sencillo de realizar para los observadores, aunque no tengan experiencia previa en experimentos de apariencia visual de materiales. Los observadores deciden libremente la valoración final sobre el grado de sparkle ( $S_G$ ) sin saber nada acerca de los atributos parciales del sparkle (Ecuación 2.1.1), como son el sparkle intensidad y sparkle área (subsección 2.1.3).

$$S_G = f(S_i, S_a) \quad (4.2.1)$$

Se utilizó una máscara situada en el centro de la cabina de iluminación, la cual estaba compuesta por dos anclas con un sparkle mínimo (0 = gris oscuro solido) y máximo (10 = gris oscuro con alto grado de sparkle), dependiendo de los valores instrumentales obtenidos por el BYK-mac. El área de visualización de la muestra a evaluar es de 6x6 cm (figura 4.4). Basándose en las dos anclas, los observadores dieron sus valoraciones subjetivas entre 0 y 10, aunque tenían la libertad de dar una valoración superior a 10 si consideraban oportuno que la muestra que valoraban tenía más sparkle que la muestra situada en el ancla con un sparkle relativo máximo. Los valores instrumentales obtenidos para las dos anclas con sparkle re-

lativo máximo en función de las dos geometrías de medida son:  $SG_{15} = 19.22$  y  $SG_{45} = 11.14$  (figura 4.1).



**Figura 4.4:** Observadora y muestras de referencia (anclas) junto con la mascara empleada en el experimento psicofísico de estimación de magnitud.

Se aplicó el índice de STRESS (subsección 2.3.6), que es una fórmula ampliamente usada en experimentos visuales de diferencias de color para estudiar la variabilidad inter-observadores e intra-observadores. Como consecuencia de aplicar esta fórmula, cuanto menor es el índice de STRESS, mejor es la correlación. La variabilidad intra-observador se refiere a las diferencias entre los resultados obtenidos cuando el mismo observador valora en más de una ocasión sobre la misma muestra. En este caso, se midió por índice de STRESS las 3 repeticiones por muestra que realizó cada observador y se analizó si los resultados eran coherentes o se distanciaban mucho unas valoraciones de otras. La variabilidad inter-observador se refiere a las diferencias entre los resultados de distintos observadores. También se calculó mediante el índice de STRESS considerando el promedio total de los 11 observadores y el valor medio de las 3 repeticiones de cada observador. Hay que indicar que las valoraciones de apariencia visual de textura son subjetivas, y, por lo tanto, estas medidas tienen una incertidumbre no despreciable que debe ser tenida en cuenta.

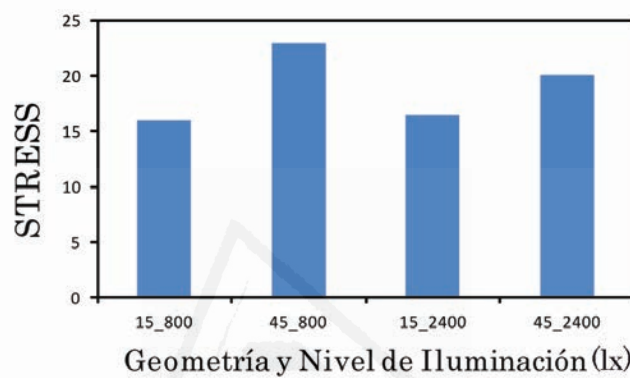
### 4.3 Resultados

Las evaluaciones psicofísicas y los datos instrumentales permiten comprobar la correlación visual e instrumental en relación con el experimento realizado.

#### -Variabilidad de los observadores

La variabilidad media intra-observador obtenida en este experimento es de 9.45 unidades de STRESS, y, la variabilidad media inter-observador fue de 18.87 unida-

des de STRESS. Analizando los resultados, existe mejor correlación inter-observador para la geometría  $15^\circ$ as $15^\circ$  que para la geometría  $45^\circ$ as $45^\circ$  (figura 4.5), aunque todos los valores calculados son buenos en comparación con otros estudios de diferencias de color [142, 143], ya que son generalmente superiores a 20 unidades de STRESS. El análisis intra-observador no aporta información relevante.

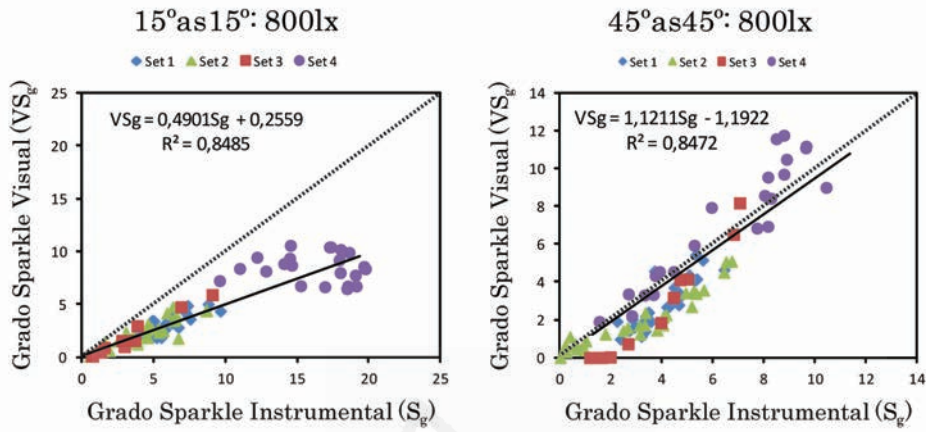


**Figura 4.5:** Variabilidad inter-observador en el experimento psicofísico de estimación de magnitud.

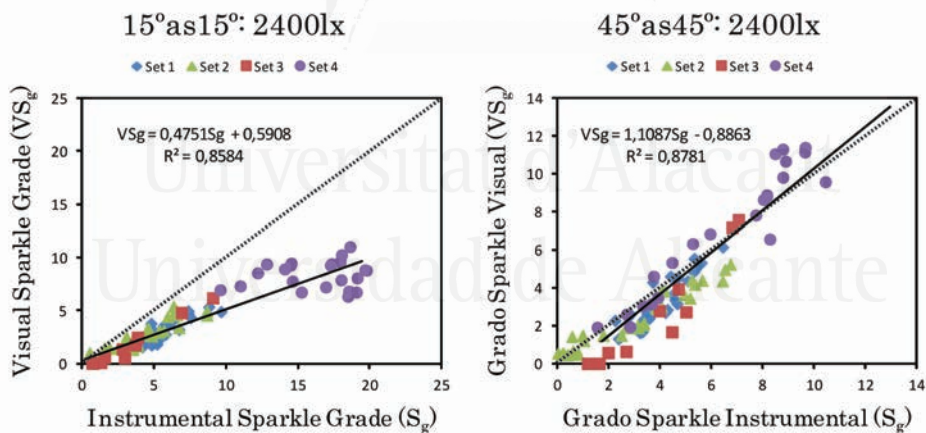
#### -Correlación visual e instrumental

- $S_G$  vs  $VS_G$ : Correlación general e influencia del nivel de iluminación y la geometría.

La correlación visual ( $VS_G$ ) e instrumental ( $S_G$ ) del efecto de textura sparkle ha sido estudiado para comprobar si lo que predice el dispositivo BYK-mac se correlaciona con lo que percibe el observador. Se han realizado diferentes evaluaciones visuales variando la geometría y el nivel de iluminación. Para un mismo nivel de iluminación y diferente geometría se observa que para el nivel de iluminación bajo (800 lux) la correlación visual e instrumental del sparkle es prácticamente igual (figura 4.6). Sin embargo, para un nivel de iluminación alto (2400 lux), existe ligeramente una mejor correlación visual e instrumental para la geometría  $45^\circ$ as $45^\circ$  (figura 4.7). En resumen, se ha obtenido buena correlación visual e instrumental para ambas geometrías y ambos niveles de iluminación en base a su coeficiente de correlación con una media aproximada para las cuatro configuraciones de medida de  $R^2 = 0.85$ , por lo que para este conjunto de muestras en concreto el algoritmo implementado por el BYK-mac para el cálculo del sparkle da unos resultados buenos. Las barras de error de los puntos (valor medio) se encuentran dentro del tamaño del símbolo.



**Figura 4.6:** Grado de correlación del sparkle para condiciones de iluminación bajas (800 lux) para las geometrías de 15° as 15° (izquierda) y 45° as 45° (derecha).



**Figura 4.7:** Grado de correlación del sparkle para condiciones de iluminación altas (2400 lux) para las geometrías de 15° as 15° (izquierda) y 45° as 45° (derecha).

Curiosamente, comparando ambas geometrías y niveles de iluminación, las pendientes para la geometría 45° as 45° es cercana a la unidad para ambos niveles de iluminación, en cambio para la geometría de 15° as 15° es aproximadamente la mitad. Esto puede sugerir que el diseño y validación original del BYK-mac fue úni-

camente realizado para la geometría de  $45^\circ$ as $45^\circ$  y para un nivel de iluminación muy cercano a los 2400 lux o ligeramente inferior. Esto parece ser correcto porque en la geometría de  $15^\circ$ as $15^\circ$  el rango de los conjuntos de muestras 1-3 están muy agrupados en comparación con el conjunto 4 (figura 4.6 izquierda) y con rangos de sparkle menores de 10 unidades, como se puede observar en la figura 4.7 derecha. Es decir, el algoritmo implementado en el dispositivo comercial puede estar condicionado por la elección inicial de muestras, en particular por los tamaños y tipos de pigmentos de efecto seleccionados, y también por el nivel de iluminación y geometría.

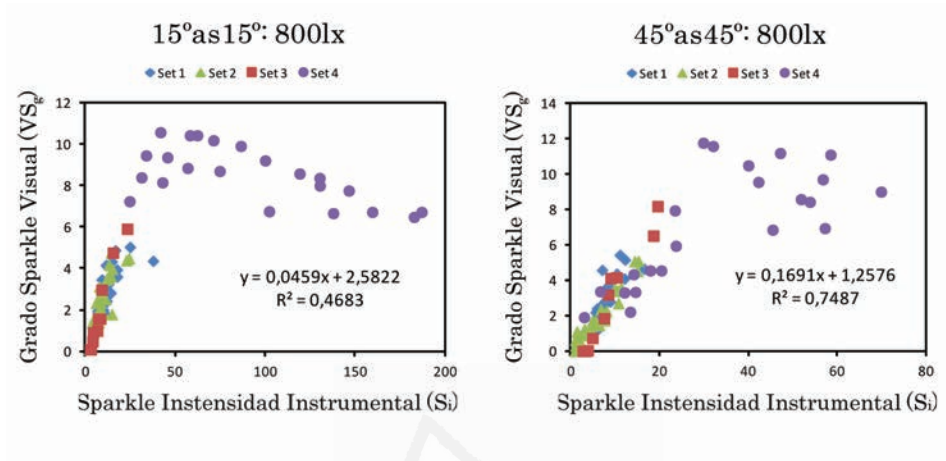
Para todos los casos, incluidas las muestras proporcionadas por Werner R. Cramer usando pigmentos Eckart (Set 4, Pigmentos Luxan) debido a su formulación con tamaños y concentraciones superiores al resto de muestras, y no siendo muy característicos en el sector industrial, observando las figuras (figura 4.6, figura 4.7) se ve que las estimaciones realizadas por los observadores son muy buenas comparadas con los datos instrumentales proporcionados por el BYK-mac.

$-S_i$  vs  $VS_G$ : Previsibilidad de correlación para el valor de sparkle intensidad.

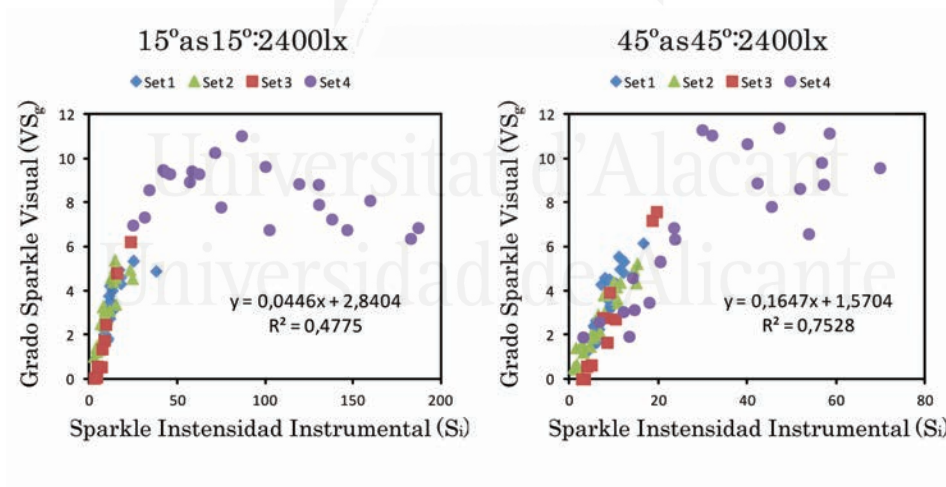
En esta sección, se estudió la correlación teniendo en cuenta el parámetro de sparkle intensidad. Este parámetro viene definido de acuerdo a la norma ASTM [7] como: "el contraste entre la apariencia de brillo sobre las partículas de un pigmento gonioaparente y su entorno inmediato". Por lo tanto, la evaluación visual del sparkle fue comparada con el sparkle intensidad proporcionado por el instrumento. Cabe recordar que la única evaluación visual requerida a los observadores fue un balance personal entre el sparkle intensidad y los valores de área, sin conocer la relación entre ambos factores (Ecuación 2.1.1).

Para todas las geometrías y niveles de iluminación no es posible aplicar una regresión lineal como se ha realizado en la sección anterior. Como se ha mencionado anteriormente, entre las 91 muestras, el set de Luxan tiene características un poco diferentes al resto de muestras. En particular, los valores de sparkle intensidad obtenidos instrumentalmente para este conjunto de muestras son ligeramente superiores a los obtenidos en las demás muestras. Cuando se considera el set 4 en los resultados, se produce una "saturación" por parte del observador. Es decir, no existe una relación lineal entre los dos parámetros, no por más reflexión que produzca el pigmento el observador va a detectar mejor el efecto de textura sparkle, y esto puede ser debido a las limitaciones en la agudeza visual humana. En la figura 4.8 y figura 4.9 se muestran los resultados, se puede observar que alrededor de un valor de  $S_i \approx 40 - 50$ , las estimaciones visuales siguen un patrón constante.





**Figura 4.8:** Grado de correlación del sparkle intensidad para condiciones de iluminación bajas (800 lux) para las geometrías de 15° as 15° (izquierda) y 45° as 45° (derecha).



**Figura 4.9:** Grado de correlación del sparkle intensidad para condiciones de iluminación altas (2400 lux) para las geometrías de 15° as 15° (izquierda) y 45° as 45° (derecha).

Si eliminamos el set 4 de los resultados, si que es posible aplicar una regresión lineal y de este modo obtener una mejor correlación visual e instrumental (tabla 4.2)

que considerando el set 4 en los resultados. Hay que reseñar que el observador fue preguntado por la evaluación del grado de sparkle, para ello el observador asignó valores entre 0 y 10, o más, considerando el sparkle total, no evaluando las variables independientes (sparkle intensidad y sparkle área).

**Tabla 4.2:** Datos de la correlación ( $R^2$ ) del sparkle intensidad para 800 y 2400 lux, y para las geometrías de  $15^\circ$ as $15^\circ$  y  $45^\circ$ as $45^\circ$  sin incluir el set 4

	800 lux	2400 lux
$15^\circ$ as $15^\circ$	$y = 0,1756x + 0,6849$ $R^2 = 0,6452$	$y = 0,1965x + 0,7844$ $R^2 = 0,6521$
$45^\circ$ as $45^\circ$	$y = 0,3786x - 0,3164$ $R^2 = 0,8706$	$y = 0,3859x - 0,011$ $R^2 = 0,8615$

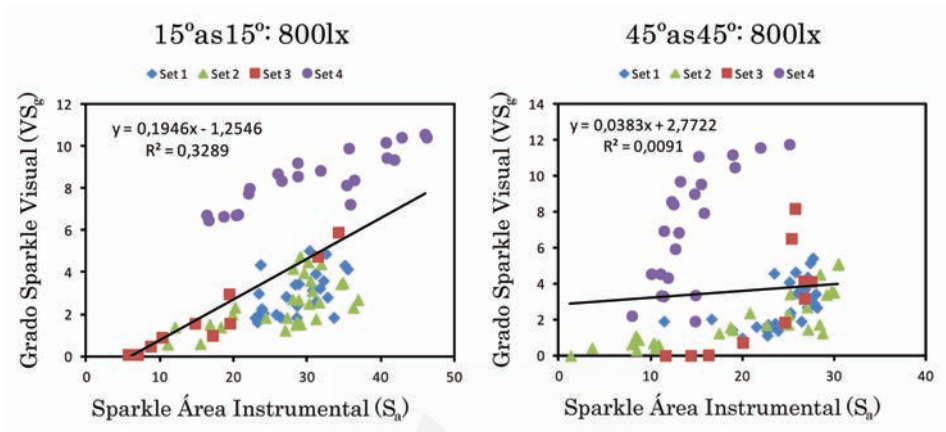
$-S_a$  vs  $VS_G$ : Previsibilidad de correlación para el valor de sparkle área.

También se analizó el otro factor ( $S_a$ ) involucrado en la ecuación de obtención del grado de sparkle implementado por el BYK-mac. El sparkle área viene definido en la norma ASTM [7] como: "el segmento de área de una porción iluminada de la superficie del objeto con puntos que son ligeramente más brillantes que su entorno inmediato". Comparando con los resultados visuales, no es posible de nuevo aplicar una correlación lineal entre este parámetro ( $S_a$ ) y el sparkle visual estimado por los observadores. Incluso eliminando el set 4, la correlación no es buena ( $R^2=0.5$ ), y mucho peor que en los apartados anteriores para ambos niveles de iluminación y ambas geometrías. De nuevo reseñar que al observador no le fue preguntado que evaluara el efecto de textura en función del área/tamaño de los pigmentos que percibiera, sino que diera una valoración del sparkle total percibido.

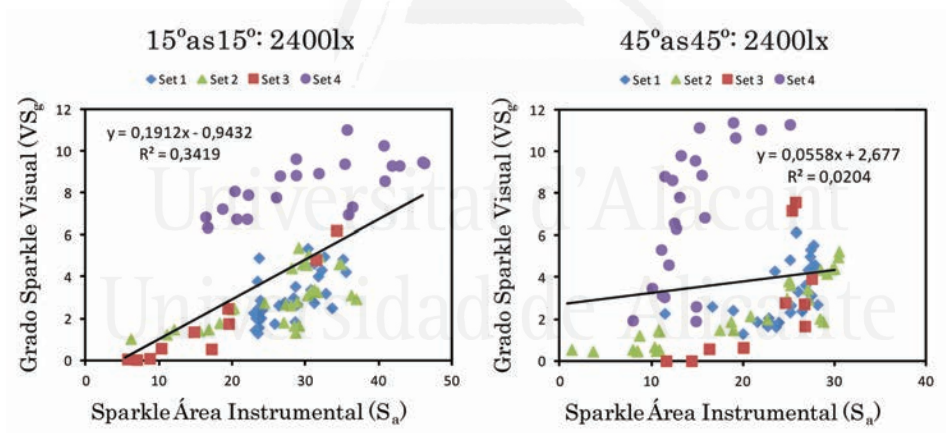
Se concluyó que no hay correlación, cada conjunto de muestras tienen un comportamiento distinto y siguen tendencias diferentes (figura 4.10, figura 4.11). Esto despierta incluso más curiosidad sobre el algoritmo implementado por el BYK-mac, porque como hemos visto en el sparkle general la correlación es buena ( $R^2=0.85$ ).

**Tabla 4.3:** Datos de la correlación ( $R^2$ ) del sparkle área para 800 y 2400 lux, y para las geometrías de  $15^\circ$ as $15^\circ$  y  $45^\circ$ as $45^\circ$  sin incluir el set 4

	800 lux	2400 lux
$15^\circ$ as $15^\circ$	$y = 0,1228x - 0,6137$ $R^2 = 0,5252$	$y = 0,1607x - 1,105$ $R^2 = 0,4727$
$45^\circ$ as $45^\circ$	$y = 0,1413x - 0,7689$ $R^2 = 0,5614$	$y = 0,172x - 0,9952$ $R^2 = 0,5162$



**Figura 4.10:** Grado de correlación del sparkle área para condiciones de iluminación bajas (800 lux) para las geometrías de 15° as 15° (izquierda) y 45° as 45° (derecha).



**Figura 4.11:** Grado de correlación del sparkle área para condiciones de iluminación altas (2400 lux) para las geometrías de 15° as 15° (izquierda) y 45° as 45° (derecha).

#### 4.4 Discusión

Se realizó un experimento visual para verificar que los datos instrumentales ( $S_i$ ,  $S_a$ ,  $S_G$ ) proporcionados por el BYK-mac se correlacionan con el grado de sparkle visual estimado por los diversos observadores. Bajo diferentes condiciones, como el

nivel de iluminación y la geometría de medida, se evaluó la estimación de magnitud del sparkle aplicando un método psicofísico convencional, con el conocimiento del tamaño y tipos de pigmentos empleados en las muestras, pero incluyendo pigmentos de efectos especiales recientes que no fueron incluidos en el diseño y validación original del dispositivo de referencia actual en el sector de la automoción para la medida del sparkle.

Este estudio corroboró que el grado de sparkle ( $S_G$ ) se correlaciona bien con la percepción visual humana a pesar de la utilización de nuevos y novedosos pigmentos de efecto, como por ejemplo la mica sintética. Puede ser de mucho interés en un futuro estudiar otros nuevos pigmentos de efecto u otras muestras con efectos de sparkle similares empleados en otras industrias como plásticos, cosmética, etc. También puede ser de interés en el futuro aplicar esta misma metodología para futuros nuevos instrumentos de medida del sparkle, sean o no con las mismas geometrías de medida usadas en el BYK-mac.

El rendimiento es ligeramente mejor para la geometría de medida de  $45^\circ$ as $45^\circ$  que para la geometría de  $15^\circ$ as $15^\circ$ . Del mismo modo, para el nivel de iluminación alto (2400 lux), el sparkle es levemente mejor detectado en la geometría de  $45^\circ$ as $45^\circ$ . Esto puede ser debido a que en el diseño y validación originales del instrumento (BYK-mac) sólo se tuvo en cuenta una geometría y se consideró un nivel de iluminación alto, alrededor de 1500 lux [136].

Por el contrario, el sparkle intensidad ( $S_i$ ) y el sparkle área ( $S_a$ ) no se correlacionan tan bien con las percepciones visuales para ninguna geometría de medida, ni ningún nivel de iluminación, especialmente para el parámetro de sparkle área. Esto significa que, aunque tiene sentido preguntar al observador por el grado de sparkle general y los resultados estadísticos incluyendo el set 4 (Pigmentos Luxan) lo certifica: el balance final entre los parámetros parciales del sparkle ( $S_i$  y  $S_a$ ) no es válido en este caso para nuevos pigmentos de efecto con nuevas formas y tamaños. Para poder realizar una comparación directa entre los valores de sparkle intensidad y sparkle área y los datos visuales, sería necesario replicar el experimento pero formulando dos preguntas muy concretas al observador, la primera de ellas consistente en la detección de sparkle en base a la intensidad de los flakes que percibe y la segunda pregunta sobre la cantidad de esas áreas luminosas que puede lograr a percibir.

Por lo tanto, en relación a las variables que se van a tratar a lo largo de la tesis, tal vez la percepción del sparkle no pueda ser modelada mediante únicamente dos parámetros de una imagen de escala de grises, pero sí mediante otros parámetros estructurales como la forma y tamaño del pigmento, la concentración, etc., incluso condiciones ambientales como el nivel de iluminación, la geometría de medida, la colorimetría del fondo de la muestra, etc., que serán estudiados en capítulos posteriores y modelado de forma multidimensional no lineal a corto o medio plazo.

Sólo tal vez, aplicando el diseño estadístico de experimentos (DoE) podríamos comprender la compleja interacción de variables estructurales, ambientales y ópticas que están involucradas en la apariencia del sparkle.

A lo largo de este capítulo se han analizado algunos de los posibles factores que afectan a la detección del sparkle, pero hay otros numerosos factores que probablemente afecten a su medida, como pueden ser: el grado de rugosidad de la superficie y el tipo de borde del pigmento, el espesor, el tipo de fabricación del pigmento, el material empleado para su fabricación, el índice de refracción, reflexión y absorción, etc., por lo que los resultados proporcionados por el BYK-mac pueden ser más o menos aproximados, pero no exactos, debido a los múltiples factores involucrados y a la complejidad de generar un modelo en el que estén considerados todos los factores (figura 1.1). Incluso generando ese algoritmo, existen otros factores propios de la formulación de la muestra que pueden influir en la detección del sparkle como por ejemplo, la colorimetría de la muestra, la interacción con otros pigmentos, el método de aplicación de la pintura sobre el sustrato, etc.

Así pues, una vez afianzada la fiabilidad en la medida del BYK-mac gracias a este experimento de validación de escalado del sparkle, estamos en condiciones de abordar el siguiente objetivo de la tesis, que es corroborar si existe correlación visual e instrumental con el nuevo algoritmo de medida del sparkle propuesto por el IO-CSIC.

## 4.5 Publicaciones

Gómez, O., Perales, E., Chorro, E., Viqueira, V., & Martínez-Verdú, F. M. (2016). Visual and instrumental correlation of sparkle by the magnitude estimation method. *Applied Optics*, 55(23), 6458-6463.

Gómez, O.; Perales, E.; Micó-Vicent, B.; Viqueira, V.; Hurabait, K.; Martínez-Verdú, F.M., "Statistical design of experiments applied on sparkle visual detection", In *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology, Lillehammer (Norway), September. 2017.

## Capítulo 5

# Determinación de la correlación inter-instrumental y visual del efecto de textura sparkle

### 5.1 Introducción

Como ya sabemos, la caracterización del efecto de textura sparkle es sumamente importante para la industria automovilista debido al gran porcentaje de coches que tienen recubrimientos con pigmentos de efecto.

Actualmente gracias a la tecnología de imágenes se puede medir este efecto, pero hasta la fecha sólo existe un dispositivo comercial en el mercado capaz de cuantificar el grado de sparkle de una muestra, el BYK-mac, el cual como se ha citado en capítulos anteriores, proporciona tres geometrías de iluminación direccional ( $15^\circ$ as $15^\circ$ ,  $45^\circ$ as $45^\circ$  y  $75^\circ$ as $75^\circ$ ), una geometría de iluminación difusa y una dirección de detección fija a  $0^\circ$  con un dispositivo calibrado de imágenes (en blanco y negro, o niveles de gris).

Los parámetros textura de sparkle y graininess se obtienen a través del instrumento. Estos parámetros supuestamente están bien correlacionados con la apariencia visual que detectan los observadores, aunque como se ha visto en el capítulo anterior ([Capítulo 4](#)), ante la aparición en la industria de nuevas clases de pigmentos de efecto, como por ejemplo los pigmentos compuestos por mica sintética, la correlación visual e instrumental es buena pero no llega a ser del todo óptima, lo que podría provocar problemas a nivel industrial para las empresas que basan su control de calidad únicamente en las valoraciones del dispositivo BYK-mac.

*sparkle*

Además, los valores de medida correspondientes a estos parámetros no están claramente definidos, ya que no se sabe nada acerca del algoritmo matemático implementado para el cálculo de los parámetros de medida del sparkle [75, 102].

En este capítulo se va a describir y analizar el modelo óptico-matemático propuesto por el Instituto de Óptica del CSIC para la medida de sparkle. Posteriormente se realizará una comparación con los datos instrumentales proporcionados por el BYK-mac para ver la posible correlación existente entre ambos modelos de medida, y también se realizará una comparación con los datos visuales proporcionados por los distintos observadores sobre las muestras seleccionadas.

### **-Descripción del Modelo**

El modelo matemático propuesto por el IO-CSIC es un modelo analítico sencillo de comprender y caracterizar de forma radiométrica para medir ambos efectos de textura, tanto sparkle como graininess. Permite que ambos efectos sean explicados y a pesar de su simplicidad, incluye variables relacionadas con el sistema óptico (Función de extensión de puntos - PSF), la distancia al recubrimiento, el grado de difusión de la iluminación, las direcciones de iluminación y observación, y, los parámetros del recubrimiento.

Con el fin de proponer una metodología y establecer más adelante los valores de medida, primero se tuvo que definir qué es y qué es lo que produce sparkle. Este modelo matemático está bien definido en el trabajo presentado por Ferrero et al [35, 39, 42].

En ese trabajo asumen que el modelo y la geometría del pigmento de efecto se basan en la figura 5.2, dependiendo de la posición del pigmento de efecto  $\theta_{flake}$ , y el ángulo de observación  $\theta_s$ , los distintos pigmentos tendrán diferentes comportamientos. En la figura sólo se está considerando el comportamiento de un único pigmento de efecto.

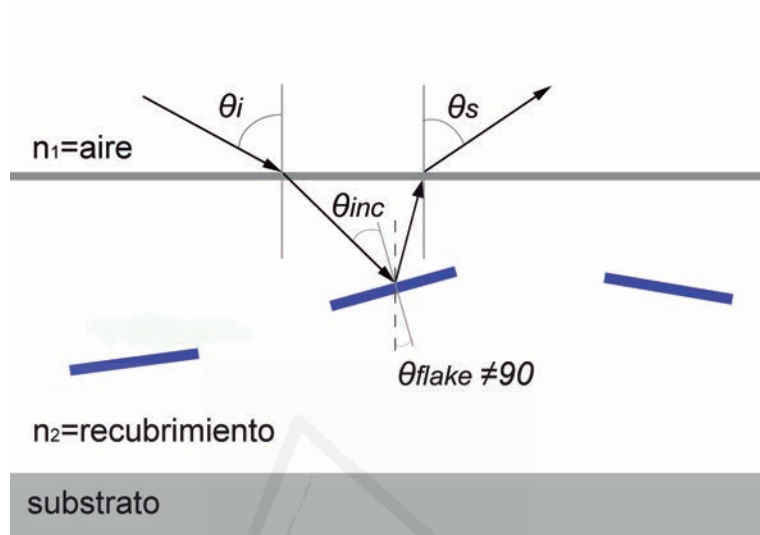


Figura 5.1: Configuración de medida en función de la posición de los pigmentos.

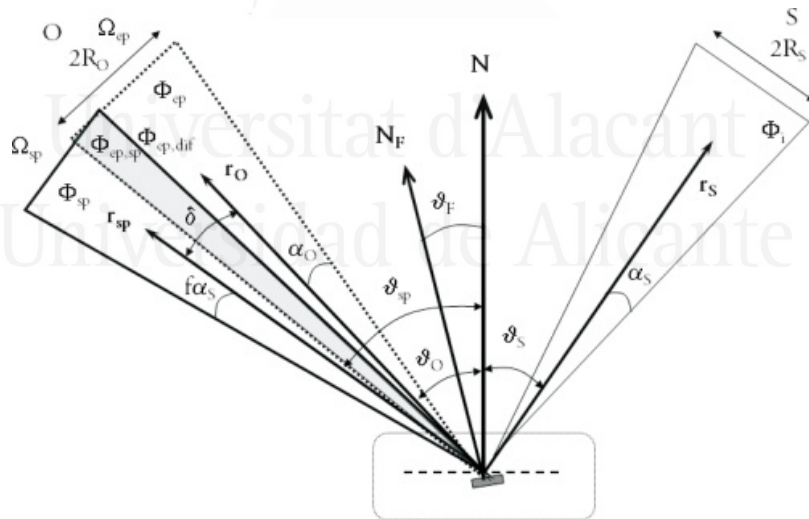


Figura 5.2: Modelo del IO-CSIC [42].



*sparkle*

El sparkle se produce por el flujo luminoso reflejado especularmente por los pigmentos de efecto que componen la capa del recubrimiento, siendo responsables de que se observen los puntos brillantes [35]. Partiendo de esta afirmación, se puede decir que en función de la posición de cada pigmento de efecto se verán diferentes respuestas y flujos luminosos de cada uno de ellos, produciendo diferentes patrones. El flujo luminoso de un solo pigmento de efecto puede ser calculado siguiendo el patrón definido en la [figura 5.2](#).

La muestra es iluminada por una fuente  $S$  con un radio  $R_s$  a una distancia  $d_s$  y desde una dirección dada por las coordenadas esféricas  $(\vartheta_s, \Phi_s)$  o por el vector unitario  $r_s$  respecto al sistema de referencia, definido por el vector normal  $N$ . Cuanto mayor es el radio  $R_s/r_s$  más difusa es la iluminación. Recíprocamente, el observador  $O$  está situado a una distancia  $d_o$ , el radio de entrada de su pupila es  $R_o$  y su dirección es  $(\vartheta_o, \Phi_o)$  o  $r_o$ .

La orientación para un pigmento de efecto dado en el recubrimiento está definida por  $\vartheta_F, \Phi_F$  o por el vector normal  $N_F$ . Se asume que el tamaño del pigmento de efecto es muy pequeño respecto a las dimensiones de las geometrías de iluminación y observación. El flujo luminoso recogido por la entrada de la pupila  $\Phi_{ep}$ , confinado dentro del cono  $\Omega_{ep}$ , está compuesto por dos flujos luminosos diferentes: El flujo luminoso reflejado especularmente por el pigmento de efecto ( $\Phi_{ep,sp}$ ) y el flujo luminoso que entra directamente en la pupila por otros mecanismos ( $\Phi_{ep,dif}$ ), por ejemplo, la reflexión especular en la capa del recubrimiento o distintas reflexiones producidas por otros pigmentos metálicos o de interferencia. El flujo luminoso reflejado especularmente por el pigmento ( $\Phi_{sp}$ ) es proporcional al flujo luminoso incidente  $\Phi_i$  para una geometría de iluminación y observación dada. La constante proporcional,  $\rho_{sp}$ , depende de la longitud de onda e incluye coeficientes de Fresnel, absorción a través del espesor y el tamaño de los pigmentos de efecto.

$\phi_{sp}$  esta confinado dentro de un cono  $\Omega_{sp}$  centrado alrededor de la dirección especular del pigmento, con un medio ángulo  $\alpha_{sp}$  cercano a  $\alpha_S$ , salvando la ligera diferencia en el hecho de que el pigmento no es completamente plano. Por lo tanto, el parámetro denotado como planitud ( $f$ ) fue añadido al modelo, cuyo efecto es equivalente a modificar  $\alpha_S$  (la direccionalidad de la iluminación):

$$\alpha_{sp} = f\alpha_S \quad (5.1.1)$$

La proporción de  $\phi_{sp}$  que llega a la pupila del observador  $\Phi_{ep,sp}$  depende de la distancia angular ( $\delta$ ) entre la dirección de  $\phi_{sp}$  ( $r_{sp}$ ) y la dirección de observación  $r_o$ . Se calcula a partir del vector unitario  $r_o$  y el vector unitario  $r_{sp}$ :

$$\cos\delta = r_o * r_{sp} \quad (5.1.2)$$

donde  $r_{sp}$  se deriva, calculando previamente  $r'_{sp}$  de la relación:

$$r'_S + r'_{sp} = (2N_F * r'_S)N_F \quad (5.1.3)$$

donde  $r'_S$  representa la dirección de iluminación desde la posición del pigmento (dentro de un índice de refracción medio  $n$ ) y, del mismo modo  $r'_{sp}$  representa la dirección  $r_{sp}$  desde la posición del pigmento (figura 5.2). La transformación desde  $r_{sp}$  hasta  $r'_{sp}$  se realiza transformando la coordenada esférica polar según la ley de Snell.

$$\vartheta'_S = \arcsin\left(\frac{\sin\vartheta_S}{n}\right) \quad (5.1.4)$$

y similarmente para transformar  $r'_{sp}$  en  $r_{sp}$ :

$$\vartheta_{sp} = \arcsin(n * \sin\vartheta'_{sp}) \quad (5.1.5)$$

$\phi_{ep,sp}$  es proporcional al área de intersección  $I$  entre la sección circular del cono  $\Omega_{ep}$  y la sección circular del cono  $\Omega_{sp}$ . Esta área se contabilizó como la intersección de dos círculos de radio  $f\alpha_S$  y  $\alpha_o$  separado una distancia  $\delta$ . Esta intersección se puede calcular usando la fórmula para el área  $A_{cs}$  del segmento circular de radio  $R$  y una distancia cuerda-centro  $h$ :

$$A_{cs}(R, h) = R^2 \arccos\left(\frac{|h|}{R}\right) - |h| \sqrt{R^2 - h^2} \quad (5.1.6)$$

Dado dos círculos 1 y 2 con radio  $R_1$  y  $R_2$  con los centros localizados en  $(0,0)$  y  $(0,D)$ , sus respectivas  $h_1$  y  $h_2$  se deducen como:

$$h_1 = \frac{D}{2} + \frac{R_1^2 - R_2^2}{2D}; \quad h_2 = \frac{D}{2} - \frac{R_1^2 - R_2^2}{2D} \quad (5.1.7)$$

Si  $R_1 > R_2$  y las circunferencias de ambos círculos se intersectan, la intersección de esos dos círculos es:

$$I(R_1, R_2, D) = \begin{cases} \frac{1}{\Pi R_2^2} [A_{cs}(R_1, h_1) + A_{cs}(R_2, h_2)] & \text{si } h_2 \geq 0 \\ \frac{1}{\Pi R_2^2} [A_{cs}(R_1, h_1) + \Pi R_2^2 - A_{cs}(R_2, h_2)] & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (5.1.8)$$

*sparkle*

donde  $I$  esta normalizado para tener la unidad como máximo. Un cálculo similar se puede hacer si la fuente no es circular sino rectangular. Teniendo en cuenta estas expresiones, puede escribirse para el modelo propuesto:

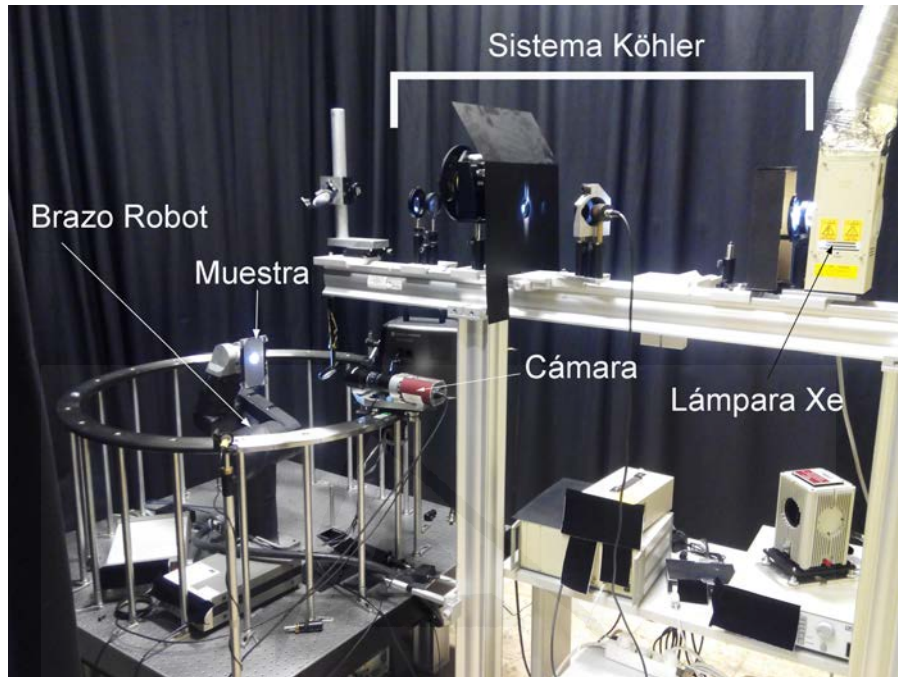
$$\phi_{ep,sp} = \begin{cases} I(f\alpha_S, \alpha_O, \delta)\phi_{sp} & \text{si } f\alpha_S \geq \alpha_O \\ I(\alpha_O, f\alpha_S, \delta)\phi_{sp} & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (5.1.9)$$

Similar a  $\phi_{ep,sp}$ ,  $\phi_{ep,dif}$  es proporcional al flujo luminoso incidente  $\phi_i$ . La constante de proporcionalidad se denomina  $\rho_{dif}$ , que es dependiente de la longitud de onda y las geometrías de iluminación/observación y es proporcional al ángulo sólido de entrada a la pupila. Está estrechamente relacionado con la función de distribución de la reflectividad bidireccional (BRDF) del recubrimiento, que, a diferencia del sparkle y graininess, es una propiedad de campo lejano. Por lo tanto, el flujo luminoso total recogido por la pupila de entrada desde la dirección de un solo pigmento puede escribirse como:

$$\Phi_{ep} = \Phi_{ep,dif} + \Phi_{ep,sp} = \Phi_i[\rho_{dif} + \rho_{sp}I(f\alpha_S, \alpha_O, \delta)] \quad (5.1.10)$$

#### -Descripción del sistema experimental

El sistema utilizado fue el GEFE (Gonioespectrofotómetro Español) desarrollado en el IO-CSIC [96, 144], con el único cambio del sistema de detección que en este caso se introdujo una cámara monocroma CCD. El GEFE está compuesto por tres sistemas independientes: el sistema de irradiación, el sistema de posicionamiento de la muestra y el sistema de detección, que para este trabajo concretamente fue la cámara.



**Figura 5.3:** Gonioprotómetro Español - GEFE.

### *Sistema de irradiación*

La fuente de iluminación es una lámpara de Xenon (Hamamatsu Super - Quiet XenonLamp, modelo: L2175150W) conectada a una fuente de alimentación eléctrica estable (modelo: C8849, marca: Hamamatsu). La lámpara Xenon emite en el rango espectral desde 185 a 2000 nm. Se colocó un sistema óptico en frente de la fuente de iluminación para colimar el haz y proporcionar irradiación uniforme a la muestra.

El sistema óptico forma un sistema Köhler, compuesto por dos lentes convergentes de 50.8 mm de diámetro cada una, con una longitud focal de 75 y 500 mm respectivamente.

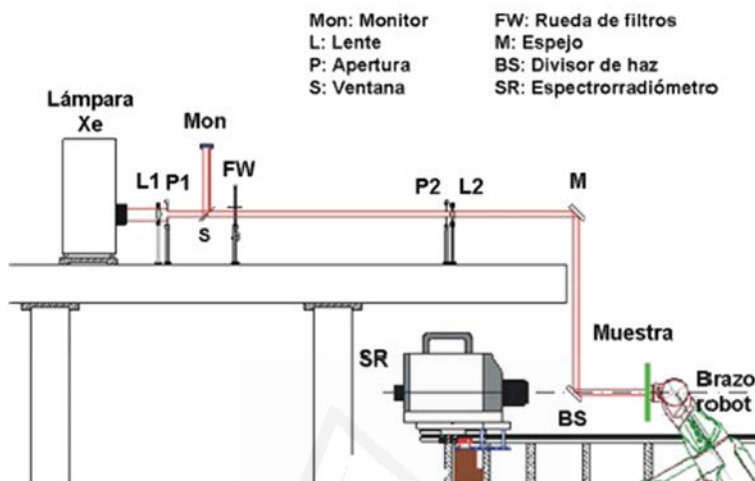


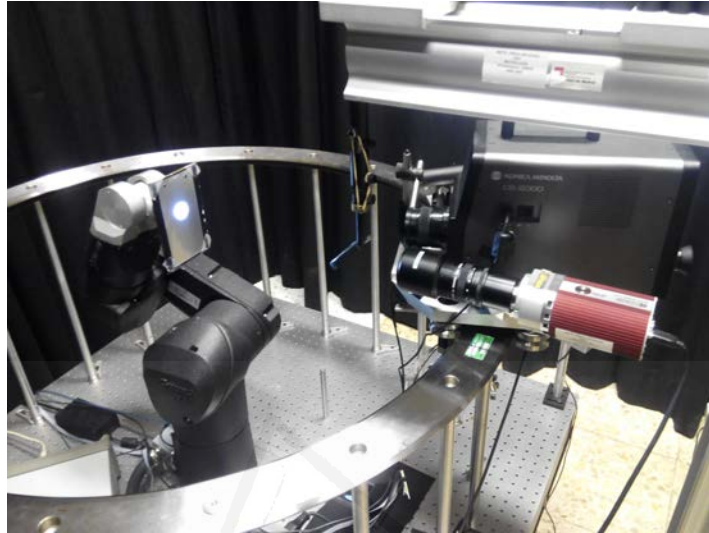
Figura 5.4: Sistema de irradiación del GEFE [96].

#### Sistema de detección

El sistema de detección es una cámara CCD monocroma (Qimaging, Rollera XR) situada en la misma posición donde aparece el tele-espectrorradiómetro de la figura 5.4. Montado sobre una plataforma capaz de desplazarse a lo largo de 1.03 metros de diámetro sobre una rueda dentada, cuyo centro coincide con el origen del sistema de referencia de la muestra (figura 5.5). La cámara CCD se ha usado como detector para proporcionar las adquisiciones con resolución espacial. El rango dinámico de la cámara es de 12 bits, el tamaño del detector es de 695 x 520 pixels (2/3") y el tamaño de pixel es 13.9 x 12.9  $\mu\text{m}$

#### Sistema de posicionamiento de la muestra

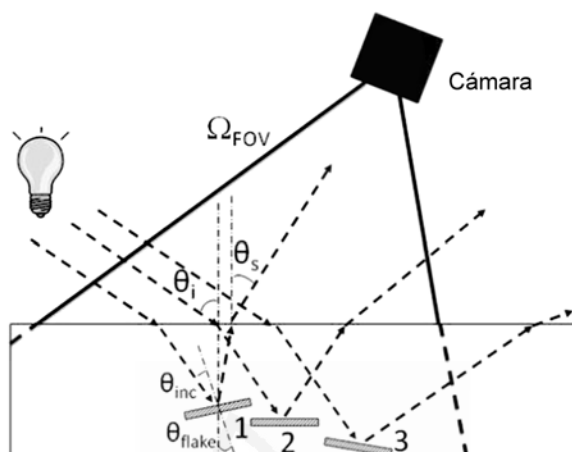
Este sistema está compuesto por un brazo robótico de seis ejes (modelo: TX-40, marca: Staubli) nos permite posicionar la muestra de forma rápida y con el ángulo de incidencia deseado. La muestra está fija al brazo del robot mediante una bomba de vacío (figura 5.5). Usando dos láseres de alineamiento, ambos apuntando la centro de la rueda dentada, es posible determinar que la incertidumbre de posicionamiento asciende a 0.1°, y que la variabilidad de posicionamiento puede suponerse que es insignificante.



**Figura 5.5:** Sistema de posicionamiento de la muestra y de detección en el GEFE para medidas de textura visual de materiales.

### -Medida del Sparkle

Con el fin de tener una medición exacta de las muestras y para evaluar la dependencia del sparkle en función de la dirección de iluminación y observación, se seleccionaron las geometrías de medición que resultan de la combinación de los ángulos de iluminación con respecto a la normal del recubrimiento ( $\theta_i$ ) desde  $15^\circ$  hasta  $75^\circ$  (con pasos angulares de  $30^\circ$ ) y ángulos de observación ( $\theta_s$ ) desde  $0^\circ$  hasta  $70^\circ$  (con pasos angulares de  $10^\circ$ ), siempre dentro del plano de incidencia ( $\Phi_s - \Phi_i = 0^\circ$  y  $180^\circ$ , donde  $\Phi$  representa el ángulo azimut). Esto nos permite ver y estudiar con claridad como bajo el mismo ángulo de iluminación el efecto de textura sparkle es diferente, y lo mismo pasa con la percepción visual del material.



**Figura 5.6:** Ejemplo de lo que sucede con ángulos de iluminación/observación concretos, en los que sólo la reflexión especular del pigmento número 1 llega a la cámara, los píxeles 2 y 3 aparecen como fondo oscuro [39].

Se adquirió una imagen de alto rango dinámico por cada geometría, compuesta por cinco imágenes con diferentes tiempos de integración (9 ms, 36 ms, 144 ms, 576 ms y 2304 ms). La zona de campo de visión (Field of View, FOV) de los píxeles en la muestra se estimó como  $130 \times 130 \mu\text{m}$  (figura 5.6). El área cuadrada de medición viene definida por un lado de 1.3 cm, que corresponde con una región de  $100 \times 100$  pixels en la imagen vista frontalmente.

Con el propósito de estudiar las imágenes tomadas y porque no hay establecida una metodología para hacerlo, primero hay que determinar cómo se va a hacer. Se han definido tres variables de medida del sparkle para una sola imagen. Estas tres variables son las siguientes:

*-Contraste de un solo punto de sparkle ( $C_s$ )*

Para determinar cuándo hay sparkle, un punto brillante (no saturado) rodeado de un fondo oscuro se puede definir como  $C_s$ : el radio entre el flujo luminoso del punto considerado como sparkle y el flujo luminoso uniforme considerado como alrededor (surround), a partir de una área de emisión definida y desde la dirección correspondiente de la posición en la imagen del punto de sparkle.

La razón por la que el área emisora tiene que estar bien definida es que, mientras que el flujo luminoso de una fuente puntual (como un pigmento) no cambia para diferentes áreas emisoras, el flujo luminoso de una fuente uniforme (como el alrede-

dor) varía proporcionalmente y, en consecuencia, el contraste calculado cambiará con diferentes áreas emisoras.

*-Contraste conjunto de los puntos de sparkle ( $C_{sp}$ )*

Es la mediana de los contrastes de los puntos de sparkle con valores superiores a un umbral de contraste  $C_{th} = 0.5$ , dentro de un área de medición lo suficientemente grande como para ser considerado un valor estadístico significativo (más de 10 puntos de sparkle).

*-Densidad de puntos de sparkle ( $d_{sp}$ )*

El número de puntos de sparkle por área con valores de  $C_s$  mayores a un umbral de contraste  $C_{th} = 0.5$ . Sería adecuado tener un área de medición lo suficientemente grande para proporcionar buena estadística y resultados estables. De acuerdo con este enfoque, la medición del sparkle se logra calculando  $C_{sp}$  y  $d_{sp}$  a partir de las mediciones de los contrastes de los puntos brillantes  $C_s$ .

En función de  $\theta_{flake}$  y  $\theta_{inc}$  (ángulo de incidencia sobre el pigmento de efecto) se deducen las fórmulas para el cálculo de la densidad y el contraste de sparkle.

$$C_{sp} = C_{sp,0} + C_{sp,1} \exp\left(\frac{\theta_{flake}^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (5.1.11)$$

$$d_{sp} = d_{sp,0} + d_{sp,1} \exp\left(\frac{\theta_{flake}^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (5.1.12)$$

Donde  $C_{sp,0}$ ,  $C_{sp,1}$ ,  $d_{sp,0}$  y  $d_{sp,1}$  se obtienen del ajuste de la variación medida con respecto a la geometría de medición.

Estas dos variables serían, como hipótesis, las equivalentes en el algoritmo implementado por el BYK-mac a las variables de sparkle intensidad ( $S_i$ ) y sparkle área ( $S_a$ ), como más adelante se estudiará la correlación que existe entre ambas variables además de la correlación visual aportada por los diversos observadores.

## 5.2 Materiales y Métodos

Se han tomado imágenes de un total de 109 muestras de diversos proveedores (MERCK, BASF, ECKART, LUXAN, SCHLENK, etc) empleadas en los distintos experimentos psicofísicos con el dispositivo comercial BYK-mac. Este dispositivo genera 4 imágenes: tres de ellas a los denominados ángulos de medida del sparkle ( $15^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $75^\circ$ ), obtenidas con iluminación direccional, y una cuarta ima-



gen obtenida con luz difusa de la que se obtiene el efecto de textura denominado graininess.

Se han realizado las medidas de las mismas 109 muestras con el gonio - espectrofotómetro español (GEFE) adaptado para medida de sparkle por captura de imagen. Con este dispositivo se han realizado medidas en un total de 48 geometrías. Aparte de medir en las mismas geometrías que el BYK-mac, se optó por medir en otras geometrías de medida diferentes para poder tener datos sobre el efecto de textura sparkle para otras geometrías y poder ver cómo varía la textura en función de la geometría de medida. A continuación se muestra un pequeño esquema con los diferentes ángulos de iluminación y observación empleados en las medidas con el GEFE (figura 5.7).

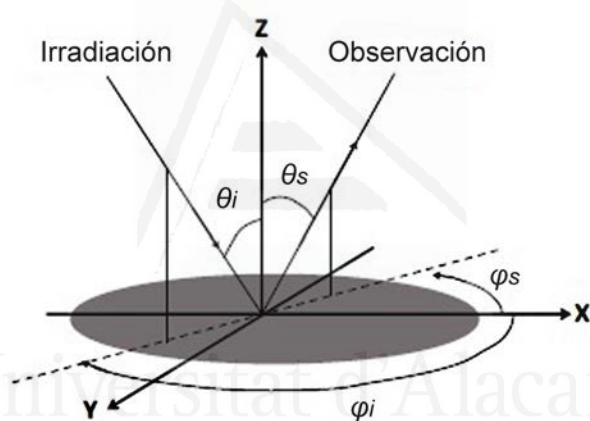
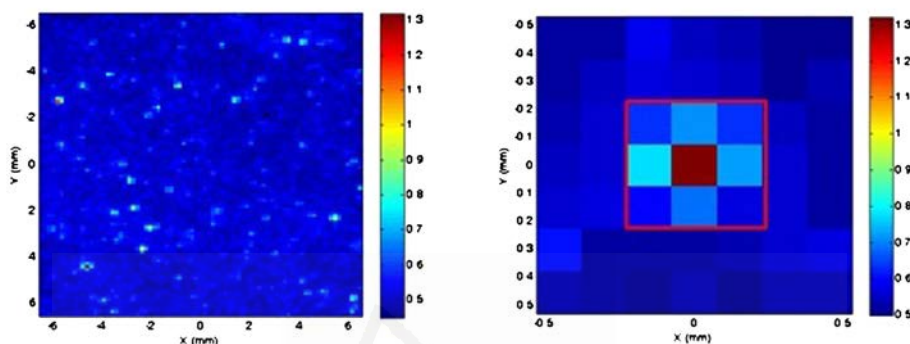


Figura 5.7: Sistema de coordenadas de la muestra.

Una vez se ha adquirido la imagen y se han determinado los valores para describir el sparkle, se aplica el modelo matemático propuesto con el fin de determinar las variables de contraste y densidad de pigmentos.

Se obtienen imágenes de alto rango dinámico características como las mostradas en la figura 5.8, y a partir de esas imágenes para cada geometría estudiada se obtienen las distintas variables en función de la geometría de iluminación y observación. Los ejes X e Y representan los valores de longitud en el plano del objeto (cada píxel corresponde con un área cuadrada de 0,13 mm x 0,13 mm), además la barra lateral de las figuras se encuentra en escala logarítmica. La figura muestra picos de intensidad muy diversa en un entorno oscuro (los píxeles con las respuestas más altas).

Estos picos se producen cuando el flujo radiante se refleja especularmente total o parcialmente por los pigmentos metalizados o de interferencia en el recubrimiento.



**Figura 5.8:** Imágenes de alto rango dinámico proporcionadas por el GEFE.

Una vez que ya se tienen los valores instrumentales tanto del GEFE como del BYK-mac, se procedió a realizar la intercomparación entre ambos dispositivos, así como la comparación con las medidas visuales proporcionadas por los diversos observadores para cada una de las muestras analizadas.

En este capítulo se mostrarán los resultados únicamente correspondientes al experimento psicofísico del escalado del sparkle, ya que en conexión con el capítulo anterior, el primer objetivo es estudiar la consistencia y fiabilidad del modelo matemático propuesto por el IO-CSIC.

Del total de 109 muestras analizadas, en este capítulo se mostrarán los resultados de dos subconjuntos (Luxan y BASF) compuestos por un total de 53 muestras (figura 5.9), ya que el resto se estudiarán en capítulos posteriores, en función de sus características estructurales.

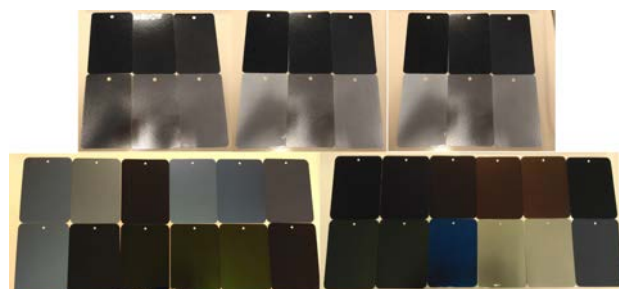


Figura 5.9: Algunas de las 53 muestras empleadas en el experimento de escalado del sparkle (Luxan - BASF).

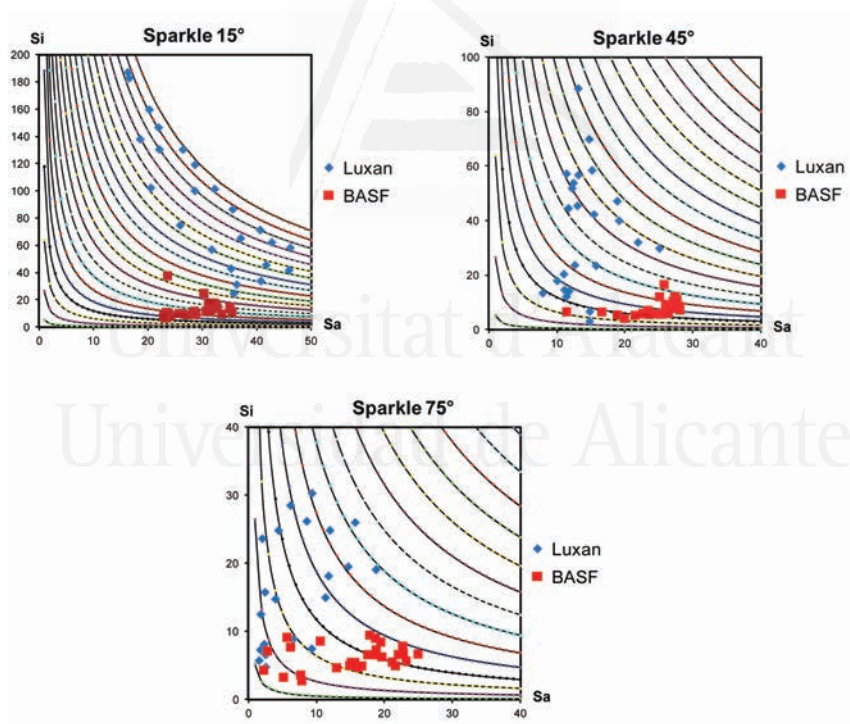


Figura 5.10: Distribución de los dos conjuntos de muestras en las gráficas características de representación del sparkle.

### 5.3 Resultados

Si analizamos todas las muestras de forma global, es decir, las 53 muestras medidas tanto por el GEFE, BYK-mac y psicofísicamente (escalado), sin realizar distinciones en función de sus características estructurales los resultados que se obtienen son los siguientes:

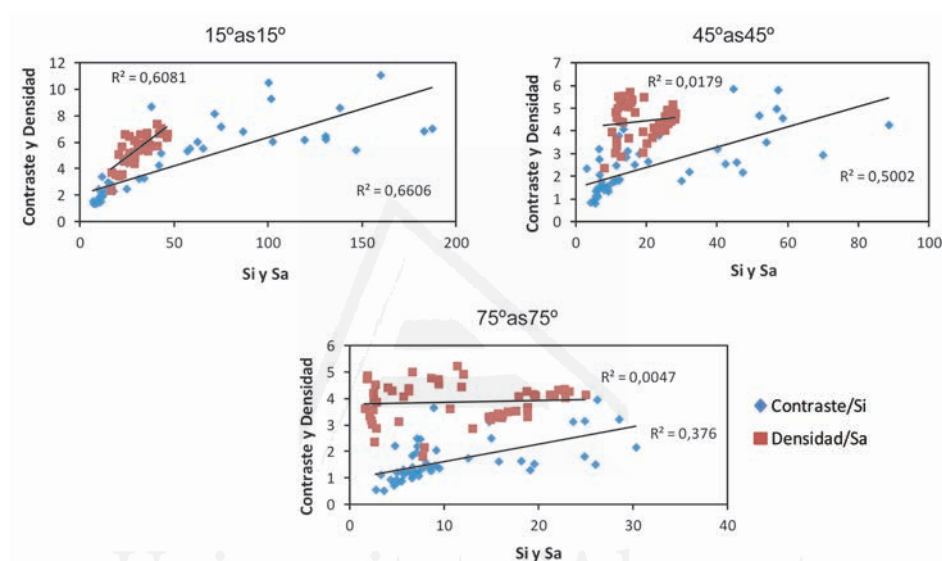


Figura 5.11: Correlación inter-instrumental de todas las muestras.

Tabla 5.1: Ajuste para los subconjuntos de muestras analizadas

	Densidad/Sa	Contraste/Si
15°as15°	$y = 0,1061x + 2,226$ $R^2 = 0,6081$	$y = 0,043x + 2,0601$ $R^2 = 0,6606$
45°as45°	$y = 0,0153x + 4,1391$ $R^2 = 0,0179$	$y = 0,0444x + 1,5136$ $R^2 = 0,5002$
75°as75°	$y = 0,0068x + 3,7796$ $R^2 = 0,0047$	$y = 0,0659x + 0,9585$ $R^2 = 0,376$

Del mismo modo que sucedió en el capítulo anterior (Capítulo 4), se observa que hay un grupo de muestras, en este caso correspondientes al tipo de pigmento Luxan, que presenta un comportamiento distinto a los encontrados hasta el día de hoy en la industria, ya que son pigmentos con un alto valor para la variable de intensidad (figura 5.10), lo que les hace destacar con respecto al resto de pigmentos los cuales vemos más agrupados, sobre todo para la geometría de 15°as15°, por lo que hace de estos unos pigmentos muy novedosos dentro del sector automovilístico.

sparkle

A continuación se muestra la tabla de ajuste inter-instrumental sin el conjunto de muestras de Luxan, donde se aprecia de nuevo para las tres geometrías de medida que no existe correlación instrumental entre ambos modelos matemáticos de medida.

**Tabla 5.2:** Ajuste de todas las muestras sin incluir las de pigmentos Luxan.

	Densidad/Sa	Contraste/Si
15°as15°	$y = 0,0923x + 2,6742 \quad R^2 = 0,503$	$y = 0,2139x - 0,3653 \quad R^2 = 0,8778$
45°as45°	$y = 0,0561x + 3,0419 \quad R^2 = 0,2061$	$y = 0,1073x + 0,7344 \quad R^2 = 0,2763$
75°as75°	$y = 0,0496x + 2,9049 \quad R^2 = 0,2697$	$y = 0,1553x + 0,2249 \quad R^2 = 0,517$

Comparando ambos equipos de medida, se observa que no miden lo mismo, es decir, la definición de sparkle no es la misma para cada uno de ellos, y por lo tanto no se observa correlación, ya que las  $R^2$  obtenidas para las distintas configuraciones de medida no son aceptables, exceptuando la correlación entre la variable contraste producida por el GEFE y el parámetro sparkle intensidad por parte del BYK-mac para la configuración de medida 15°as15° ( $R^2 = 0.87$ ). La razón de estos resultados puede ser debido a que hay ciertos grupos de muestras que debido al tipo de pigmentos que componen la formulación del recubrimiento, hacen que tengan un comportamiento distinto al esperado y que debe ser objeto de un estudio más específico en un futuro, es por ello que Merck ha contratado al grupo de visión y color de la Universidad de Alicante para el desarrollo de una tesis doctoral industrial en este sentido.

Otro problema que se ha encontrado con este grupo de muestras que presentan comportamientos visuales novedosos, es que como se desconoce el algoritmo de cálculo del BYK-mac para las variables del sparkle, tanto de intensidad como área, no se puede profundizar en este aspecto y analizar si es un problema del algoritmo de medida. Quizás, en un futuro, con nuevos instrumentos comerciales para sparkle (y con cámaras a color) se pueda realizar un estudio más profundo sobre el cálculo de las variables de sparkle área e intensidad.

En cuanto a la correlación visual e instrumental de todo el conjunto de muestras, no se ha podido realizar este análisis para los datos proporcionados por el GEFE, ya que el modelo matemático no genera un valor de sparkle general para cada muestra como hace el BYK-mac, el denominado “ $S_G$ ”, por lo que no se puede realizar el análisis comparativo. Llegados a este punto, se planteó el generar una ecuación equivalente al sparkle general del BYK-mac que se pudiera adaptar a los valores generados por el GEFE, como muestra la siguiente ecuación.

$$VS_g = f(\text{densidad}, \text{contraste}) \quad (5.3.1)$$

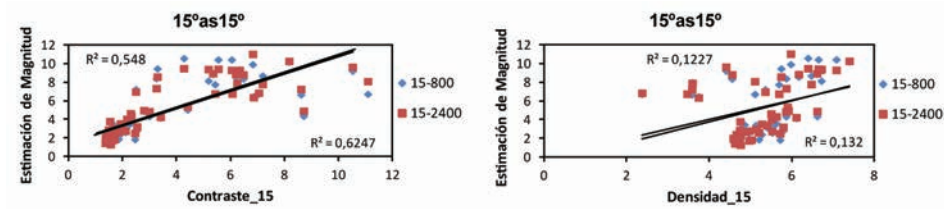


Figura 5.12: Correlación visual e instrumental de las variables de medida en el GEFE.

Tabla 5.3: Ajuste para la correlación visual e instrumental de las variables de medida en el GEFE.

	15°as15° 800 lx	15°as15° 2400 lx
VSG vs Contraste	$y = 0,8507x + 1,8791$ $R^2 = 0,548$	$y = 0,8665x + 1,9278$ $R^2 = 0,6247$
VSG vs Densidad	$y = 1,1214x - 0,7018$ $R^2 = 0,1227$	$y = 1,0315x - 0,1105$ $R^2 = 0,132$

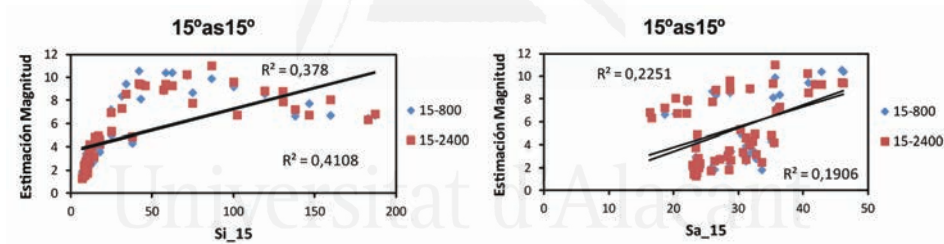


Figura 5.13: Correlación visual e instrumental de las variables de medida en el BYK-mac.

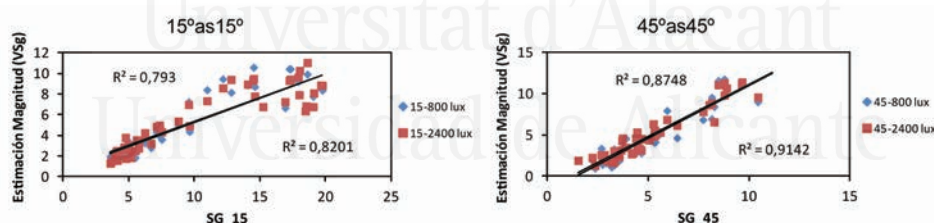
sparkle

**Tabla 5.4:** Ajuste para la correlación visual e instrumental de las variables de medida por el BYK-mac.

	15°as15° 800 lx	15°as15° 2400 lx
VSg vs $S_i$	$y = 0,0363x + 3,5835$ $R^2 = 0,378$	$y = 0,0361x + 3,7044$ $R^2 = 0,4108$
VSg vs $S_a$	$y = 0,2016x - 0,6018$ $R^2 = 0,2251$	$y = 0,177x + 0,2284$ $R^2 = 0,1906$

Como se ha acaba de citar, no se puede realizar una comparación con respecto al valor de sparkle general proporcionado por el GEFE, se optó por realizar la correlación visual con respecto a las variables que genera de contraste y densidad, y como se puede apreciar, en especial para la variable de densidad, no existe correlación entre lo que el modelo predice y lo que el observador detecta ( $R^2 = 0.13$ ). Indicar que para la variable de sparkle área del BYK-mac frente a los valores visuales (VSg), se obtienen unos resultados similares (tabla 5.4). Para la variable de contraste tampoco se obtienen unos valores aceptables, también en concordancia con los valores de sparkle intensidad obtenidos por el BYK-mac.

En cambio si se realizó la comparación de los datos instrumentales proporcionados por el BYK-mac junto con las valoraciones visuales realizadas por los observadores para cada geometría y nivel de iluminación correspondiente, divididas en dos grandes bloques en función del experimento psicofísico realizado, en este caso estimación de magnitud del efecto de textura sparkle, obteniéndose los siguientes resultados:



**Figura 5.14:** Correlación instrumental y visual de todas las muestras analizadas con el BYK-mac para las geometrías de 15°as15° y 45°as45°.

**Tabla 5.5:** Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental para las geometrías de 15°as15° y 45°as45°.

	Estimacion Magnitud (VSg) 15°as15°	Estimacion Magnitud (VSg) 45°as45°
800 lux	$y = 0,4699x + 0,5103$ $R^2 = 0,793$	$y = 1,2845x - 1,8365$ $R^2 = 0,8748$
2400 lux	$y = 0,4559x + 0,7643$ $R^2 = 0,8201$	$y = 1,2663x - 1,5216$ $R^2 = 0,9142$

Como puede apreciarse la correlación visual e instrumental es buena para ambas geometrías y ambos niveles de iluminación, por lo que independientemente del tipo de pigmento de efecto empleado, ya sea habitual o novedoso para la industria, el BYK-mac ofrece buenos resultados instrumentales para el valor de sparkle general.

Como contra partida, como se ha comentado anteriormente, cuando se ha analizado el conjunto de muestras de manera global, no había correlación inter-instrumental entre ambos modelos de medida. Esto no quiere decir necesariamente que el modelo propuesto por el IO-CSIC no se correlacione con los datos visuales proporcionados por el conjunto de observadores, ya que como se ha visto en el capítulo anterior (Capítulo 4), pese a no existir correlación entre las dos variables parciales de medida del BYK-mac (intensidad y área) y los valores visuales, la correlación visual e instrumental final obtenida es buena.

Queda pendiente en un futuro próximo poder obtener una ecuación de sparkle general ( $S_G$ ) para el algoritmo propuesto por el IO-CSIC y así de ese modo poder analizar la correlación con los datos visuales proporcionados por los observadores.

Hasta el momento no se han analizado los resultados en función de las características de las muestras. En capítulos posteriores (Capítulo 6, Capítulo 7) se analizará de nuevo la correlación entre ambos modelos de medida frente a los resultados visuales (distancia de detección), pero en función de las características de las muestras, ya sea diferenciando por el tamaño y tipo de pigmentos o concentración.

## 5.4 Discusión

Debido a la aparición de nuevos tipos de pigmentos en la industria, se está ante la presencia de nuevos efectos de textura, los cuales son complejos de caracterizar con la instrumentación disponible actualmente. A consecuencia de que los pigmentos del set de Luxan (Eckart) no existían cuando se fabricó y calibró el dispositivo BYK-mac, puede ser una de las razones por las cuales no existe buena correlación inter-instrumental entre ambos algoritmos de medida.

Por el contrario, pese a la aparición de estos nuevos tipos de pigmentos, la correlación visual e instrumental es muy buena para ambas geometrías y niveles de iluminación estudiados, lo cual nos hace afirmar que estamos ante un algoritmo de medida del efecto de textura sparkle sólido y fiable.

Con respecto al modelo propuesto por el IO-CSIC sería importante poder generar un valor de sparkle general ( $S_G$ ) como proporciona el BYK-mac, integrando las variables de sparkle intensidad y sparkle área, ya que a nivel industrial es vital poder manejar un único valor de referencia de textura para cada muestra en función de la geometría, sin diferenciar entre intensidad y área, además de ese modo se podría



*sparkle*

analizar en profundidad la correlación visual e instrumental más fehacientemente, incluso la tarea visual de discriminación.

También será interesante poder estudiar y analizar en un futuro de una forma más extensa, ya sea a través de la tesis doctoral industrial en Merck, el comportamiento de los nuevos tipos de pigmentos existentes en el mercado, cuya aparición ha desencadenado nuevos efectos de textura como el citado “Living Sparkle”.

Llegados a este punto, estamos en condiciones de abordar el núcleo (o parte central) de esta tesis doctoral. Para ello, se han realizado a continuación diversos experimentos, que serán analizados en capítulos posteriores, con el objetivo de comprobar como afectan algunos de los factores citados anteriormente cómo la forma y el tamaño de los pigmentos, la claridad del fondo de la muestra, la concentración/distribución de pigmentos, las condiciones ambientales, etc., aplicando diversos diseños de experimentos (DoE) para optimizar los resultados y analizar la importancia de la interacción de los factores en la detección del sparkle.

## 5.5 Publicaciones

Gómez, O., Micó-Vicent, B., Perales, E., Chorro, E., Viqueira, V., Martínez-Verdú, F. M. “Correlations between concentration of effect pigments, optical measurements and visual assessment of sparkle.”. 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, Prague, September 2016.

Gómez, O.; Perales, E.; Micó-Vicent, B.; Viqueira, V.; Hurabait, K.; Martínez-Verdú, F.M., “Statistical design of experiments applied on sparkle visual detection”, In Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, Lillehammer (Norway), September. 2017.

## Capítulo 6

# Correlación de la distancia de detección del sparkle con el tamaño y forma del pigmento

### 6.1 Introducción

En este capítulo se va a analizar la influencia de dos parámetros estructurales como son el tipo y tamaño del pigmento en la detección del efecto de textura sparkle. Para ello se han seleccionado dos tipos diferentes de pigmentos y un amplio rango de tamaños con el que poder cubrir los tamaños característicos empleados en la industria.

Además de factores como el observador, la muestra y la iluminación, uno de los factores más importantes a la hora de detectar el sparkle es el tipo de pigmento empleado en el recubrimiento. Ya que existen numerosos pigmentos que componen los recubrimientos, a continuación se muestra un esquema para diferenciar entre los pigmentos que le otorgan el color a la muestra y los pigmentos o flakes que producen el efecto de sparkle ([figura 6.1](#)).

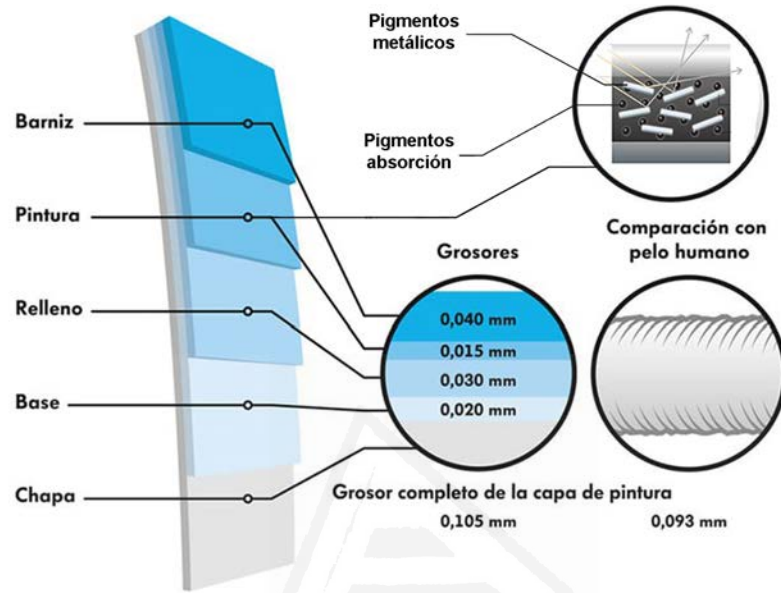


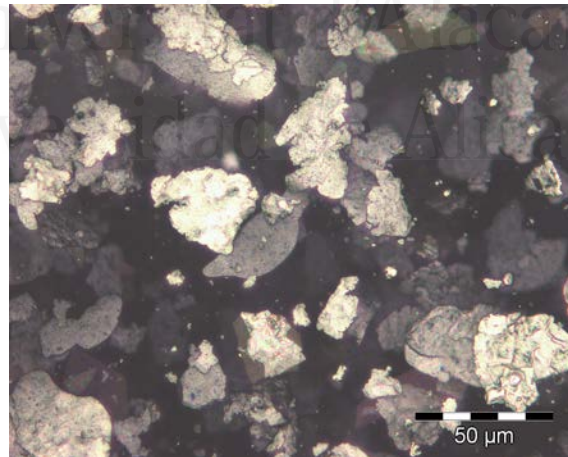
Figura 6.1: Estructura de una pintura para automoción.

Existen numerosos factores que pueden influir a la hora de detectar el sparkle como pueden ser el tamaño, la forma, el espesor y orientación del pigmento, la rugosidad de la superficie, el material con el que está fabricado el pigmento, ya que influye en su reflectividad, el espesor del recubrimiento, la concentración/distribución, el tono, el colorido, la claridad de la muestra, etc (tabla 6.1).

**Tabla 6.1:** Variables de los pigmentos

Morfología	Cornflake, Silverdollar
Tamaño	5 - 50 $\mu\text{m}$
Rugosidad de la superficie	Irregular, plana
Espesor	1 nm - 1 $\mu\text{m}$
Material	Aluminio, cobre, plata, oro, níquel, hierro, titanio, etc
Recubrimiento	Sin recubrimiento, películas PVD, pigmentos de absorción, oxidados y parcialmente oxidados.
Distribución	Leafing, Non-Leafing
Orientación	Paralelos/No paralelos a la superficie.

En este capítulo nos vamos a centrar únicamente en el tipo (morfología) y el tamaño medio del pigmento, y cómo afectan estas variables a la hora de detectar el sparkle. Los dos tipos de pigmentos metálicos más característicos empleados en la industria, son el “Cornflake” y el “Silverdollar”, y el material más habitual es el aluminio. Los pigmentos cornflake (figura 6.2) están caracterizados por que tienen un borde de partícula irregular, producido durante el proceso de molienda. En cambio los pigmentos silverdorllar (figura 6.3) son pigmentos con una superficie relativamente plana y con bordes muy redondeados, como pueden verse en las siguientes imágenes.

**Figura 6.2:** Pigmentos cornflake.

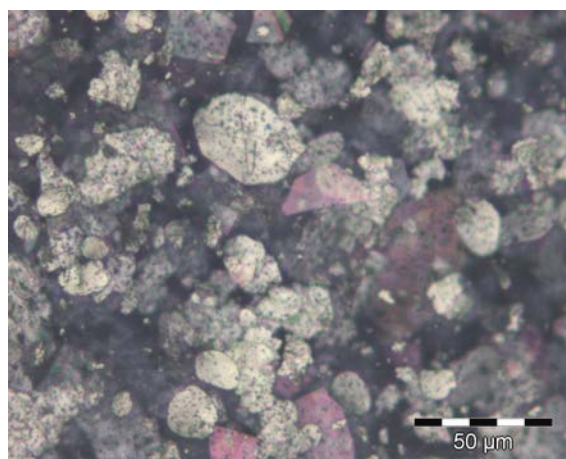


Figura 6.3: Pigmentos silverdollar.

Tanto la superficie y el borde más irregulares son los responsables de una mayor dispersión de la luz difusa típica de los pigmentos *cornflake*. La luz reflejada por estos pigmentos tienen una componente direccional y otra componente de dispersión superpuestas, figura 6.4 izquierda. La cantidad de luz difusa reflejada se incrementa, por lo tanto, con las superficies más irregulares de las partículas y bordes rugosos. Con el aumento de la dispersión de partículas, hay una reducción de brillo. En cambio, los pigmentos *silverdollar* reflejan la luz con una componente direccional dominante acompañada por una componente de dispersión considerablemente menor, figura 6.4 derecha.

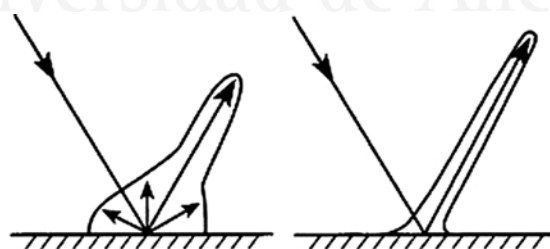


Figura 6.4: Comportamiento óptico de los pigmentos metálicos.

A raíz de esta explicación se plantea la primera hipótesis de este capítulo: ¿Qué tipo de pigmento detectará a mayor distancia el observador?. En principio, y según la teoría, se debería de detectar mejor y a más distancia las muestras con pigmentos del tipo *silverdollar* [55].

Otra de las variables que se ha tenido en cuenta es el tamaño medio del pigmento. Los pigmentos más convencionales tienen unos tamaños que varían entre las 5 micras hasta un máximo cercano a las 50 micras, mientras que el espesor varía entre aproximadamente 100 nm y 1 micra. La segunda hipótesis del capítulo es evaluar cómo afecta el tamaño de pigmento a la distancia de detección del sparkle. Existe un estudio previo [145] que nos incita a pensar que a mayor tamaño de pigmento, a mayor distancia será detectado el efecto de textura sparkle.

Basándonos en la definición de sparkle [7] y en las variables que influyen para su cálculo descritas anteriormente, uno de los factores más influyentes es el grado de intensidad o el sparkle intensidad ( $S_i$ ). Por consecuencia, se va a comentar cómo afecta la distancia a la intensidad del flake y por lo tanto al grado de sparkle. Considerando la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, que es una ley que nos indica que la intensidad de luz disminuye a razón del cuadrado de la distancia al centro donde se origina, por tanto la luz pierde intensidad muy rápidamente según nos alejamos del foco emisor puesto que se reparte en mucha más superficie (figura 6.5).

$$\text{Intensidad} \propto \frac{1}{\text{Distancia}^2} \quad (6.1.1)$$

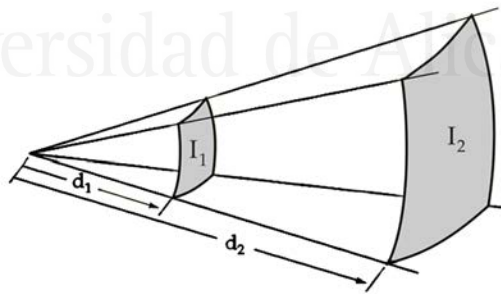


Figura 6.5: Ley inversa del cuadrado.

Esta teoría extrapolada al sparkle y aplicándola al experimento visual realizado, que se describirá en la siguiente sección, se podría definir con la siguiente ecuación:

$$I_b = I_a * (D_a/D_b)^2 \quad (6.1.2)$$

Lo que significa es que, somos capaces de detectar una intensidad de luz (flake) “ $I_a$ ” a una distancia “ $D_a$ ” de la muestra, si nos movemos a una nueva distancia “ $D_b$ ” de la fuente de luz (flake), entonces la nueva intensidad de luz “ $I_b$ ” detectada será equivalente a la cantidad de luz inicial aumentada o disminuida por la ley de la inversa del cuadrado de la distancia. En conexión con esta teoría está el estudio realizado Kirchner et al. sobre la visibilidad del sparkle en pinturas con pigmentos de efecto metálicos ([35]).

En resumen, nos indica que para cada distancia a la que se sitúe el observador, se obtendrá un grado de sparkle ( $S_G$ ) diferente, hasta el punto en el que el observador no detecte la intensidad de ningún pigmento/flake y por lo tanto el grado de sparkle sea cero.

## 6.2 Materiales y Métodos

Para la realización del experimento psicofísico se diseñó y fabricó una cabina de iluminación especial para la evaluación del sparkle (figura 6.12). Esta cabina viene descrita en secciones anteriores (Sección 2.3.3), y en ella se puede evaluar el efecto de textura sparkle para cualquier ángulo de iluminación, se puede cambiar la fuente de iluminación ( $T_c$ ) y adaptarla según nuestras necesidades (luz día, cálida), al igual que modificar el nivel de iluminación ( $E$ ). En un capítulo posterior se estudiará como afectan todas estas variables de contorno en la detección del sparkle (Capítulo 8).

En este estudio se hizo una primera selección de muestras en base a sus características estructurales, se seleccionaron un total de 12 muestras del proveedor ECKART (tabla 6.2, tabla 6.3) con unas dimensiones de 15x7 cm. en las que se emplea tipos de pigmento iguales o muy similares para ambos subconjuntos, en este caso pigmentos metálicos de aluminio, tanto silverdollar como cornflake indistintamente, y únicamente variaba el tamaño y la colorimetría del fondo de las muestras (figura 6.8).

Tabla 6.2: Muestras Eckart azules

Muestra	Tamaño de Partícula ( $\mu\text{m}$ )	Tipo de Pigmento
4A	50-60	STAPA METALLUX 212
18A	30-36	STAPA ALOXAL PM 4010
12A	22-28	STAPA METALLUX 2153
17A	17-23	STAPA ALOXAL PM 3010
15A	12-18	STAPA METALLUX 2192
24A	app. 10	STAPA 15 n.l.

Tabla 6.3: Muestras Eckart grises

Muestra	Tamaño de Partícula ( $\mu\text{m}$ )	Tipo de Pigmento
4G	50-60	STAPA METALLUX 212
5G	31-37	STAPA METALLUX 214
12G	22-28	STAPA METALLUX 2153
13G	17-23	STAPA METALLUX 2154
15G	12-18	STAPA METALLUX 2192
24G	app. 10	STAPA 15 n.l.



Figura 6.6: Muestras Eckart.



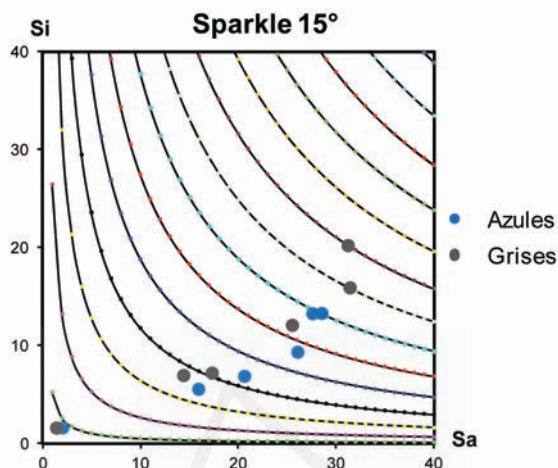


Figura 6.7: Distribución de las muestras Eckart en la gráfica característica de sparkle.

Concretamente para este primer experimento se empleó un nivel de iluminación de 800 lux y una temperatura de color de 2400K. La fuente de iluminación estaba situada a una distancia de 30 centímetros de la muestra y la geometría de iluminación empleada es la de 15°as15°. También se empleó una máscara de 7x7 cm. para limitar el área de visualización de la muestra, además la altura de los ojos de los observadores se situaba a la misma altura de la posición de la lámpara.

Con este estudio se pretendía asentar la metodología del experimento psicofísico para posteriormente aplicar el diseño de experimentos, y, de ese modo, poder evaluar qué variables afectan en mayor grado a la detección del efecto de textura sparkle.

Estas muestras a su vez, se caracterizaron instrumentalmente, para su posterior comparación con los resultados visuales. Se obtuvieron los valores colorimétricos mediante el espectrofotómetro multiángulo X-Rite MA 98, al igual que los valores de textura, en este caso de sparkle y graininess, mediante el espectrofotómetro multiángulo BYK-mac (tabla 6.4, tabla 6.5). La razón de emplear el dispositivo X-Rite MA98 para caracterizar colorimétricamente las muestras es debido a que el BYK-mac no puede medir el color para la geometría 15°as15°.

Tabla 6.4: Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras azules

Muestra	L* 15	a* 15	b* 15	C* 15	h 15	SG 15	Si 15	Sa 15
4A	81,09	-52,16	-48,88	71,48	223,14	5,89	13,23	27,63
18A	74,81	-51,78	-32,01	60,87	211,73	6,01	13,26	28,55
12A	87,63	-52,22	-43,21	67,78	219,60	4,66	9,31	26,09
17A	87,44	-55,01	-32,89	64,10	210,88	3,36	6,85	20,66
15A	103,68	-51,74	-40,63	65,79	218,14	2,49	5,52	15,96
24A	91,96	-40,30	-31,15	50,94	217,70	0,00	1,58	2,05

Tabla 6.5: Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras grises

Muestra	L* 15	a* 15	b* 15	C* 15	h 15	SG 15	Si 15	Sa 15
4G	146,02	-0,23	0,82	0,85	105,90	7,99	20,19	31,24
5G	142,95	-0,25	1,48	1,50	99,45	7,00	17,30	28,70
12G	145,70	-0,15	2,61	2,62	93,21	5,34	12,05	25,54
13G	148,80	-0,23	2,42	2,43	95,41	3,75	8,77	19,30
15G	149,47	-0,35	1,59	1,63	102,55	2,70	6,93	14,43
24G	127,09	-0,67	0,57	0,88	139,45	0,00	1,57	1,43

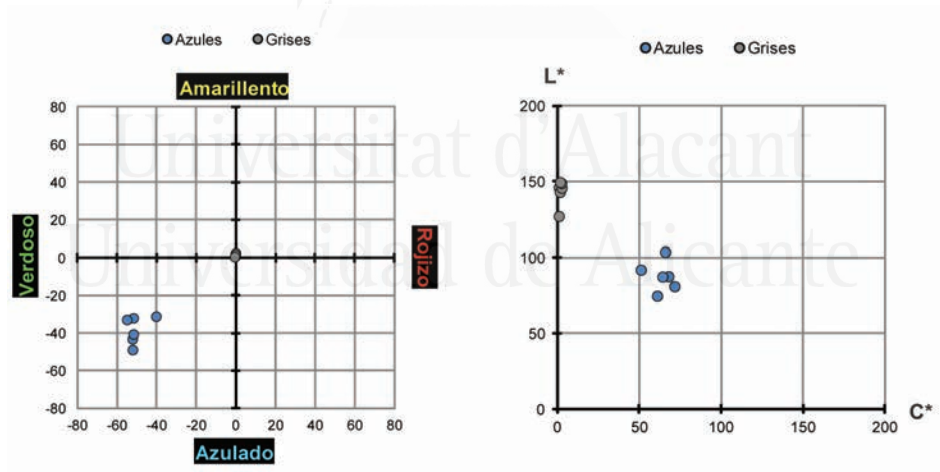


Figura 6.8: Colorimetría muestras Eckart para la geometría 15°as15°.

Una vez asentada la metodología experimental con este conjunto de muestras inicial, se diseñó un nuevo experimento visual al cual se aplicó el diseño de expe-

rimentos (DoE) para poder evaluar qué variables afectan más al observador a la hora de detectar el sparkle.

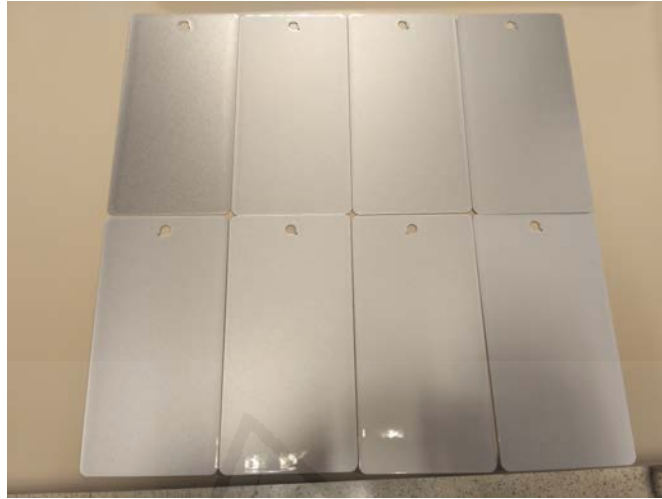
Para ello se disponía de un amplio número de muestras con unos tamaños variables de pigmentos metálicos de aluminio, suficientes para cubrir todo el rango de tamaños usados principalmente en la industria. Además de los diferentes tamaños, se decidió analizar la variable del tipo de pigmento, en este caso los más usados a nivel industrial, los pigmentos silverdollar y cornflake (tabla 6.6, tabla 6.8). Todas las muestras, en este caso se realizó una selección de 18 en total, 9 por cada subconjunto de pigmentos, poseen una colorimetría similar, ya que era de suma importancia que el color del fondo no intercediera a la hora de realizar las valoraciones visuales, para ello también se obtuvieron los valores instrumentales del dispositivo X-Rite MA98 y BYK-mac, tanto colorimétricos como de textura respectivamente (tabla 6.7, tabla 6.9). En capítulos posteriores se estudiará la influencia de la colorimetría/claridad de la muestra a la hora de detectar el efecto de textura (Capítulo 7).

Tabla 6.6: Muestras con pigmentos silverdollar

Muestra	Tamaño de Partícula ( $\mu\text{m}$ )	Tipo de Pigmento
Stapa Metallux 214	35	Silver Dollar
AluMotion S34-01	34	Silver Dollar
Stapa Metallux 2153	25	Silver Dollar
AluMotion S18-03	18	Silver Dollar
Stapa Metallux 2156	17	Silver Dollar
AluMotion S16-01	16	Silver Dollar
Stapa Metallux 2192	15	Silver Dollar
AluMotion S14-01	14	Silver Dollar
Stapa Metallux 2197	9	Silver Dollar

Tabla 6.7: Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras con pigmentos silverdollar

Muestra	L* 15	a* 15	b* 15	C* 15	h 15	SG 15	Si 15	Sa 15	SG 45	Si 45	Sa 45
Stapa Metallux 214	155,75	-0,14	1,02	1,03	97,53	8,83	22,65	33,43	7,02	19,33	25,80
AluMotion S34-01	174,81	-0,45	2,81	2,85	99,10	8,40	21,04	32,85	6,02	16,85	22,53
Stapa Metallux 2153	156,91	-0,29	1,05	1,09	105,32	6,76	15,09	30,95	7,27	19,83	26,78
AluMotion S18-03	166,92	-0,64	1,17	1,33	118,54	3,33	7,75	18,00	4,09	8,02	24,29
Stapa Metallux 2156	155,12	-0,41	0,22	0,46	151,94	3,75	8,86	19,09	4,99	10,06	27,18
AluMotion S16-01	160,43	-0,53	2,08	2,14	104,23	3,43	7,67	19,06	4,32	8,45	25,31
Stapa Metallux 2192	148,80	-0,46	0,47	0,66	133,96	3,02	7,25	16,48	4,45	8,40	26,80
AluMotion S14-01	174,10	-0,71	1,31	1,49	118,47	2,80	6,78	15,56	5,00	9,84	27,95
Stapa Metallux 2197	128,49	-0,61	-0,11	0,62	190,13	0,57	3,02	5,05	1,60	3,17	14,89



**Figura 6.9:** Muestras con pigmentos silverdollar.

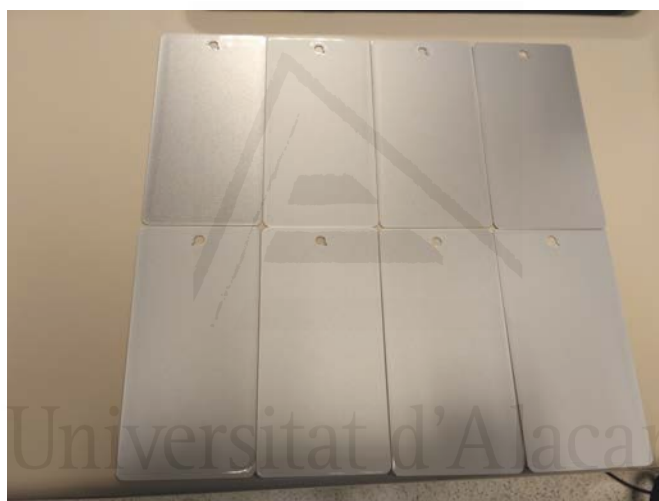
**Tabla 6.8:** Muestras con pigmentos cornflake

Muestra	Tamaño de Partícula ( $\mu\text{m}$ )	Tipo de Pigmento
Stapa Metallic 201	35	Cornflake
Stapa Mobillux 161	26	Cornflake
AluMotion C24-02	24	Cornflake
AluMotion C22-01	22	Cornflake
Stapa Metallic 501	21	Cornflake
AluMotion C18-01	18	Cornflake
Stapa Metallic 801	14	Cornflake
AluMotion C11-02	11	Cornflake
Stapa 1515	10	Cornflake

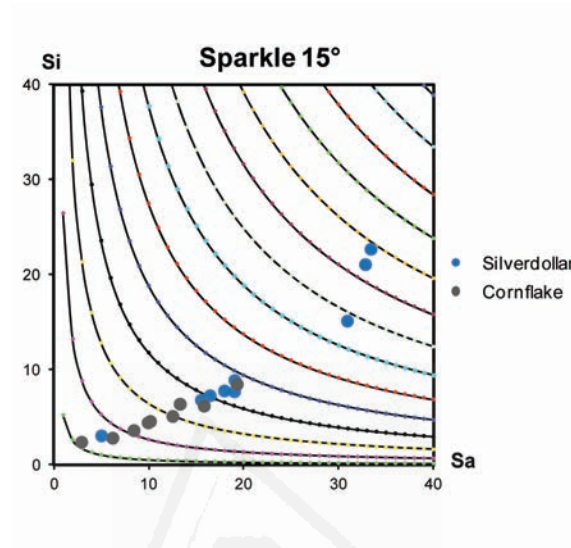
pigmento

**Tabla 6.9:** Valores instrumentales del X-Rite MA98 y BYK-mac para las muestras con pigmentos cornflake

Muestra	L* 15	a* 15	b* 15	C* 15	h 15	SG 15	Si 15	Sa 15	SG 45	Si 45	Sa 45
Stapa Metallic 201	148,09	-0,42	0,86	0,96	115,90	3,67	8,44	19,33	4,60	9,08	26,25
Stapa Mobillux 161	142,66	-0,32	1,08	1,12	106,30	2,66	6,15	15,86	3,87	7,23	24,61
AluMotion C24-02	159,19	-0,43	1,98	2,02	102,27	2,42	6,35	13,32	3,51	6,27	24,22
AluMotion C22-01	146,99	-0,78	1,09	1,34	125,37	1,99	5,07	12,55	2,84	5,18	20,83
Stapa Metallic 501	130,55	-0,42	1,18	1,25	109,49	1,58	4,53	10,19	2,61	4,74	19,98
AluMotion C18-01	147,79	-0,79	0,55	0,96	145,12	1,52	4,40	9,95	2,12	3,99	17,38
Stapa Metallic 801	124,61	-0,44	0,88	0,98	116,30	1,12	3,58	8,45	1,99	3,80	16,79
AluMotion C11-02	139,28	-0,74	0,54	0,92	143,73	0,12	2,35	2,94	0,64	2,34	7,22
Stapa 1515	115,59	-0,56	0,25	0,61	155,94	0,66	2,78	6,22	1,14	2,80	11,01



**Figura 6.10:** Muestras con pigmentos cornflake.



**Figura 6.11:** Distribución de las muestras con pigmentos silverdollar y cornflake en la gráfica característica de sparkle.

Para este nuevo experimento se ha empleado una fuente de iluminación de luz de día (6500 K), con un nivel de iluminación de 800 lux. El ángulo de iluminación estudiado es el de  $15^\circ$  a  $15^\circ$  o  $15^\circ \times 0^\circ$ . La razón de utilizar este ángulo es debido a que el dispositivo comercial también produce sus medidas de sparkle en este mismo ángulo y se ha escogido para poder realizar una comparación de datos posterior y así de este modo realizar un análisis de correlación visual e instrumental.

Se emplearon en ambos experimentos un total de 12 observadores (6 hombres y 6 mujeres), con un estado de visión bueno (con su corrección habitual). A todos ellos se les explicó claramente el concepto de sparkle para no conllevar a equívocos, y se les realizó pruebas para comprobar si habían asimilado el concepto, ya que de todos los observadores algunos eran expertos en el tema a evaluar, y otros era la primera vez que se sometían a este tipo de estudio.

El método psicofísico empleado, es el método del ajuste, que ha sido descrito en detalle en el estado del arte (2.3.5) y que consiste en que el observador debe ajustar o manipular la intensidad del estímulo (sparkle) hasta que sea capaz de percibirlo, o en este caso, que no sea capaz de detectarlo.

Al igual que en el experimento previo realizado, cada medida que realizaban los observadores consistía en la evaluación de la distancia de detección máxima a la cual ellos detectaban el efecto de textura sparkle. Para ello realizaban deslizando

sobre una silla ajustable para alinear los ojos con la altura de la lámpara y el centro de la muestra (figura 6.12), una primera medida alejándose de la muestra hasta que dejaban de detectar el efecto, y posteriormente se iban acercando a la muestra hasta que detectaban de nuevo la textura, así una medida del experimento consistía en tres evaluaciones alejándose de la muestra y tres evaluaciones acercándose, y este proceso lo realizaban por tres repeticiones. Para la realización de las evaluaciones visuales se empleó una máscara para acotar el área de visualización de la muestra, se tenía un área de 7x7cm. En total para ambos experimentos se realizaron 6.480 evaluaciones visuales en total.



Figura 6.12: Cabina de iluminación de la Universidad de Alicante.

Este método resulta el más cómodo para los observadores que lo usan porque son ellos mismos, y no el experimentador, quienes manipulan personalmente la intensidad del estímulo, aumentando su valor en los “Ensayos Ascendentes” o disminuyendo su valor en los “Ensayos Descendentes”, lo cual hace que resulten altamente motivados los observadores.

Una vez finalizado el experimento psicofísico y recopilados todos los datos correspondientes por cada observador, se procedió a analizar la inter-variabilidad e intra-variabilidad entre los observadores, para cerciorarse de que todas las valoraciones han sido en su mayoría coherentes. Para ello se empleó la fórmula de *STRESS*, citada y descrita en secciones anteriores (2.3.6).

En el diseño de experimento (DoE) se optó por un diseño factorial de  $2^2$  (tabla 6.10), puesto que se tienen dos variables (tamaño y forma) a dos niveles diferentes. Por lo que para el diseño de experimentos se emplearon 4 muestras de las anteriormente descritas, en concreto, dos muestras con un tipo de pigmento silverdollar y dos tamaños de pigmento diferentes, y dos muestras con pigmento cornflake y dos tamaños diferentes. Una vez obtenidos estos resultados iniciales, posteriormente se procedió a la parametrización con las 14 muestras restantes, para dar consistencia a los resultados obtenidos en el diseño de experimentos.

**Tabla 6.10:** Diseño de experimentos

Paso 1: Definir las variables respuesta a ser medidas				
<b>Nombre</b> Distancia	<b>Unidades</b> cm	<b>Analizar</b> Media	<b>Objetivo</b> Maximizar	
Paso 2: Definir los factores experimentales a variar				
<b>Nombre</b> A: Tamaño B: Tipo	<b>Tipo</b> Continuo Continuo	<b>Papel</b> Controlable Controlable	<b>Bajo</b> -1 -1	<b>Alto</b> 1 1
Paso 3: Seleccione el diseño experimental				
<b>Tipo</b> Factores Proceso	<b>Diseño</b> Tipo Factorial $2^2$	<b>Puntos Centrales</b> Por bloque 0	<b>Punto Central</b> Colocación Aleatorio	<b>Diseño es</b> Aleatorizable Sí

## 6.3 Resultados

Debido a la diversidad de experimentos realizados en este capítulo, se va a proceder con los resultados de los mismos de la manera más clara y concisa posible.

Ante la falta de investigaciones y referencias en este campo, sobre todo de experimentos psicofísicos relacionados con el efecto de textura sparkle, se procedió en primer lugar a realizar un primer experimento preliminar para asentar la metodología. En él se comenzó variando únicamente el tamaño de pigmento para analizar su influencia sobre la percepción del sparkle.

En primer lugar se realizó el análisis de la variabilidad inter-observador e intra-observador mediante la fórmula de STRESS descrita en capítulos anteriores. Para este primer experimento preliminar se obtuvieron unos valores de STRESS muy buenos, obteniéndose una variabilidad inter-observador media de 19.67 unidades y una variabilidad intra-observador media de 10.54 unidades. Viendo la siguiente gráfica, se observa que existe una mejor correlación para las muestras con tonos grises, ya que a menor índice de STRESS existe mejor correlación. El análisis intra-observador no aporta información relevante.





Figura 6.13: Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico preliminar del análisis de la influencia del tamaño y forma del pigmento.

En los resultados obtenidos se observó una clara tendencia de que a mayor tamaño de pigmento, mayor distancia de detección del efecto sparkle. Sin embargo, esta relación resultó no ser lineal, ya que para ambos conjuntos de muestras a partir de un tamaño de partícula de  $30 \mu\text{m}$  se produce paulatinamente una saturación. Como ejemplo, para el conjunto de muestras cromáticas, los observadores detectan a mayor distancia la muestra con un tamaño de  $34 \mu\text{m}$  que la de tamaño  $55 \mu\text{m}$ . Lo mismo ocurre para el conjunto de muestras acromáticas (figura 6.14). Los errores verticales se encuentran dentro del tamaño del símbolo.

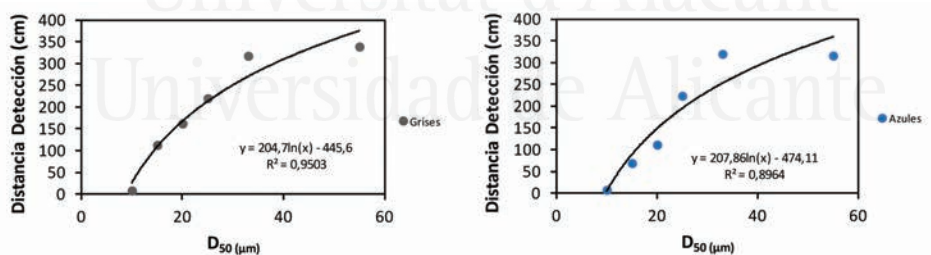


Figura 6.14: Distancia media de detección vs tamaño de pigmento ( $D_{50}$ ).

De igual forma, se realizó una comparación de los resultados visuales con los resultados instrumentales obtenidos del BYK-mac, tanto las variables parciales sparkle intensidad y área (figura 6.15) y el sparkle general, y se observó una muy buena correlación en todos los casos, donde el coeficiente de correlación obtenido más bajo es  $R^2 = 0,8205$ . La figura 6.16 muestra la relación entre el valor de sparkle

instrumental proporcionado por el BYK-mac y la distancia de detección media evaluada por los observadores en el experimento visual.

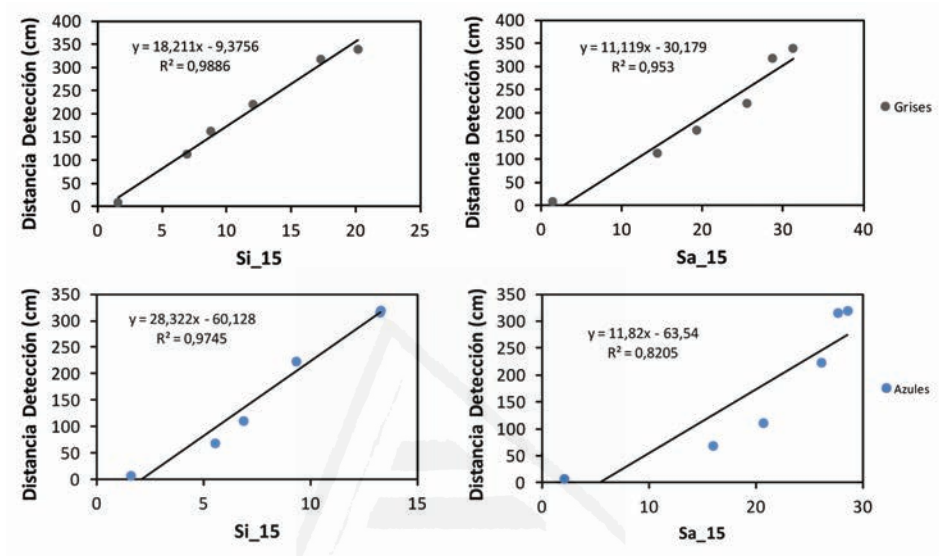


Figura 6.15: Distancia media de detección vs sparkle área y sparkle intensidad.

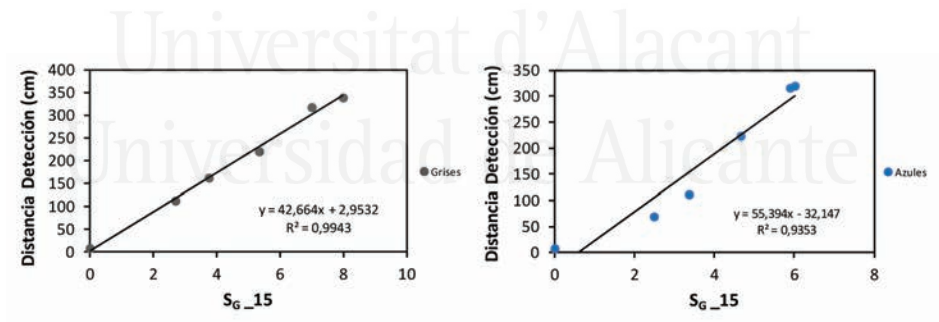


Figura 6.16: Distancia media de detección vs grado de sparkle del BYK-mac ( $S_G$ ).

pigmento

También se optó por comparar los datos instrumentales de sparkle del BYK-mac frente al tamaño medio de pigmento de cada muestra, y se obtuvieron unos resultados muy similares a los encontrados en la comparación entre la distancia media de detección frente al tamaño medio de pigmento. Se observó que a mayor tamaño de pigmento el grado sparkle es mayor, pero la relación no es lineal, sino que se produce una saturación al llegar a un tamaño de pigmento determinado (figura 6.17).

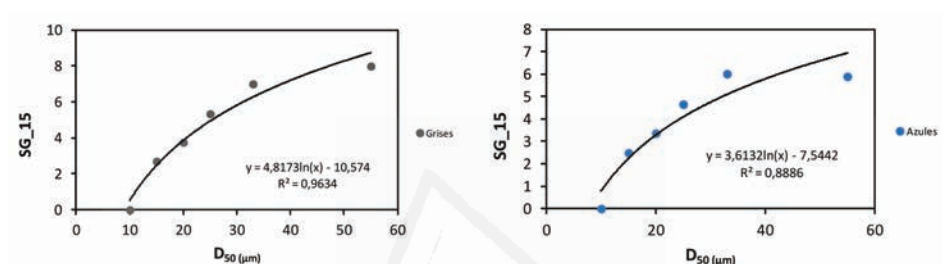
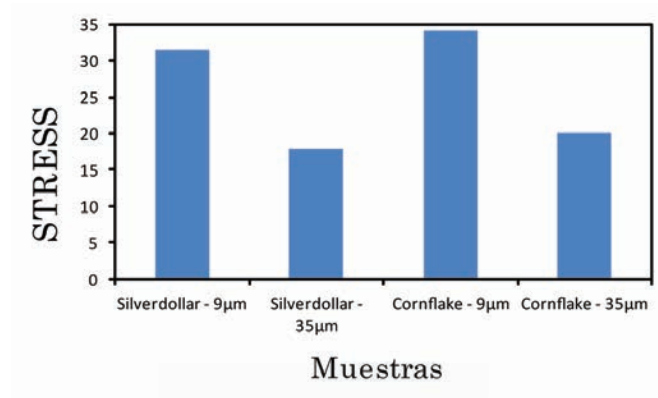


Figura 6.17: Grado de sparkle del BYK-mac (SG) vs tamaño de pigmento (D<sub>50</sub>).

### 6.3.1 Análisis DoE

Una vez realizado el estudio preliminar y asentada la metodología del experimento psicofísico, se aplicó el diseño de experimentos (DoE) para optimizar la cantidad de muestras y experimentos necesarios en el segundo experimento, puesto que en este nuevo se añadiría una nueva variable, como es la forma del pigmento, lo que provocó un aumento de la cantidad de muestras y evaluaciones visuales a realizar por parte de los observadores.

Para este nuevo experimento psicofísico se realizó de nuevo el análisis de inter-variabilidad e intra-variabilidad de los observadores empleados durante el experimento. La variabilidad inter-observador obtenida en este segundo experimento fue de 24.61 unidades de STRESS, y la variabilidad intra-observador fue de 11.95 unidades de STRESS. Son unos valores muy buenos que corroboran que las valoraciones visuales realizadas durante el experimento son fiables y correctas. De nuevo el análisis intra-observador no es relevante.



**Figura 6.18:** Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico para el análisis de la influencia del tamaño y forma del pigmento.

El diseño de experimentos se aplicó inicialmente sobre cuatro muestras características del nuevo conjunto de muestras, en concreto sobre dos muestras con un tipo de pigmento silverdollar y con tamaños de partícula mínimo y máximo, y a su vez sobre dos muestras con tipo de pigmento cornflake y tamaños de partículas mínimo y máximo igualmente. Para el diseño de experimentos propuesto, se observó la interacción de ambas variables (tamaño - cuantitativa y forma - cualitativa) además de los valores óptimos de respuesta.

Los resultados obtenidos del diseño de experimentos nos indican que para un tamaño pequeño de pigmento no existen diferencias entre seleccionar un tipo de pigmento u otro, ya que no se detecta nunca sparkle. En cambio, para un tamaño de pigmento grande, el tipo de pigmento influye, siendo el tipo silverdollar el que se detecta a mayor distancia. Este resultado viene a corroborar lo citado en secciones anteriores (2.2.1), además de lo descrito teóricamente en la bibliografía [55]. Esta tendencia se puede observar analizando los datos obtenidos del diseño de experimentos (figura 6.19), en el que se observa con claridad que a tamaños de pigmento lo suficientemente grandes como para ser detectados por el observador, el tipo de pigmento silverdollar es el que se detecta a mayor distancia.

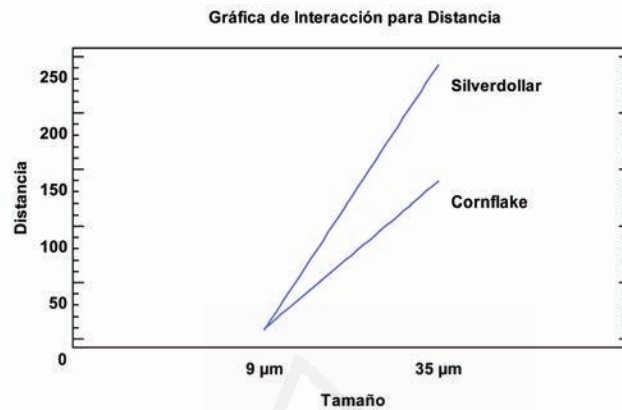
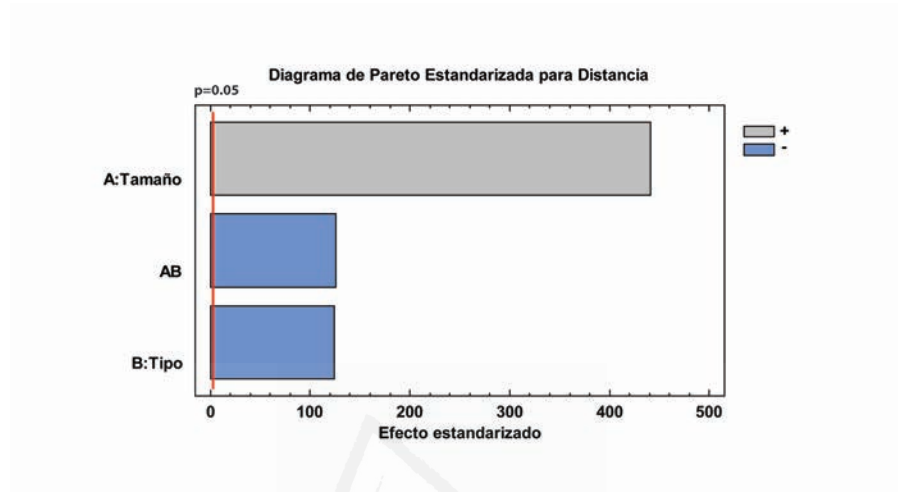


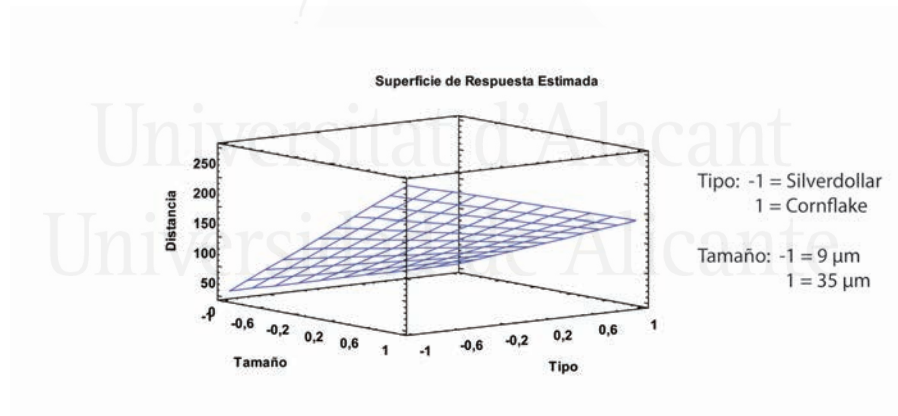
Figura 6.19: Interacción de la forma y el tamaño del pigmento en función de la distancia de detección del sparkle.

Otro aspecto importante a tener en cuenta y que el diseño de experimentos nos proporciona valiosa información gracias al diagrama de Pareto, es el referente a la interacción de las variables estudiadas. En este estudio se ha obtenido que todos los factores a analizar (tamaño y forma) y la interacción entre ambos son significativos (figura 6.20). Esto es debido a que como se ha descrito anteriormente, el factor más importante es el tamaño, puesto que si el tamaño es demasiado pequeño, el observador no detectará sparkle, por lo que el tipo de pigmento influirá en la percepción del sparkle, siempre y cuando el tamaño de pigmento sea lo suficientemente grande para que el observador pueda detectar el efecto de textura.

En relación a la parametrización que a continuación se describirá, el diseño de experimentos proporciona una gráfica en la que se estima la superficie de respuesta en relación a los resultados obtenidos. En el gráfico tridimensional (figura 6.21) se observa el efecto de las dos variables, tamaño y forma, con respecto a la distancia. Se visualiza que para un tipo de pigmento silverdollar y un tamaño grande (35  $\mu\text{m}$ ), la distancia de detección del sparkle se maximiza.



**Figura 6.20:** Diagrama de Pareto para las variables tamaño y forma del pigmento metálico en la distancia de detección del sparkle.



**Figura 6.21:** Superficie de respuesta para las variables tamaño y forma.

Una vez obtenidos estos resultados, se procedió a realizar la parametrización, que consiste en añadir las muestras restantes manteniendo la morfología de los pigmentos (silverdollar y cornflake) e introduciendo nuevos tamaños de pigmentos para corroborar que los resultados obtenidos previamente en el diseño de experimentos se confirman. Con los resultados recopilados de las 18 muestras, se procedió a rea-

lizar un ajuste matemático en el que estaban involucrados las variables a estudiar frente a la distancia. El mejor modelo de regresión para estos datos es el de un polinomio de segundo orden incluyendo la variable cualitativa del tipo de pigmento (figura 6.22).

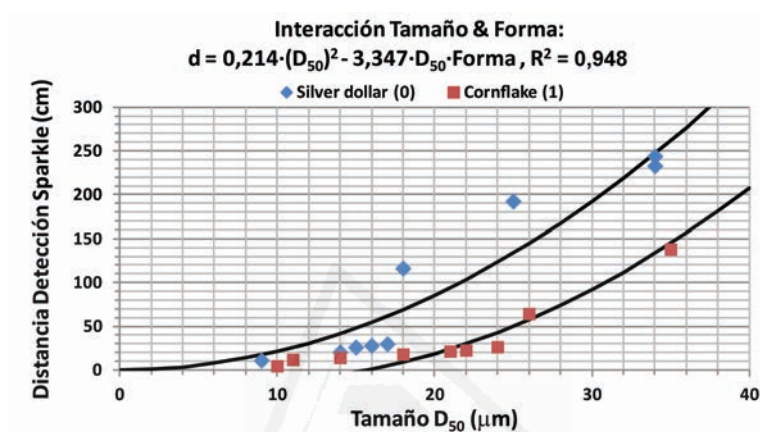
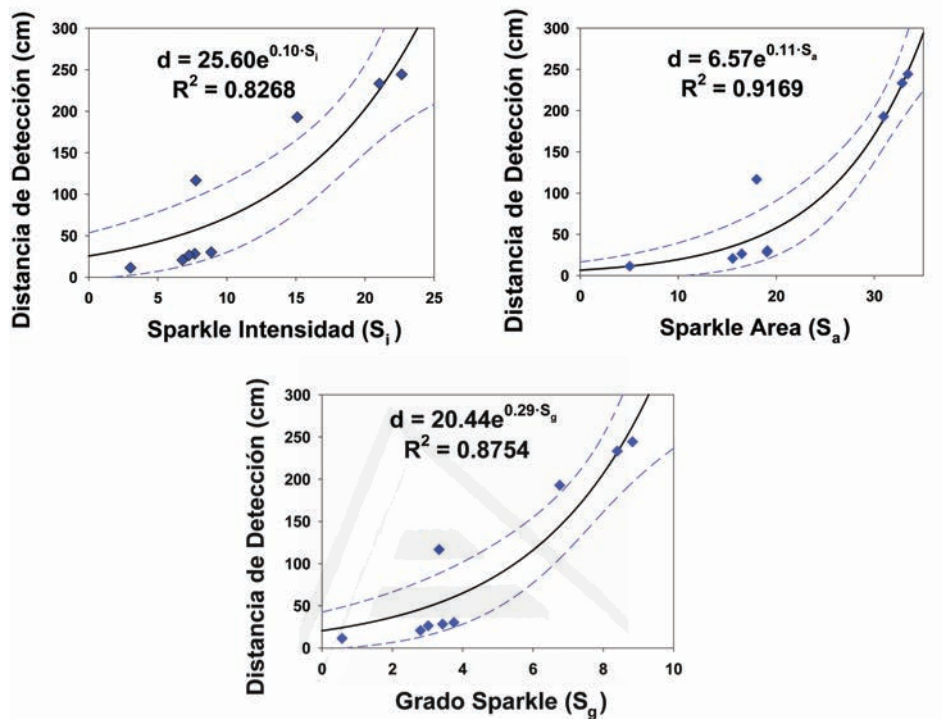


Figura 6.22: Ajuste matemático de todas las muestras.

En esta figura se obtiene una fórmula matemática en la que se incluye tanto la variable cualitativa como la cuantitativa, en nuestro caso el tipo y el tamaño de pigmento, en función de la distancia. Se obtiene un ajuste muy bueno con un valor cercano al 95 %.

$$d = 0,214 * (D_{50})^2 - 3,347 * D_{50} * Forma \quad (6.3.1)$$

Otro aspecto de interés es analizar cómo influyen las variables de medida del sparkle en la distancia de detección, por lo que se realizó nuevamente un ajuste matemático en función de cada parámetro de medida, en este caso el sparkle área, sparkle intensidad y el sparkle general, y de este modo obtener ecuaciones de ajuste distintas en función de cada parámetro de medida, como muestran las figuras siguientes.



**Figura 6.23:** Ajuste de las variables de sparkle con bandas de confianza al 95 % para pigmentos silverdollar.

Se observa muy buen ajuste para el sparkle general y para las dos variables de medida, de esta forma se pretende poder realizar una predicción instrumental en función de cualquier distancia de detección dada para cualquier muestra con pigmentos silverdollar en su formulación, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$d = 25,60 e^{0,10 \cdot S_i} \quad (6.3.2)$$

$$d = 6,57 e^{0,11 \cdot S_a} \quad (6.3.3)$$

$$d = 20,44 e^{0,29 \cdot S_g} \quad (6.3.4)$$



Del mismo modo, en la figura 6.24 se observa el mismo ajuste matemático pero en este caso para pigmentos cornflake, obteniéndose unos valores muy buenos de ajuste gracias a las siguientes ecuaciones:

$$d = 2,07 e^{0,50*S_i} \quad (6.3.5)$$

$$d = 1,55 e^{0,23*S_a} \quad (6.3.6)$$

$$d = 4,01 e^{0,97*S_G} \quad (6.3.7)$$

De este modo se puede predecir instrumentalmente a qué distancia sería detectado el efecto de textura sparkle en función del tipo de pigmento empleado.

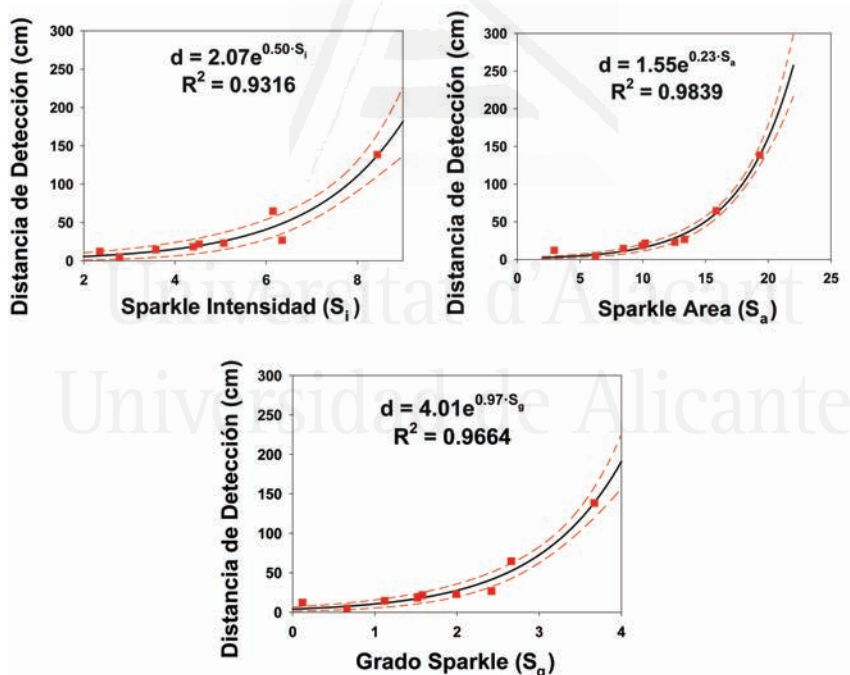


Figura 6.24: Ajuste de las variables de sparkle con bandas de confianza al 95% para pigmentos cornflake.

Como apunte de estos últimos ajustes matemáticos, se observa un mejor ajuste para el parámetro de sparkle área que para el sparkle intensidad para ambos tipos de pigmento. Y esto puede ser debido a que como se ha citado anteriormente, experimentalmente, y para este conjunto de muestras en concreto, el factor más importante es el tamaño o área del pigmento, ya que para el observador es altamente influyente el tamaño del pigmento a la hora de detectar el efecto de textura sparkle.

### 6.3.2 Validación inter-instrumental y visual

Como continuación del trabajo realizado en el segundo capítulo de esta tesis, se analizó la correlación inter-instrumental entre ambos instrumentos (BYK-mac y GEFE) y el resultado fue bueno. Se analizaron las muestras empleadas en el segundo experimento psicofísico (tabla 6.6, tabla 6.8), y se obtuvo que para estos conjuntos de muestras la correlación es buena para ambas variables en todas las geometrías de medida estudiadas, como muestra la tabla 6.11 y la figura 6.25.

**Tabla 6.11:** Correlación inter-instrumental de muestras con pigmentos metálicos

	Densidad/Sa	Contraste/Si
15°as15°	$y = 0,0622x + 3,3484$ $R^2 = 0,9491$	$y = 0,0643x + 0,8128$ $R^2 = 0,9502$
45°as45°	$y = 0,0552x + 2,7617$ $R^2 = 0,8142$	$y = 0,0474x + 0,7784$ $R^2 = 0,9295$
75°as75°	$y = 0,0724x + 2,4925$ $R^2 = 0,8738$	$y = 0,0376x + 0,7638$ $R^2 = 0,7645$

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

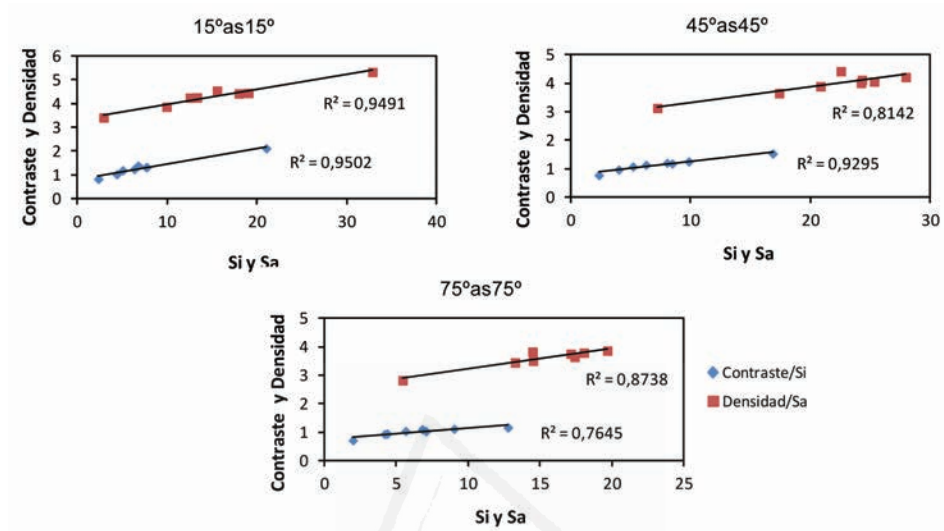
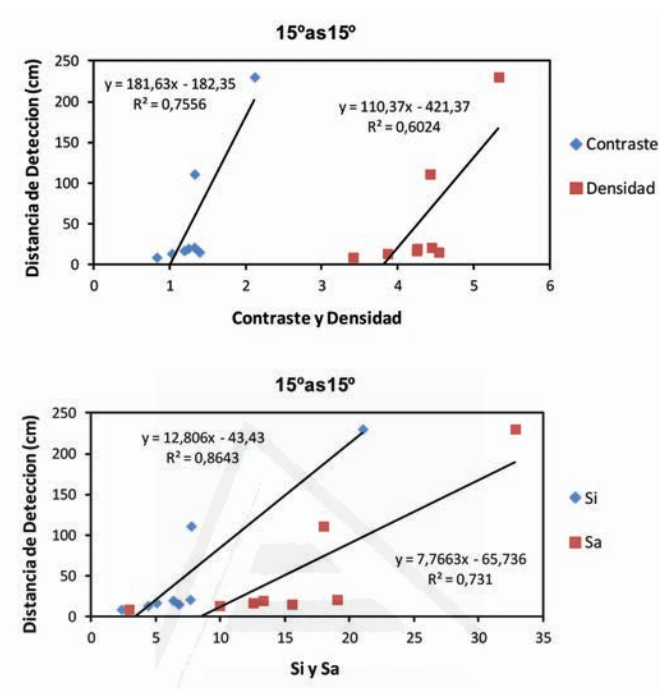


Figura 6.25: Correlación inter-instrumental de sparkle de muestras con pigmentos metálicos.

Una vez analizada la correlación entre ambos algoritmos/modelos, se procedió a analizar los datos con respecto a las valoraciones visuales obtenidas del experimento psicofísico de detección de sparkle diseñado con este tipo de muestras, el cual se estudió únicamente para la geometría de 15°as15°, y los resultados fueron aceptables para la variable contraste/ $S_i$  ( $R^2 = 0,75$ ), en cambio para la variable densidad/ $S_a$  los valores obtenidos no son buenos ( $R^2 = 0,60$ ), obteniéndose una correlación visual e instrumental ligeramente superior para el dispositivo BYK-mac, como puede apreciarse en la figura 6.26.



**Figura 6.26:** Correlación inter-instrumental y visual de muestras con pigmentos metálicos, tanto para el BYK-mac y GEFE.

A diferencia de los resultados obtenidos en el [Capítulo 5](#), en esta ocasión se ha obtenido una mejor correlación, tanto inter-instrumentalmente como frente a los resultados visuales. Esto podría ser debido a que los pigmentos metálicos son más habituales en la industria y tienen un comportamiento visual diferente a los pigmentos estudiados previamente, lo que puede dar lugar a esa mejor correlación.

## 6.4 Discusión

Gracias a la aplicación del diseño de experimentos ha sido posible el estudio de qué variable es más significativa a la hora de detectar el sparkle, y, qué relación existe entre ellas, llegando a la conclusión de que el tipo de pigmento es más influyente, siempre y cuando el tamaño de pigmento sea lo suficientemente grande para que se detecte el efecto de textura sparkle. El tamaño medio de pigmento mínimo ( $D_{50}$ ) para el conjunto de muestras estudiadas sería de  $15 \mu\text{m}$ , el cual puede estimarse bien con las ecuaciones de correlación.

Por otro lado, también ha sido posible evaluar la correlación visual e instrumental, la cual ha sido buena pese a que para muestras con tamaños de pigmentos pequeños los observadores no fueron capaces de detectar el efecto de textura. Esto es debido al algoritmo interno empleado en el BYK-mac, el cual siempre da un valor de sparkle general independientemente de que el tamaño de pigmento sea muy pequeño, en cambio el observador para ciertos tamaños de partícula ( $D_{50} < 15 \mu\text{m}$ ) no es capaz de percibir el destello característico del sparkle y por lo tanto no detecta el efecto de textura.

Gracias al análisis de todos los datos visuales e instrumentales, y su posterior ajuste matemático, se pudo extraer en primer lugar una ecuación matemática capaz de predecir la distancia a la cual una muestra puede ser detectada en función de la morfología del pigmento y su tamaño medio. A su vez, también se ha podido extraer otra ecuación matemática para determinar instrumentalmente la distancia máxima de detección del sparkle en función de las variables de medida empleadas por el BYK-mac.

En capítulos posteriores se extenderá este método, aplicando de nuevo el análisis estadístico de experimentos (DoE), para comprender la relevancia e interacción de otros parámetros estructurales (concentración de pigmentos), medioambientales (nivel de iluminación, geometría, temperatura de color) y de claridad (fondo oscuro vs claro, croma, etc.) en la distancia de detección del sparkle.

## 6.5 Publicaciones

Gómez, O., Perales, E., Chorro, E., Viqueira, V., Martínez-Verdú, F. M., Ferrero, A., & Campos, J. “Influencia del tamaño de pigmento en la distancia de detección del sparkle”, XI Reunión Nacional de Óptica, Salamanca, Septiembre 2015.

Gómez, O., Perales, E., Chorro, E., Viqueira, V., Martínez-Verdú, F. M., Ferrero, A., & Campos, J. “Influence of the Effect Pigment Size on the Sparkle Detection Distance”. In Color and Imaging Conference (Vol. 2015, No. 1, pp. 175-179). Society for Imaging Science and Technology, Darmstadt, October 2015.

Gómez, O., Micó-Vicent, B., Perales, E., Chorro, E., Viqueira, V., Martínez-Verdú, F. M. “Analysis of the interplay of the pigment shape and size on sparkle detection distance by design of experiments”. 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, Prague, September 2016.

Gómez, O.; Perales, E.; Micó-Vicent, B.; Viqueira, V.; Hurabait, K.; Martínez-Verdú, F.M., “Statistical design of experiments applied on sparkle visual detection”, In Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, Lillehammer (Norway), September. 2017.

## Capítulo 7

# Determinación de la influencia de la concentración/densidad de pigmentos en la distancia de detección del sparkle

### 7.1 Introducción

Además de las propiedades ópticas de los pigmentos de efecto, la apariencia visual de estos pigmentos puede estar influenciada también por la concentración/densidad y por el color del fondo de la muestra. En este capítulo se van a describir las variaciones en cuanto a textura en función de la concentración/densidad de pigmentos empleados en la composición de la pintura y en su claridad de fondo, en este caso sobre fondo blanco y negro.

Sobre la influencia de la colorimetría del fondo de la muestra existen diversos estudios como el de Baba [146]. En nuestro caso es un estudio preliminar, ya que no se disponen de las muestras adecuadas para analizar en profundidad la influencia del tono, colorido y claridad de la muestra en la percepción del sparkle.

#### *-Color de la muestra*

Para tener en cuenta la apariencia del color y la textura, se considera la capa de pintura separada de la del sustrato como se muestra en la [figura 7.1](#)

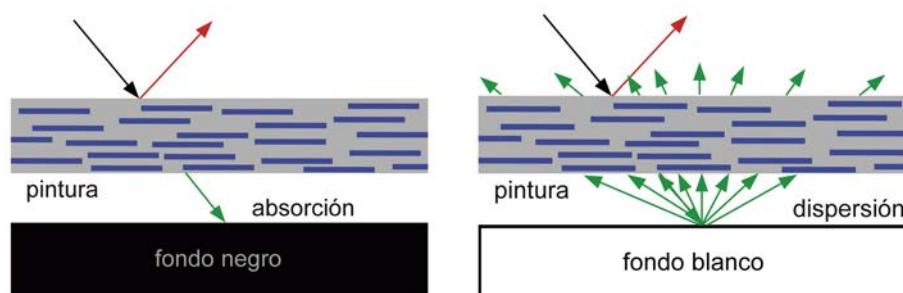


Figura 7.1: Influencia del color en la apariencia del sparkle.

En la capa de pintura, el efecto de la pequeña capa de pigmentos de interferencia amplifica y degrada la luz incidente, simbolizada con un vector negro, en una longitud de onda específica. En la dirección especular, la luz reflejada tiene un color específico de interferencia simbolizado con un vector rojo. La luz transmitida se tinte del color complementario simbolizado con el vector verde. La luz del color complementario se transmite a través de la capa de pintura hasta llegar al fondo.

En la figura 7.1 izquierda, correspondiente a fondo negro, la luz transmitida es mayormente absorbida. Por lo tanto, el color complementario (vector verde) no tiene influencia sobre la apariencia de color final. El color percibido es igual al color del efecto interferencia de la luz reflejada (vector rojo).

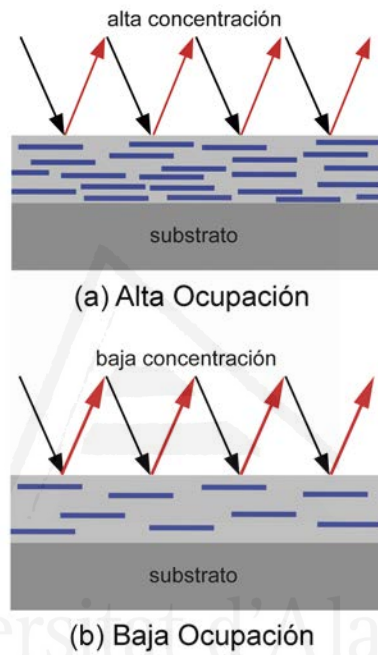
Por el contrario, el fondo blanco dispersa la luz transmitida como se muestra en la figura 7.1 derecha. El intenso efecto de color (vector rojo) en la dirección especular se superpone con un color complementario pálido (vectores verdes), por lo que el color percibido varía con respecto a la muestra con fondo negro.

En cuanto a la percepción de la textura en estos casos concretos, la textura de una superficie está basada en un patrón de diferentes áreas coloreadas. La diferencia de color de los pigmentos “brillantes” con respecto a las áreas pertenecientes al fondo de la muestra hace que percibamos la textura. Por lo tanto, la textura a priori será percibida más fuertemente sobre un fondo de muestra negro.

#### -Disposición de Pigmentos

La disposición de pigmentos se refiere al número o masa de pigmentos de efecto por área de superficie. Esta ocupación puede variar por múltiples razones entre ellas por la concentración de pigmentos (figura 7.2). Generalmente, la concentración máxima de pigmentos decrece cuando aumenta el tamaño de partícula medio ( $D_{50}$ ) de los pigmentos, además también influirá la tecnología de aplicación de la pintura,

como por ejemplo, en el espesor de la capa del recubrimiento, en la orientación de los pigmentos con respecto a la superficie, etc. Hay un estudio previo que muestra como con un aumento de la concentración de pigmentos resulta en un cambio de color pero en un descenso de la intensidad de brillo [147].



**Figura 7.2:** Influencia de la concentración de pigmentos de efecto en la apariencia del sparkle.

El objetivo de este capítulo es determinar la influencia de la concentración de pigmentos en la detección del sparkle para diferentes tipos de pigmentos, siempre manteniendo el tamaño medio constante ( $D_{50}$ ) y para dos colores de fondo acromáticos, blanco y negro, para analizar también la influencia de la claridad en la apariencia del sparkle.



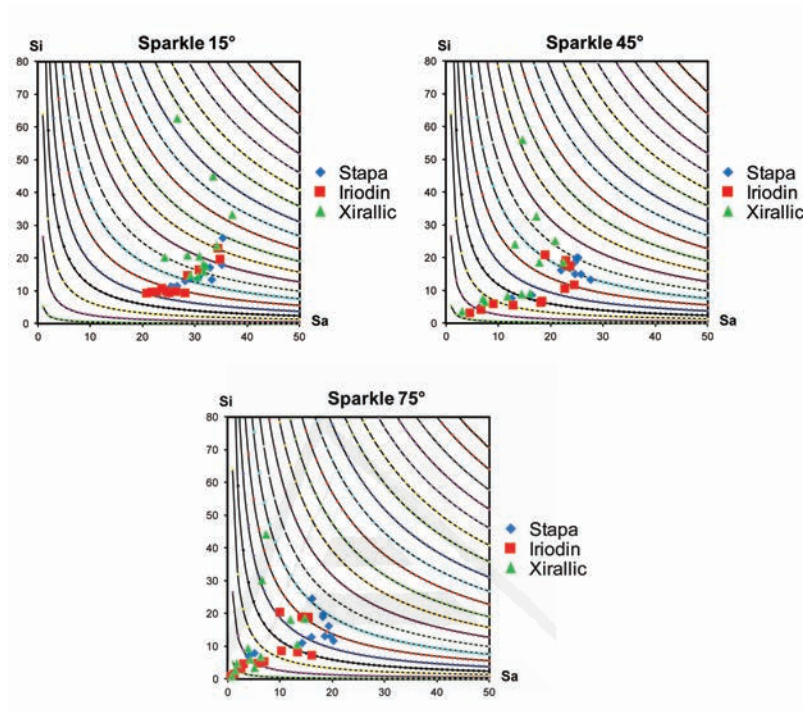
## 7.2 Materiales y Métodos

Se emplearon un total de 36 muestras divididas en dos conjuntos de 18 muestras cada uno con dos colores de fondo (blanco y negro). Las muestras están compuestas por tres tipos de pigmentos diferentes (Stapa, Iriodin y Xirallic) proporcionados por la empresa Merck KGaA. Se conoce la composición de todas las muestras en cuanto al tamaño medio de pigmentos, su concentración en el recubrimiento y con un espesor de capa constante. Se fijó el tamaño medio de los pigmentos y únicamente se varió la concentración para cada muestra, desde un 1.13 % hasta un 26 %, como muestra la siguiente tabla.

**Tabla 7.1:** Características de las muestras del experimento de análisis de la concentración/densidad de pigmentos. DN=fondo negro, IzB=fondo blanco.

	Concentracion	D50 ( $\mu\text{m}$ )	S_G 15	S_i 15	S_a 15	S_G 45	S_i 45	S_a 45	S_G 75	S_i 75	S_a 75
Stapa7 DN	1,13 %	17-23	9.83	26.09	35.35	6.40	18.71	22.62	4.20	12.74	16.04
Stapa7 IzB	1,13 %	17-23	6.39	13.78	30.61	1.12	4.74	6.37	0.00	1.98	1.30
Stapa8 DN	2,25 %	17-23	7.99	17.93	35.17	7.01	19.93	24.96	6.17	24.51	16.18
Stapa8 IzB	2,25 %	17-23	6.82	15.20	31.21	2.61	7.53	12.60	1.05	6.91	4.04
Stapa9 DN	4,50 %	17-23	7.50	17.07	32.90	6.68	18.57	24.61	5.70	18.94	18.21
Stapa9 IzB	4,50 %	17-23	6.58	13.38	33.25	3.34	8.49	16.45	1.43	7.87	5.17
Stapa10 DN	9 %	17-23	6.17	13.65	29.08	7.06	19.97	25.28	5.86	19.80	18.29
Stapa10 IzB	9 %	17-23	5.90	13.00	28.16	5.80	16.15	22.01	3.58	10.98	14.29
Stapa11 DN	18 %	17-23	5.12	11.03	25.90	6.07	14.91	25.84	5.38	16.12	19.33
Stapa11 IzB	18 %	17-23	5.04	10.67	26.12	5.90	13.23	27.67	4.80	13.01	19.70
Stapa12 DN	26 %	17-23	5.12	11.28	25.40	6.26	17.28	23.57	4.65	13.06	18.59
Stapa12 IzB	26 %	17-23	5.31	11.45	26.62	5.93	14.98	24.71	4.57	11.62	20.25
Iriodin13 DN	1,13 %	18-24	9.05	23.00	34.43	6.16	20.87	18.96	2.49	8.59	10.30
Iriodin13 IzB	1,13 %	18-24	4.57	9.39	25.03	0.52	3.13	4.57	0.00	0.85	0.68
Iriodin14 DN	2,25 %	18-24	8.36	19.66	34.81	6.53	19.15	22.92	4.20	20.40	10.00
Iriodin14 IzB	2,25 %	18-24	4.87	9.34	28.12	1.04	4.14	6.71	0.00	1.45	1.27
Iriodin15 DN	4,50 %	18-24	7.07	16.40	30.80	6.31	17.39	23.71	4.93	18.95	14.16
Iriodin15 IzB	4,50 %	18-24	4.82	9.77	26.39	1.76	5.88	9.06	0.52	4.65	3.04
Iriodin16 DN	9 %	18-24	6.38	14.70	28.60	6.31	18.10	22.81	5.17	18.87	15.43
Iriodin16 IzB	9 %	18-24	4.65	9.89	24.56	2.14	5.50	12.82	0.21	3.19	2.59
Iriodin17 DN	18 %	18-24	4.80	10.80	23.67	5.13	11.70	24.53	2.97	7.23	16.08
Iriodin17 IzB	18 %	18-24	4.39	9.68	22.75	2.94	6.30	18.11	1.33	5.30	6.98
Iriodin18 DN	26 %	18-24	4.27	9.62	21.78	4.62	10.54	22.71	2.87	8.21	13.36
Iriodin18 IzB	26 %	18-24	4.05	9.27	20.76	3.08	6.71	18.36	1.04	4.80	5.79
Xirallic19 DN	1,13 %	15-21	13.51	62.64	26.67	5.44	24.11	13.20	0.68	3.45	5.20
Xirallic19 IzB	1,13 %	15-21	6.96	20.25	24.26	0.38	3.65	3.12	0.00	0.86	0.81
Xirallic20 DN	2,25 %	15-21	12.79	44.99	33.50	9.21	55.93	14.64	5.50	44.16	7.33
Xirallic20 IzB	2,25 %	15-21	7.75	20.86	28.62	1.74	7.45	7.08	0.00	2.58	1.49
Xirallic21 DN	4,50 %	15-21	11.51	33.26	37.16	7.51	32.61	17.28	4.13	30.16	6.59
Xirallic21 IzB	4,50 %	15-21	8.02	20.58	30.89	1.64	6.48	7.53	0.22	4.74	1.79
Xirallic22 DN	9 %	15-21	9.19	23.79	34.22	7.23	25.20	20.89	4.99	18.51	14.76
Xirallic22 IzB	9 %	15-21	7.52	17.59	32.14	2.64	8.20	11.78	1.31	9.34	3.91
Xirallic23 DN	18 %	15-21	7.57	18.10	31.62	6.36	18.63	22.44	4.36	18.12	12.01
Xirallic23 IzB	18 %	15-21	6.52	14.33	30.56	3.43	9.09	16.10	1.50	6.83	6.34
Xirallic24 DN	26 %	15-21	7.05	15.89	31.66	5.57	18.56	17.87	3.35	10.58	13.32
Xirallic24 IzB	26 %	15-21	6.45	14.71	29.16	3.16	8.85	14.48	0.98	5.96	4.34

Los datos instrumentales proporcionados por el BYK-mac se muestran en la [figura 7.3](#), donde se observan algunas muestras con pigmentos tipo Xirallic que destacan sobre el resto.



**Figura 7.3:** Influencia de la concentración de pigmentos de efecto en la apariencia del sparkle.



**Figura 7.4:** Conjuntos de muestras con variación de concentración de pigmentos (Stapa - Iriodin - Xirallic).

Para realizar el experimento psicofísico, se empleó la cabina de iluminación diseñada, desarrollada y fabricada en la Universidad de Alicante y descrita en secciones

anteriores (subsección 2.3.3). Para este experimento se emplearon dos geometrías de medida,  $15^\circ$  as  $15^\circ$  y  $45^\circ$  as  $45^\circ$  según la nomenclatura ASTM. Del mismo modo se empleó una fuente de luz D65 y se emplearon dos niveles de iluminación (800 y 5000 lux).

En este experimento se emplearon un total de 6 observadores (3 hombres y 3 mujeres) con una visión correcta (con gafas si fuera necesario). Cada observador realizó tres repeticiones por cada muestra, para cada geometría y por cada nivel de iluminación, realizando un total de 864 valoraciones visuales cada observador. En conjunto, se realizaron un total de 5.184 valoraciones visuales.

Las muestras se presentaron de forma aleatoria a los observadores, en sesiones de 50 minutos para mantener la concentración de los observadores lo más constante posible y para que las valoraciones no sufrieran cambios abruptos debido a la fatiga. Antes de cada sesión, todos los observadores recibieron una explicación clara sobre el concepto de sparkle según la norma ASTM [7], y emplearon 5 minutos para adaptarse al nivel de iluminación ambiental de la cabina.

El método psicofísico empleado para las evaluaciones visuales es el método del ajuste, citado con anterioridad en diversos capítulos y descrito con detenimiento en una sección del estado del arte (subsección 2.3.5). Los observadores se movían a través de la habitación con una silla ajustable, y siempre bajo una guía recta y con los ojos siempre ajustados a la altura de la lámpara y la muestra. Se alejaban de la muestra hasta que dejaban de detectar y del mismo modo se iban acercando a la muestra hasta que detectaban el efecto de textura, para cada una de ellas realizaban tres repeticiones. Además, se empleó una máscara para delimitar el área de visualización de la muestra, que para este experimento fue de  $8 \times 8$  cm<sup>2</sup>.

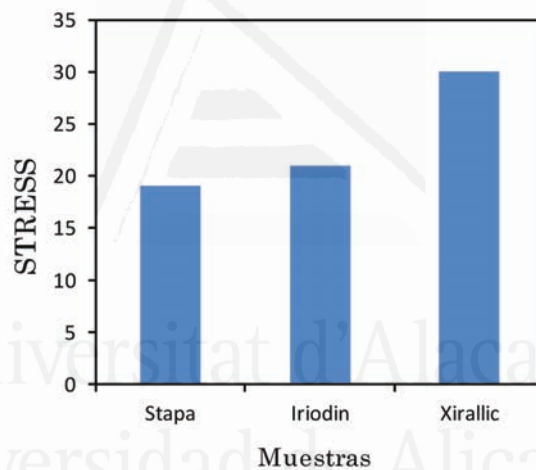
Se aplicó el índice de STRESS (subsección 2.3.6) para analizar la variabilidad intra-observador e inter-observador. Se estudió sobre las 3 repeticiones que realizaron todos los observadores y se observó si los resultados eran coherentes y aceptables.

En el diseño de experimentos (DoE) se seleccionó un diseño algo más complejo ya que se tiene que analizar la influencia de 6 concentraciones distintas, de 3 tipos de pigmentos diferentes, con dos claridades de fondo, dos geometrías de medida y dos niveles de iluminación. El objetivo de este diseño de experimentos en concreto, a diferencia de los diseños anteriores, fue para ver la influencia de las diferentes variables relacionadas con la concentración de pigmentos, no se diseñó para optimizar el experimento psicofísico con el menor número de evaluaciones visuales posibles.

### 7.3 Resultados

#### -Variabilidad de los observadores

La variabilidad media intra-observador obtenida en este experimento es de 10.56 unidades de STRESS (figura 7.5), y la variabilidad inter-observador fue de 23.79 unidades. En comparación con el resto de experimentos realizados a lo largo de la tesis y en comparación con otros trabajos relacionados, los valores obtenidos para este experimento son buenos. El análisis intra-observador no aporta información relevante. Se observa que la peor correlación se obtiene para los pigmentos Xirallic, es decir la variabilidad es mayor, que como se ha visto en capítulos anteriores son unos pigmentos los cuales presentan efectos de textura novedosos, con los cuales los observadores no están familiarizados (living sparkle).



**Figura 7.5:** Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico de análisis de la concentración de pigmentos.

#### -Concentración de pigmentos vs distancia de detección

Se van a presentar los resultados de los tres tipos de pigmentos estudiados de forma global, ya que se han obtenido unas tendencias muy similares para ambos. Analizando los resultados visuales de ambas geometrías y niveles de iluminación, se observan dos tendencias claramente diferenciadas. Para la geometría de  $15^\circ$  a  $15^\circ$  y para ambos niveles de iluminación, a medida que aumenta la concentración de pigmentos, la distancia de detección decrece. Esta tendencia es más pronunciada sobre fondos negros, aunque para fondo blanco se obtienen resultados muy similares. En cambio, para la geometría de  $45^\circ$  a  $45^\circ$ , los resultados son algo diferentes

en comparación con la geometría de  $15^\circ$ as $15^\circ$ , ya que en función de la claridad del fondo se obtienen dos comportamientos distintos. Las barras de error de los puntos (valor medio) se encuentran dentro del tamaño del símbolo. A continuación se muestran para los tres tipos de pigmentos los distintos comportamientos obtenidos en función de la concentración de pigmentos y la claridad del fondo de la muestra.

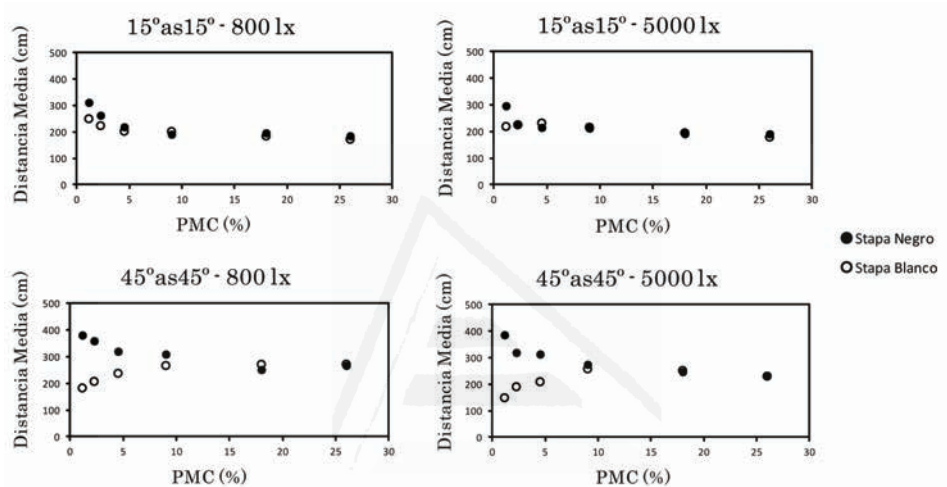


Figura 7.6: Concentración en masa de pigmentos Stapa Hydrolan (PMC) frente a la distancia media de detección de sparkle.

Sobre fondo negro para ambas geometrías y niveles de iluminación, se observa una tendencia descendente en función del aumento de la concentración, pero sería interesante analizar en un futuro experimento, con nuevas muestras, cuál sería el punto de inflexión en el que el observador no detecta sparkle, es decir, estudiar la concentración mínima a la cuál el observador comienza a detectar sparkle.

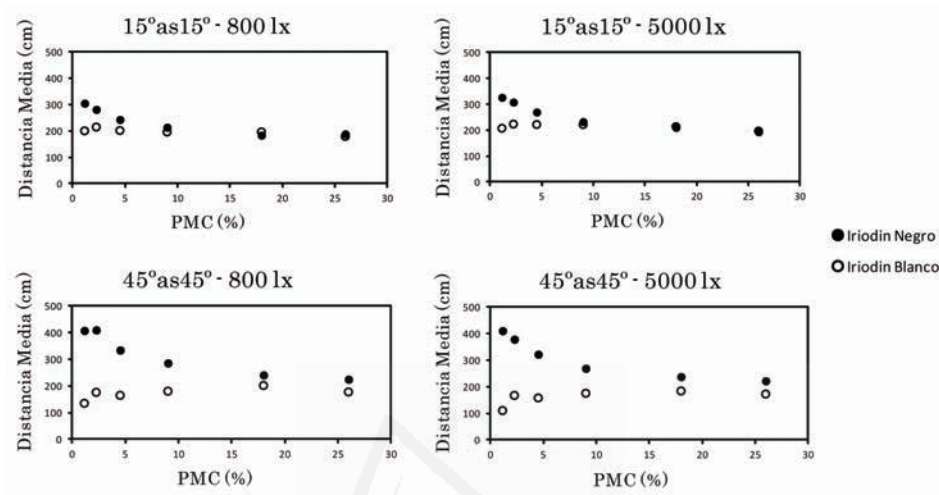


Figura 7.7: Concentración en masa de pigmentos Iriodin (PMC) frente a la distancia media de detección de sparkle.

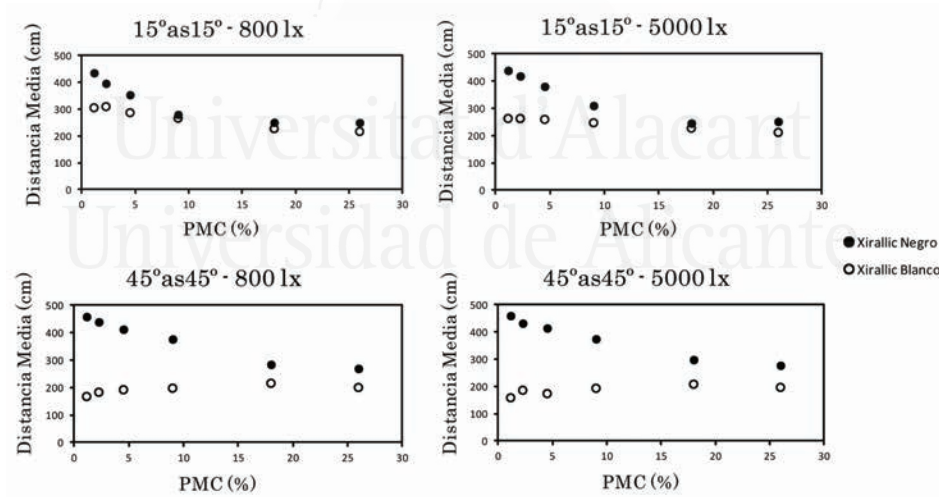


Figura 7.8: Concentración en masa de pigmentos Xirallic (PMC) frente a la distancia media de detección de sparkle.

Para el fondo negro se han obtenido los mismos tipos de resultados, es decir, a mayor concentración de pigmentos, menor distancia de detección del sparkle. Por el contrario, sobre fondo blanco, cuando se aumenta la concentración de pigmentos en la muestra, el observador puede detectar sparkle a mayor distancia o se mantiene constante, pero siempre son distancias menores a las que se alcanza sobre fondo negro. Como balance general se extrae que con los pigmentos Xirallic se obtiene mayor capacidad de proporcionar sparkle detectable y distinguible según el fondo acromático y bajos/altos niveles de iluminación.

Esto muestra la influencia de la claridad del fondo de la muestra en la detección de sparkle y crea más dudas acerca de la influencia de la colorimetría en la detección de este efecto de textura, como por ejemplo considerando muestras coloreadas con conocimiento de los valores de claridad, colorido y tono.

Pese a la hipótesis de la influencia de la colorimetría en la detección del sparkle, la correlación visual e instrumental es buena, especialmente para la geometría de  $15^\circ$ as $15^\circ$  (figura 7.9), por lo que aunque se desconoce el algoritmo de medida implementado en el BYK-mac, una vez más, se consiguen resultados muy fiables en comparación con los resultados visuales obtenidos en el experimento psicofísico.

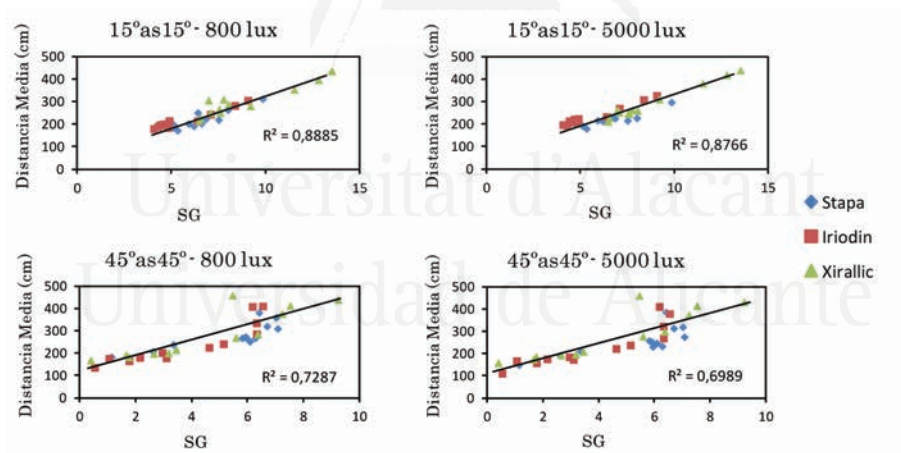


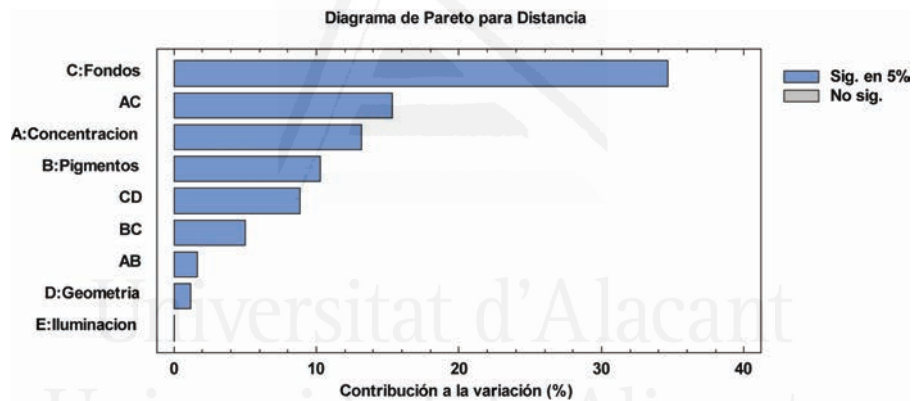
Figura 7.9: Correlación visual e instrumental en función de la concentración de pigmentos en la muestra.

**Tabla 7.2:** Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental para las geometrías 15°as15° y 45°as45°

	Distancia de Detección 15°as15°	Distancia de Detección 45°as45°
800 lux	$y = 25,762x + 65,184$ $R^2 = 0,8885$	$y = 32,425x + 119,87$ $R^2 = 0,7287$
5000 lux	$y = 25,203x + 73,46$ $R^2 = 0,8766$	$y = 32,623x + 107,24$ $R^2 = 0,6989$

### 7.3.1 Análisis DoE

Una vez obtenidos y analizados todos los resultados visuales, se procedió a realizar un análisis estadístico de los resultados mediante el diseño de experimentos. De este modo se pudo estudiar la influencia de todas las variables implicadas en el experimento psicofísico y a su vez ver la posible interacción entre dichas variables (figura 7.10).



**Figura 7.10:** Diagrama de Pareto para ver la influencia de la concentración en la detección del sparkle.



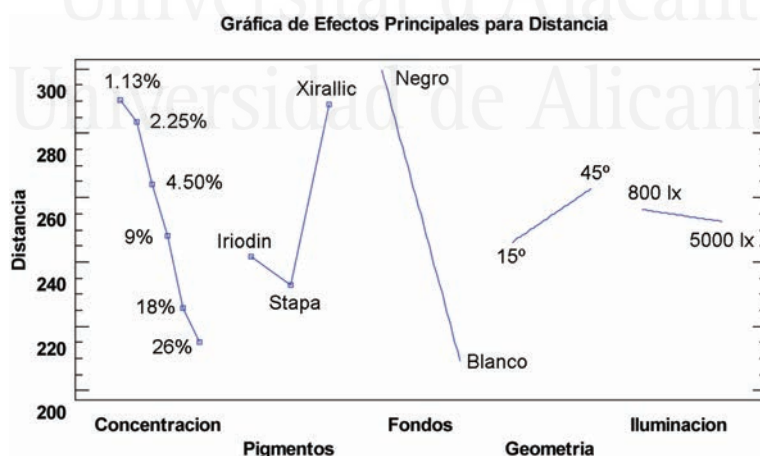
**Tabla 7.3:** Variables y niveles en el diseño de experimentos en función de la concentración

Nombre	Papel	Bajo	Alto	Niveles
A: Concentración	Controlable			1, 2, 3, 4, 5, 6
B: Pigmentos	Controlable			1, 2, 3
C: Fondos	Controlable	-1	1	
D: Geometría	Controlable	-1	1	
E: Iluminación	Controlable	-1	1	

Gracias al diagrama de pareto se puede extraer la gran influencia de la claridad del fondo de la muestra sobre la distancia de detección del sparkle. A su vez le seguirían en orden de importancia la concentración, tipo de pigmento y la geometría. Como variable no significativa se encuentra el nivel de iluminación.

En cuanto a las interacciones entre variables, destaca la interacción entre la concentración de pigmentos y el fondo de la muestra, como se ha comprobado en las diferentes gráficas expuestas con anterioridad. Las siguientes interacciones más significativas por orden serían, el fondo de la muestra y la geometría, el tipo de pigmento y el fondo de la muestra y para finalizar, siendo la interacción menos significativa se encuentra, la concentración de pigmentos frente al tipo de pigmento.

Pasando a un análisis más concreto de cada variable implicada, como se puede ver en la figura 7.11, el diseño de experimentos nos confirma ciertos aspectos que ya se han comentado previamente, tanto en este capítulo como en algunos anteriores.



**Figura 7.11:** Influencia de la concentración en la detección del sparkle.

En primer lugar se observa claramente que a menor concentración, mayor es la distancia a la que se puede detectar el efecto de textura sparkle. Siguiendo por el tipo de pigmento empleado, sin lugar a dudas, el pigmento Xirallic es el que el observador detecta con mayor claridad y a mayor distancia. En cuanto al fondo, como se ha citado anteriormente, sobre fondo negro se obtienen las mayores distancias de detección del efecto de textura.

Sobre la geometría de medida, como se ha citado en varios capítulos anteriores, se vuelve a confirmar que la geometría de medida a la cual el observador detecta en mayor grado el efecto de textura, es para la geometría de medida de  $45^\circ$  a  $45^\circ$ . Del mismo modo para el nivel de iluminación, aunque sea de forma muy ligera, se detecta mejor el sparkle para niveles de iluminación bajos, en este caso en concreto de 800 lux.

En la siguiente tabla vemos cómo se maximiza la distancia de detección en función de todas las variables implicadas en el experimento, y selecciona las más adecuadas.

**Tabla 7.4:** Optimización de la distancia de detección en la detección del sparkle.

Optimizar Respuesta			
Meta: Maximizar Distancia			
Valor óptimo: 462,119 cm.			
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Concentración			1
Pigmentos			3
Fondos	-1	1	1
Geometría	-1	1	1
Iluminación	-1	1	-1

Donde el nivel óptimo de concentración (1) hace referencia a concentraciones bajas y el nivel óptimo de pigmento (3) se refiere a los pigmentos Xirallic, además de seleccionar fondo negro, la geometría de  $45^\circ$  a  $45^\circ$  y un nivel de iluminación bajo (800 lux), para estas condiciones concretas se maximizaría la distancia de detección.

### 7.3.2 Validación inter-instrumental y visual

A continuación se van a exponer los resultados pertenecientes a la correlación inter-instrumental entre el BYK-mac y el GEFE para este grupo de muestras.

Los resultados de los pigmentos Xirallic que aportan “colored” living sparkle tuvieron que ser descartados ya que no existía correlación alguna entre ambos dispositivos de medida (figura 7.13), en cambio para el resto de pigmentos la correlación fue medianamente aceptable, obteniéndose para ambas variables de medida una correlación muy similar como muestra la figura 7.12.

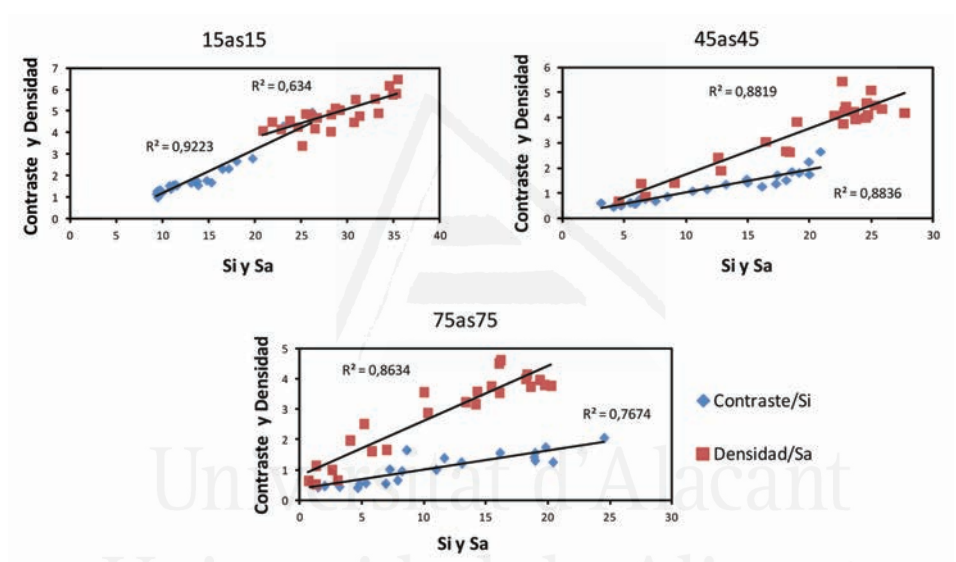


Figura 7.12: Correlación inter-instrumental de muestras con distintas concentraciones de pigmentos (sin muestras con pigmentos Xirallic).

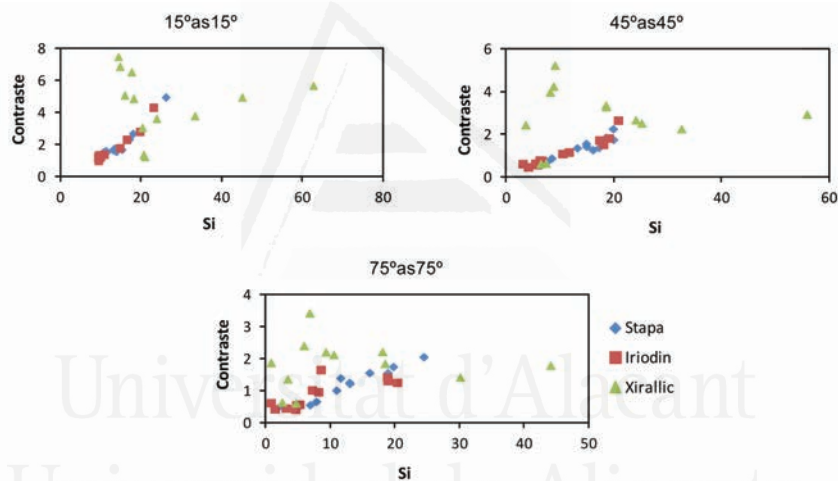
Tabla 7.5: Correlación inter-instrumental de muestras con distintas concentraciones de pigmentos

	Densidad/Sa	Contraste/Si
15°as15°	$y = 0,1325x + 1,116$ $R^2 = 0,634$	$y = 0,204x - 0,8596$ $R^2 = 0,9223$
45°as45°	$y = 0,1828x - 0,0988$ $R^2 = 0,8819$	$y = 0,0924x + 0,1089$ $R^2 = 0,8836$
75°as75°	$y = 0,1804x + 0,8009$ $R^2 = 0,8634$	$y = 0,062x + 0,3873$ $R^2 = 0,7674$

En la siguiente gráfica se observa el comportamiento de las muestras con pigmentos de efecto tipo Xirallíc, los cuales no siguen ningún patrón ni tienen ninguna relación con el comportamiento de los otros dos tipos de pigmentos (Stapa e Iriodin).

**Tabla 7.6:** Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental en función del Contraste/Sa para las geometrías 15°as15°, 45°as45° y 75°as75°

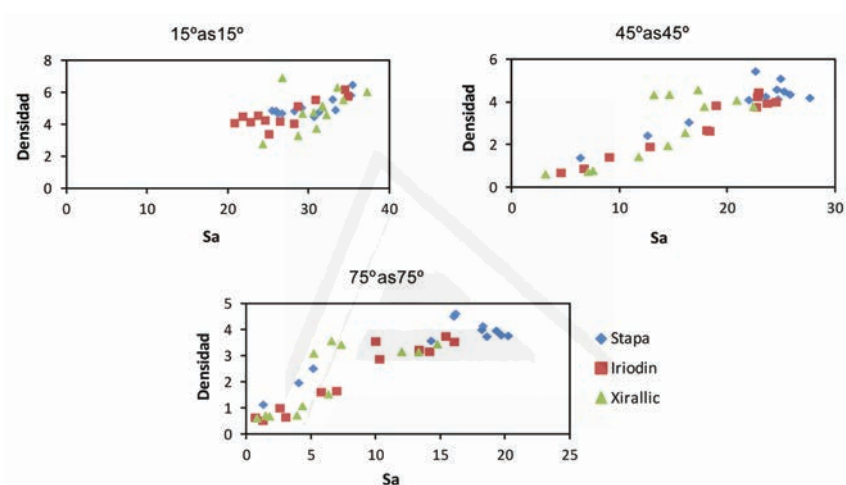
	Contraste/Si
15°as15°	$y = 0,089x + 1,2277 \quad R^2 = 0,2587$
45°as45°	$y = 0,045x + 1,2188 \quad R^2 = 0,1331$
75°as75°	$y = 0,0294x + 1,0456 \quad R^2 = 0,1168$



**Figura 7.13:** Comportamiento instrumental de los pigmentos Stapa, Iriodin y Xirallíc en función de la intensidad/contraste.

**Tabla 7.7:** Ajuste de las muestras empleadas en la correlación visual e instrumental en función de la Densidad/Si para las geometrías 15°as15°, 45°as45° y 75°as75°

	Densidad/Sa
15°as15°	$y = 0,1321x + 1,0341$ $R^2 = 0,3782$
45°as45°	$y = 0,1824x + 0,0165$ $R^2 = 0,7799$
75°as75°	$y = 0,1827x + 0,8258$ $R^2 = 0,7936$

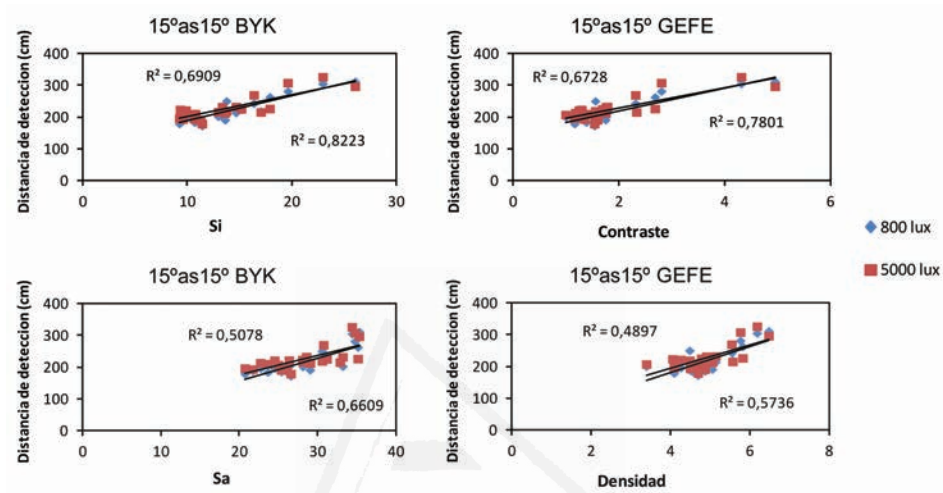


**Figura 7.14:** Comportamiento instrumental de los pigmentos Stapa, Iriodin y Xirallic en función del área/densidad.

Observando el comportamiento de este tipo de pigmentos en función de las dos variables de medida del sparkle, en este caso en concreto, se detecta que existe una mejor correlación para la variable de área (tabla 7.7) que para la variable de intensidad (tabla 7.6). Esto puede ser debido a que la cámara CCD empleada es monocroma y debido a que las características de los pigmentos Xirallic ofrecen un efecto brillo muy intenso, con un resplandor muy marcado y se distinguen por colores fuertes y puros, provocando un efecto visual novedoso en la industria el cual todavía no se ha conseguido caracterizar adecuadamente y denominado en el sector como “Living Sparkle”.

En cambio analizando la correlación de ambos modelos con respecto a las valoraciones visuales (exceptuando las citadas muestras con pigmentos Xirallic) se observa que la correlación no es buena para ninguno de los modelos (tabla 7.8, tabla 7.9)

en ninguna geometría de medida estudiada ni para ningún nivel de iluminación (800 y 5000 lux), como se aprecia en las siguientes figuras (figura 7.15, figura 7.16).



**Figura 7.15:** Correlación inter-instrumental y visual de muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría de 15°as15°.

**Tabla 7.8:** Ajuste para muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría 15°as15°.

	800 lux	5000 lux
15°as15° BYK/Si	$y = 7,8366x + 110,48$ $R^2 = 0,8223$	$y = 6,9009x + 132,31$ $R^2 = 0,6909$
15°as15° GEFE/Contraste	$y = 35,925x + 148,24$ $R^2 = 0,7801$	$y = 32,053x + 164,76$ $R^2 = 0,6728$
15°as15° BYK/Sa	$y = 7,2317x + 11,599$ $R^2 = 0,6609$	$y = 6,0899x + 53,134$ $R^2 = 0,5078$
15°as15° GEFE/Densidad	$y = 40,485x + 19,439$ $R^2 = 0,5736$	$y = 35,935x + 50,751$ $R^2 = 0,4897$

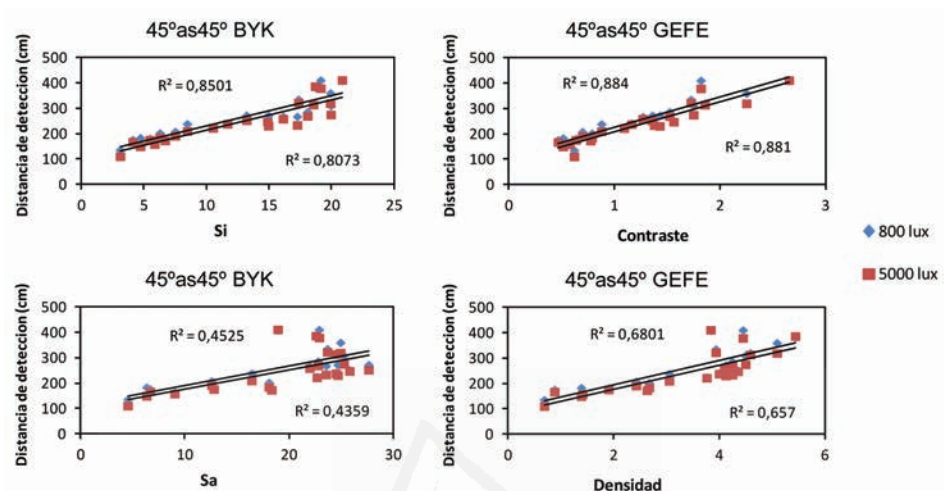


Figura 7.16: Correlación inter-instrumental y visual de muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría de 45°as45°.

Tabla 7.9: Ajuste para muestras con distintas concentraciones de pigmentos para la geometría 45°as45°.

	800 lux	5000 lux
45°as45° BYK/Si	$y = 11,99x + 109,43$ $R^2 = 0,8501$	$y = 11,782x + 95,492$ $R^2 = 0,8073$
45°as45° GEFE/Contraste	$y = 120,33x + 105,04$ $R^2 = 0,884$	$y = 118,43x + 89,925$ $R^2 = 0,881$
45°as45° BYK/Sa	$y = 7,5956x + 115,04$ $R^2 = 0,4525$	$y = 7,5176x + 99,976$ $R^2 = 0,4359$
45°as45° GEFE/Densidad	$y = 47,829x + 97,648$ $R^2 = 0,6801$	$y = 47,404x + 82,535$ $R^2 = 0,657$

Estas diferencias entre lo que ambos modelos predicen y lo que los observadores han evaluado visualmente nos plantean nuevas cuestiones sobre los modelos de medida de sparkle existentes en la actualidad.

Resaltar de nuevo, que durante el experimento psicofísico al observador se le preguntó acerca de la percepción de sparkle total (SG), y como se ha visto en la figura 7.9, la correlación es muy buena. Sería interesante replicar este mismo experimento, pero esta vez incitando al observador a dar dos valoraciones, una en función de la intensidad de sparkle percibida y otra en función del área total de destellos percibida, de ese modo se podrá realizar una comparación más exacta con las variables de cálculo del sparkle (intensidad y área).

## 7.4 Discusión

En este capítulo se han estudiado varios factores que pueden afectar a la percepción del efecto de textura sparkle, como puede ser la influencia de la concentración de pigmentos, el tipo de pigmento empleado en la formulación del recubrimiento, la influencia del color de fondo de la muestra en la apariencia visual final de la pintura y la influencia del nivel de iluminación.

- **Concentración:** Dependiendo del color/claridad del fondo, se han obtenido dos comportamientos diferentes. Sobre fondo negro, a menores concentraciones de pigmentos se obtienen mayores distancias de detección. Sobre fondo blanco, y en función del tipo de pigmento, la distancia de detección aumenta a medida que aumenta la concentración de pigmentos en la muestra. Sin embargo sobre fondo negro, la distancia de detección máxima de sparkle disminuye a medida que la concentración de pigmentos es más baja. La hipótesis principal de este comportamiento se debe a que a medida que aumenta la concentración de pigmentos el contraste con el fondo de la muestra se hace menos evidente.
- **Tipo de pigmento:** El tipo de pigmento influye en la distancia de detección del efecto de textura sparkle. En este caso en concreto, independientemente de que se tenga el mismo tamaño medio de pigmentos ( $D_{50}$ ) y mismo grosor de capa, para ambas geometrías de medida y para ambos niveles de iluminación, las muestras en las cuales se ha detectado más claramente el efecto de textura sparkle tenían el pigmento tipo Xirallic, seguido del Iriodin y finalmente el pigmento tipo Stapa Hydrolan.
- **Fondo de la muestra:** El color del fondo afecta a la apariencia visual de la muestra en función de la concentración de pigmentos. Para una concentración de pigmentos alta, la influencia del color del fondo se cancela (opacidad), mientras que para bajas concentraciones, la influencia se intensifica y produce diferencias en la detección del sparkle.
- **Nivel de iluminación:** Hay pequeñas diferencias en la distancia de detección del sparkle para las tres series de pigmentos en cada geometría, mostrando mayor distancia de detección para niveles de iluminación menores, por lo que no se superponen y existe menos competencia entre pigmentos para ser detectados (visibles sobre el fondo).

En un futuro resulta interesante poder estudiar más en profundidad la influencia de la colorimetría/claridad de la muestra, ya que instrumentalmente el BYK-mac realiza sus medidas en base a una imagen en escala de grises obviando la colorimetría de la muestra, lo que genera dudas e incertidumbre, ya que como se acaba de demostrar el color/claridad del fondo influye notablemente a la hora de detectar el sparkle de las muestras. Además sería conveniente conocer el punto de inflexión

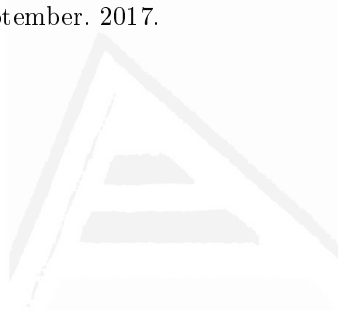


el cual a concentraciones menores del 1 %, el observador deja de detectar el efecto de textura sparkle

## **7.5 Publicaciones**

Gómez, O.; Micó-Vicent, B.; Perales, E.; Chorro, E.; Viqueira, V.; Martínez-Verdú, F.M., “Implementación del diseño de experimentos en la detección visual del sparkle”, XI Congreso Nacional del color, Ourense 2016.

Gómez, O.; Perales, E.; Micó-Vicent, B.; Viqueira, V.; Hurabait, K.; Martínez-Verdú, F.M., “Statistical design of experiments applied on sparkle visual detection”, In Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, Lillehammer (Norway), September. 2017.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## Capítulo 8

# Determinación de la influencia del espectro de la fuente de luz, su nivel de iluminación y cromaticidad en la distancia de detección del sparkle

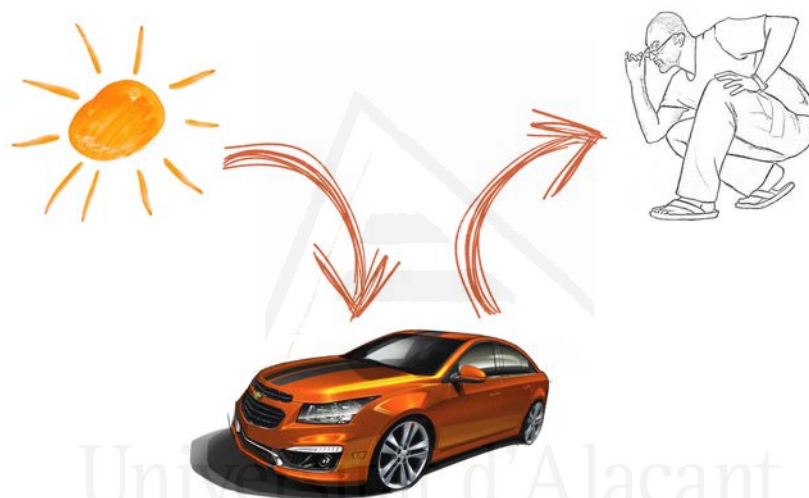
### 8.1 Introducción

La percepción visual es la capacidad de interpretar el entorno mediante el procesamiento de la información que esta contenida en la luz visible que interacciona con los objetos del entorno. La percepción resultante también se conoce como la vista o visión. Los diversos componentes fisiológicos de la visión se denominan colectivamente como el sistema visual.

Nuestros ojos y cerebro trabajan en equipo para descubrir patrones o formas significativos que nos ayudan a dar sentido al mundo. Hay tres elementos que influyen en el proceso de observación visual de un objeto como se muestra en la [figura 8.1](#). Ellos son:

1. Una fuente de luz
2. Un objeto
3. Un observador

Los tres factores influyen en el color y la apariencia visualizada por el observador. Una fuente ilumina el objeto y se caracteriza por la energía emitida a diferentes longitudes de onda, que se denota por el término distribución espectral de energía (SPD). Cuando la luz incide sobre un objeto, el haz de luz es modificado por absorción, dispersión y otros procesos físicos, en función de la constitución física y química del objeto. En última instancia, la luz alcanza el ojo del observador en forma de luz reflejada o refractada.



**Figura 8.1:** Elementos básicos en la apariencia y el color de un objeto.

En este capítulo se va a determinar únicamente la influencia de la fuente de luz sobre la percepción visual del efecto de textura sparkle. Se estudiará la influencia de diferentes iluminantes al igual que se emplearán diferentes niveles de iluminación. Además se analizará la textura en las tres geometrías características de medida del sparkle,  $15^\circ$  as  $15^\circ$ ,  $45^\circ$  as  $45^\circ$  y  $75^\circ$  as  $75^\circ$ , para observar cómo afecta los distintos ángulos de iluminación sobre la percepción de la textura.

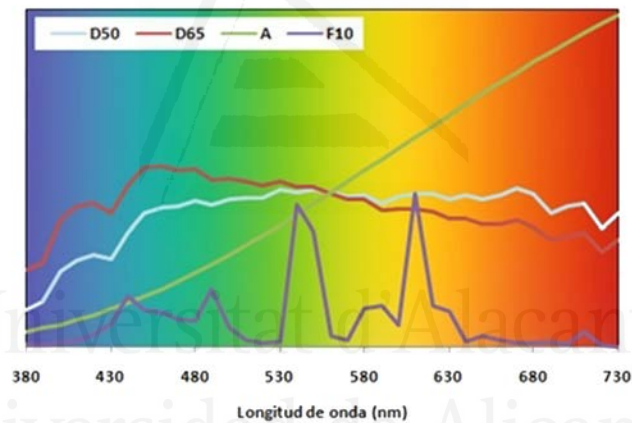
#### *Iluminantes*

Las expresiones “fuente de luz” e “iluminante” tienen significados concretos y distintos. Una fuente de luz es un emisor físico de radiación luminosa; por ejemplo: una vela, una bombilla de tungsteno, etc., y un iluminante estandarizado [148] es la especificación de una fuente de luz. Todas las fuentes de luz se pueden especificar

como iluminantes, pero no todos los iluminantes pueden ver su realización física como fuentes de luz.

Los iluminantes se suelen definir en términos de energía relativa tabulada para cada longitud de onda o franja de longitudes de onda. Existen varios iluminantes de amplio uso en la industria del color. Entre ellos están: A, C, D65, etc.

Los iluminantes A y C fueron definidos por la CIE en 1931 para representar las típicas luces de bombillas de tungsteno y de la luz solar, respectivamente. Con el tiempo se vio que el iluminante C era una representación muy pobre de la luz del día, ya que contenía demasiada poca energía en las longitudes de onda más cortas. Por eso fue reemplazada por una serie de iluminantes conocida como “clase D”, como por ejemplo el D65, que es el iluminante que se empleará en este capítulo a través de los simuladores de luz disponibles actualmente.



**Figura 8.2:** Iluminantes D50, D65, A y F10.

### *Temperatura de Color*

La temperatura de color de una fuente de luz es la temperatura de un radiador de cuerpo negro ideal que irradia luz de tonalidad comparable a la de la fuente de luz. La temperatura de color se indica convencionalmente en la unidad de temperatura absoluta, el kelvin (K). La temperatura de color es una característica de la luz visible que tiene importantes aplicaciones en iluminación, fotografía, videografía, editorial, fabricación, astrofísica, y otros campos. Y es una manera sencilla, con un solo parámetro, de especificar la cromaticidad de la luz.

Se denominan fuentes luminosas cálidas a aquellas que, debido a su temperatura de color, tienen tonos cercanos al amarillo y rojo, y frías las que tienen tonos próximos al azul. Las fuentes luminosas situadas en el medio de ambas se consideran neutras.

La luz procedente de las fuentes de luz blanco-cálida aparecerá blanco-amarillento con temperaturas de color correlacionadas (CCT) entre 2700K y 3500K. La luz blanco-fría se verá como blanco-azulada con CCT en el rango medio desde 4500K hasta 7500K. Las fuentes de luz con CCT en el rango medio (3500-4500K) son descritas como blanco neutro. Actualmente, la industria de la iluminación formalmente se refiere a blanco-cálido (3000K), blanco (3500K), blanco-frío (4000K-4500K) y luz de día (6500K), basados en el standard ANSI [149] (figura 8.3).

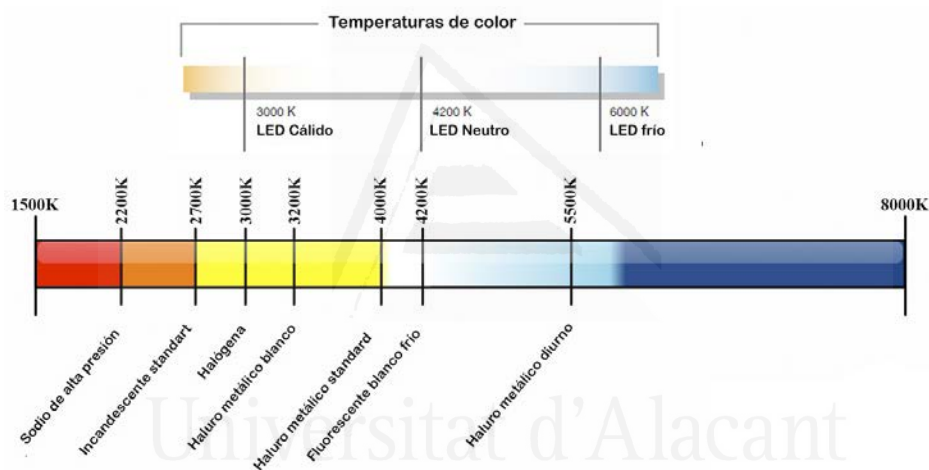


Figura 8.3: Esquema de temperaturas de color en grados Kelvin.

### Geometrías de Iluminación y de Observación/Medida

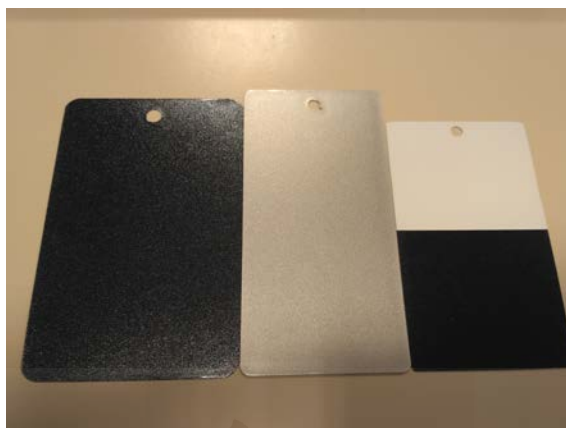
La luz puede viajar en una sola dirección representada por un vector, o en todas las direcciones de una manera difusa. Más comúnmente durante la percepción visual, las luces de iluminación y visualización son difusas. Tal condición es casi imposible de imitar en los instrumentos de medición de colores/texturas. Los espectrofotómetros miden la reflectancia y la transmitancia espectral de las muestras a través del espectro visible en relación con una referencia en particular. El ángulo de observación y las condiciones de iluminación influyen considerablemente la percepción del color y la textura. Por consiguiente, la geometría de un instrumento de medición del color/textura es un factor importante en su diseño. Las luces para la geometría de iluminación y observación (o medida) en este tipo de instrumentos puede ser de dos tipos denominados: bidireccional o difusa.

## 8.2 Materiales y Métodos

Para la realización del experimento psicofísico se empleó de nuevo la cabina de iluminación especial para la evaluación del sparkle diseñada y fabricada en la Universidad de Alicante ([subsección 2.3.3](#)). Como se ha citado en capítulos anteriores, en ella se puede evaluar el efecto de textura sparkle para cualquier ángulo de iluminación, se puede cambiar la fuente de iluminación y adaptarla según unas necesidades concretas (luz fría o cálida), al igual que modificar el nivel de iluminación (E lux).

Como el objetivo de este capítulo es estudiar y analizar cómo afectan las variables de contorno sobre la detección del efecto de textura sparkle, basándonos en los resultados obtenidos en el [Capítulo 6](#) se procedió a seleccionar una muestra óptima con pigmentos metalizados para el desarrollo de este experimento. Se optó por escoger una muestra con un tipo de pigmento silverdollar, un tamaño de partícula ( $D_{50}$ ) grande ( $34 \mu\text{m}$ ) y una concentración del 3.25 % para asegurarnos que para cualquier configuración que experimentemos el observador sea capaz de detectar en mayor o menor medida la textura de la muestra, a lo largo de este experimento se le denominará a esta muestra como "S34".

Durante el desarrollo de la tesis y como se ha citado en capítulos anteriores ([Capítulo 5](#), [Capítulo 7](#)), se han empleado muestras con pigmentos de efecto novedosos en el mercado, los cuales a la hora de realizar la correlación visual e instrumental no se obtenían los resultados esperados, por lo que en este capítulo se ha optado por utilizar dos muestras con ese tipo de pigmentos especiales (Xirallic y Luxan) para comprobar cómo afectan las variables de contorno en la detección del sparkle. La muestra tipo Xirallic tiene un tamaño medio de pigmento  $D_{50}$  entre  $15\text{-}21 \mu\text{m}$ , una concentración de 1.13 % y se empleó únicamente el fondo negro, y la muestra tipo Luxan tiene un  $D_{50} = 92.5 \mu\text{m}$  y una concentración de pigmentos del 2 %. A continuación se muestra una tabla con los valores principales de textura obtenidos instrumentalmente de las tres muestras empleadas en el experimento visual:



**Figura 8.4:** Muestras empleadas en el experimento visual de análisis de las condiciones ambientales (Luxan - Silverdollar - Xirallic).

**Tabla 8.1:** Características de las muestras del experimento de análisis de las variables de contorno.

	S_G 15	S_i 15	S_a 15	S_G 45	S_i 45	S_a 45	S_G 75	S_i 75	S_a 75
<b>S34</b>	8,40	21,04	32,85	6,02	16,85	22,53	3,96	12,76	14,47
<b>Luxan X0755</b>	19,22	101,27	32,31	7,19	44,47	11,73	1,88	8,86	6,60
<b>Xirallic N. 1,13 %</b>	13,51	62,64	26,67	5,44	24,11	13,20	0,68	3,45	5,20

En este experimento se seleccionaron dos fuentes de iluminación, una luz cálida con una temperatura de color de 3200K, y una luz de día con una temperatura de color de 6500K. Para cada fuente de iluminación se experimentó con tres niveles de iluminación diferentes, el primero a 800 lux, el segundo a 2400 lux y el tercero a 5000 lux. Además se analizaron todas las configuraciones para las geometrías características de medida del sparkle que son 15°as15°, 45°as45° y 75°as75°.

Se emplearon un total de 12 observadores (7 hombres y 5 mujeres) con una visión correcta. De nuevo se les explicó con claridad el objetivo del experimento y se comprobó que habían asimilado el concepto de sparkle para poder proceder a su evaluación. Algunos de los observadores ya tenían experiencia en experimentos anteriores por lo que resultó menos costoso la preparación y desarrollo del experimento visual. De nuevo, al igual que en los experimentos citados en capítulos anteriores, el experimento consistía en que el observador se alejara y acercara según su criterio hasta que detectara o dejara de detectar el efecto de textura sparkle. Se empleó una máscara de 7x7 cm. para acotar de nuevo el área de visualización de la muestra.

Se realizaron 3 repeticiones por cada fuente de iluminación, por cada nivel de iluminación y por cada geometría de medida. Con la misma metodología explicada anteriormente, se realizaba una primera medida alejándose de la muestra hasta que el observador dejaba de detectar el efecto, y posteriormente se iba acercándose a la muestra hasta que detectaba de nuevo. Así una medida del experimento consistía en tres evaluaciones alejándose de la muestra y tres evaluaciones acercándose, y este proceso lo realizaban por tres repeticiones. En total cada observador realizó un total de 972 valoraciones, para un total de valoraciones global para este experimento de 11.664 evaluaciones.

El método psicofísico empleado, como se acaba de describir, es el método del ajuste, que ha sido descrito en detalle en el estado del arte (subsección 2.3.5), consiste en que el observador debe ajustar o manipular la intensidad del estímulo (sparkle) hasta que sea capaz de percibirlo, o en este caso, que no sea capaz de detectarlo, y que también se usó en los dos capítulos anteriores.

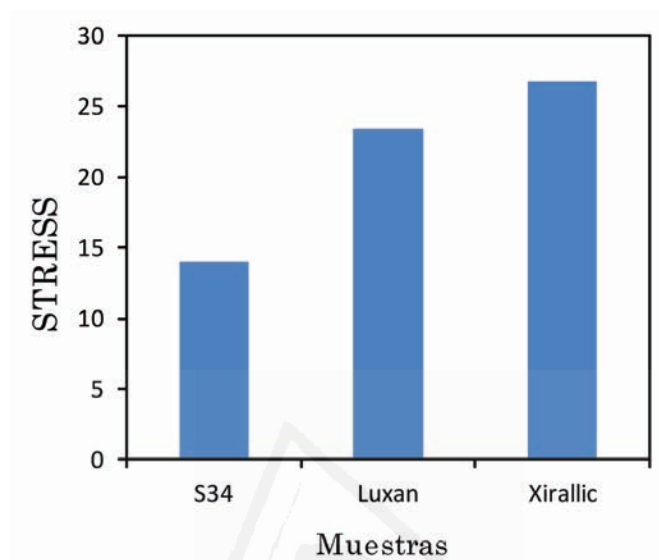
Cuando se concluyó toda la fase experimental, se recopilaron todos los datos relacionados con las dos fuentes de iluminación, los tres niveles de iluminación y las tres geometrías de medida. Con todos estos datos se analizó la inter-variabilidad e intra-variabilidad entre los observadores, para corroborar que todos los datos obtenidos guardan cierta relación entre ellos. Por ello se usó la fórmula de *STRESS*, citada y descrita en secciones anteriores (subsección 2.3.6).

En el diseño de experimento (DoE), se optó por un diseño factorial de  $3^2 2^1$ , puesto que se tienen tres variables (lámpara, nivel de iluminación y geometría de medida) a dos niveles diferentes, aunque para las variables de la geometría de medida y nivel de iluminación se realizó una pequeña adaptación ya que se disponían de tres niveles diferentes. Gracias al diseño de experimentos se pudo evaluar la influencia en la detección del sparkle de las tres variables de forma independiente además de ver si existe interacción entre ellas.

### 8.3 Resultados

Los resultados del análisis de *STRESS* fueron muy buenos, se obtuvieron unos resultados medios de variabilidad inter-observador de 21,24 unidades de *STRESS*, y una variabilidad intra-observador de 11,05 unidades. El análisis intra-observador no aporta de nuevo información relevante.

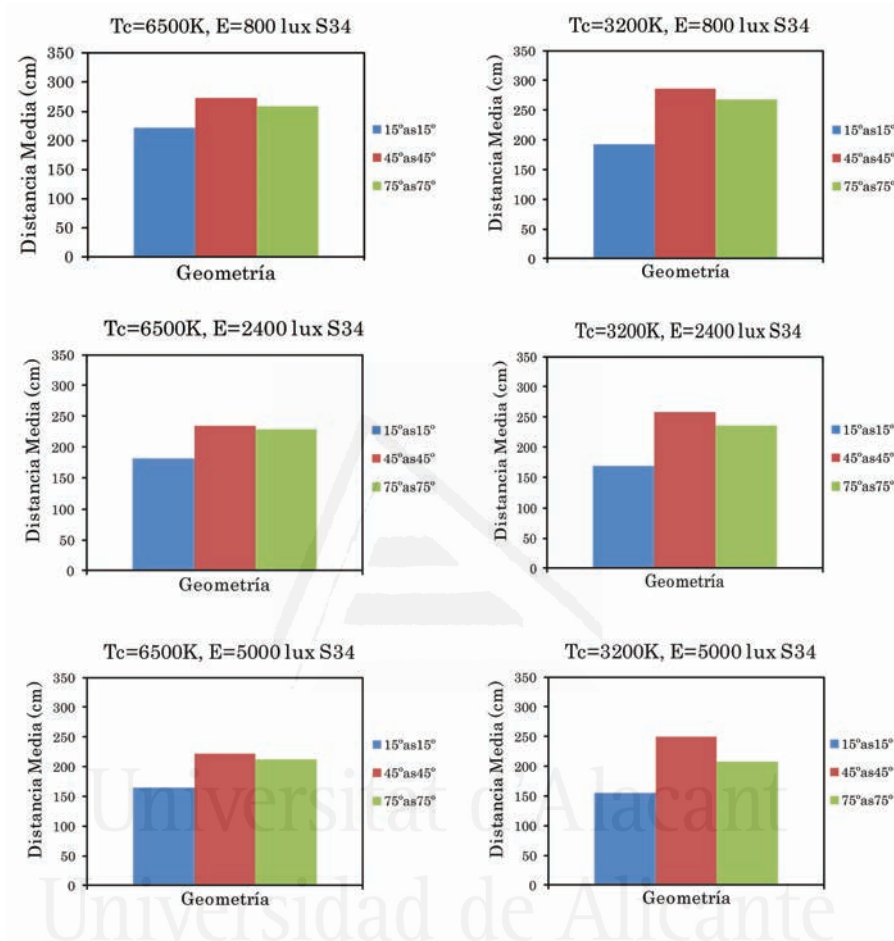




**Figura 8.5:** Variabilidad inter-observador para el experimento psicofísico de análisis de las variables de contorno.

Se va a proceder a exponer los resultados de los diferentes pigmentos de forma independiente, comenzando en primer lugar por los resultados referentes a la muestra con pigmentos metálicos (S34), ya que es la muestra con los pigmentos más característicos utilizados en el sector automoción. En todos ellos, la barra de error vertical se encuentra dentro del gráfico.

Por la metodología seguida durante el experimento y las variables evaluadas se podría obtener conclusiones en función de cada una de las variables. Comenzando por la geometría de medida, como puede verse en la siguiente gráfica (figura 8.6), el observador detecta ligeramente mejor el efecto de textura sparkle para la geometría de  $45^\circ$  a  $45^\circ$ , del mismo modo que ha venido ocurriendo a lo largo de toda la tesis para cada experimento visual.



**Figura 8.6:** Influencia de la geometría de medida en la detección del sparkle para muestra con pigmentos metálicos.

En cuanto a la influencia de la lámpara y del nivel de iluminación y solamente ahora para el pigmento metálico (silverdollar), se observa que para niveles de iluminación bajos, en este caso de 800 lux, el observador detecta mejor el sparkle que para niveles de iluminación altos (figura 8.7). Del mismo modo, se observa la influencia de la lámpara, que aunque las diferencias no son significativas, el efecto de textura sparkle se detecta mejor para una lámpara con temperatura de color cálida (3200K).

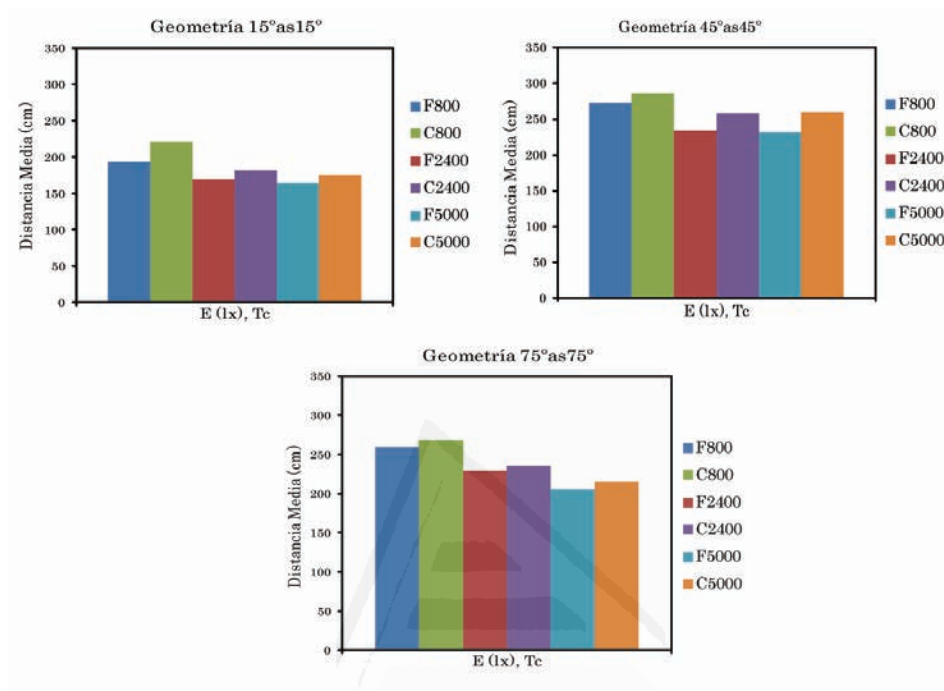
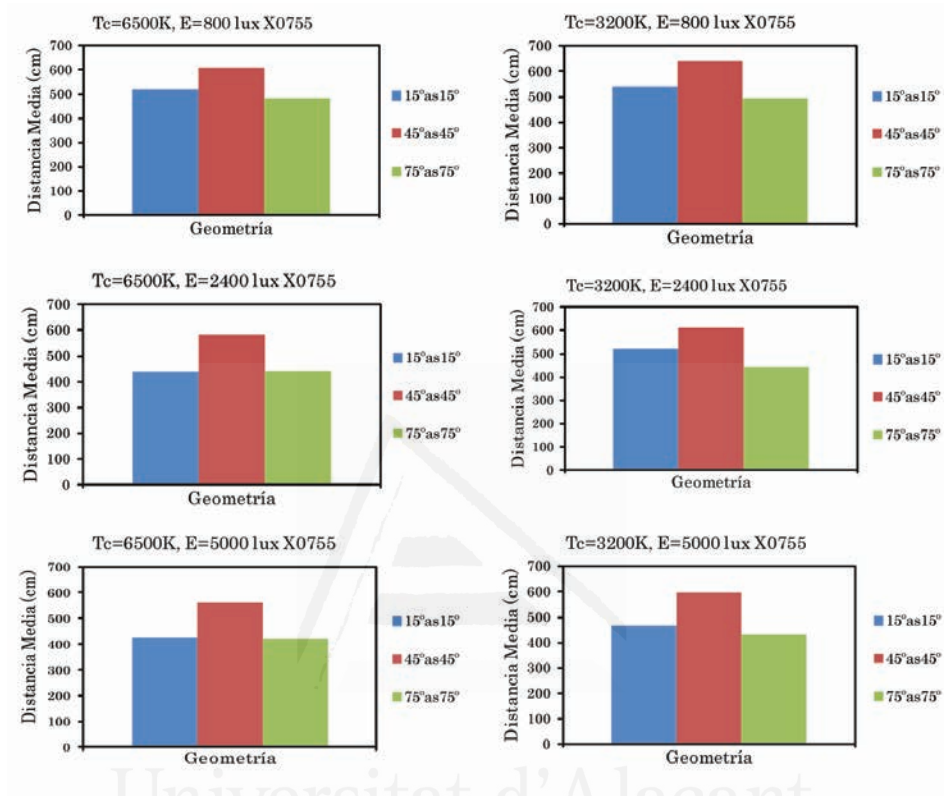


Figura 8.7: Influencia de la temperatura de color (fría vs cálida) y del nivel de iluminación en la detección del sparkle para pigmentos metálicos.

El siguiente pigmento estudiado es el denominado Luxan, compuesto por mica sintética cuyo proveedor es Eckart. Como se observa en las gráficas siguientes se obtienen unos resultados siguiendo la misma línea que los obtenidos con la muestra anterior.



**Figura 8.8:** Influencia de la geometría de medida en la detección del sparkle para la muestras con pigmentos Luxan.

Se observa claramente de nuevo que para la geometría de medida de 45°as45° el observador detecta mejor el efecto de textura sparkle para cualquier configuración de medida.

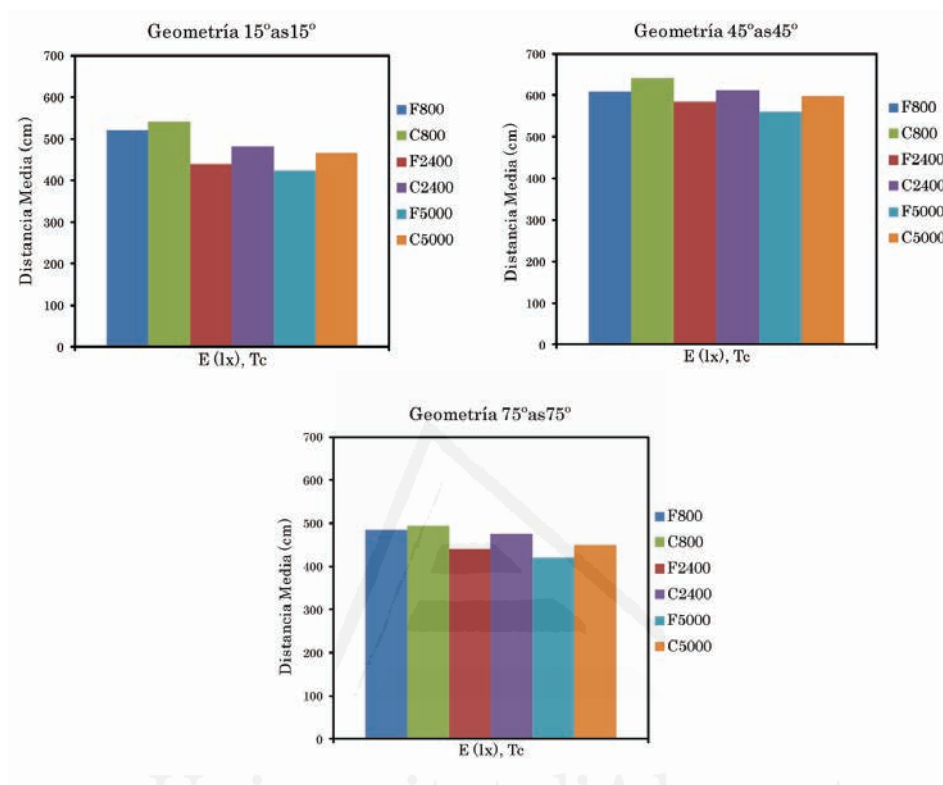
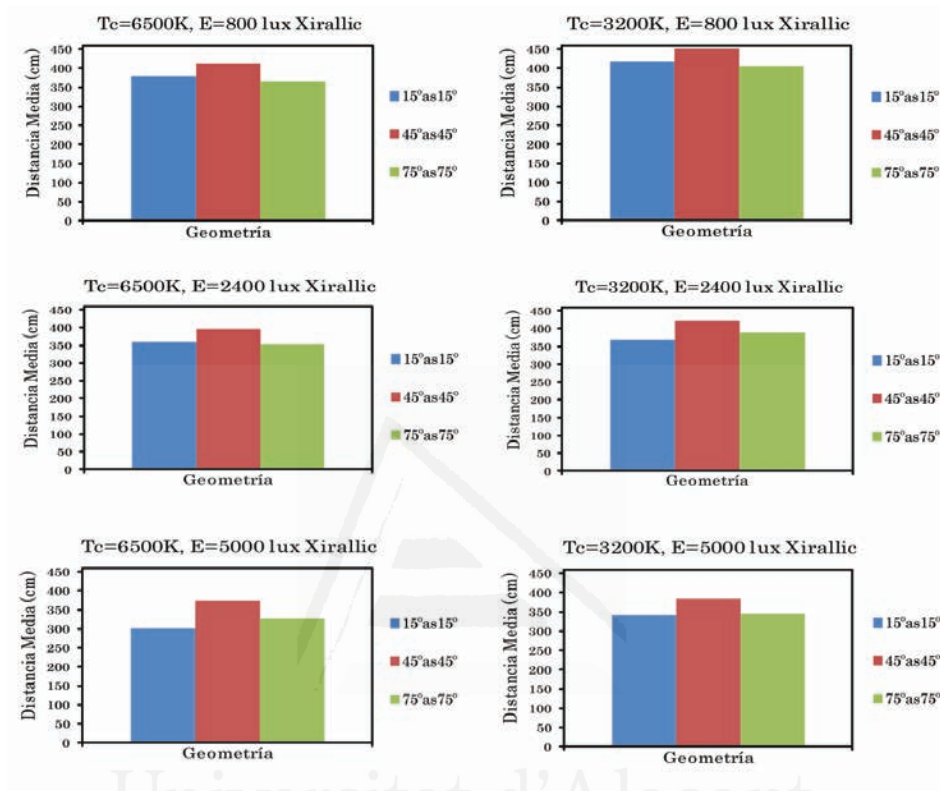


Figura 8.9: Influencia de la temperatura de color y del nivel de iluminación en la detección del sparkle para muestras con pigmentos Luxan.

Asimismo, nuevamente el observador detecta mejor el efecto de textura sparkle para niveles de iluminación bajos (800 lux), que para este caso en concreto las diferencias en cuanto a detección de la textura son muy significativas sobre todo para las geometrías de 45°as45° y 75°as75°.

Del mismo modo se muestran los resultados obtenidos para la muestra con pigmentos tipo Xirallic, los que su efecto de textura es conocido en la industria por “Living Sparkle”.



**Figura 8.10:** Influencia de la geometría de medida en la detección del sparkle para la muestras con pigmentos Xirallic.

Los resultados son de nuevo idénticos a las dos muestras anteriores, destacando claramente la geometría de 45°as45° como la que el observador mejor detecta el efecto de textura sparkle.

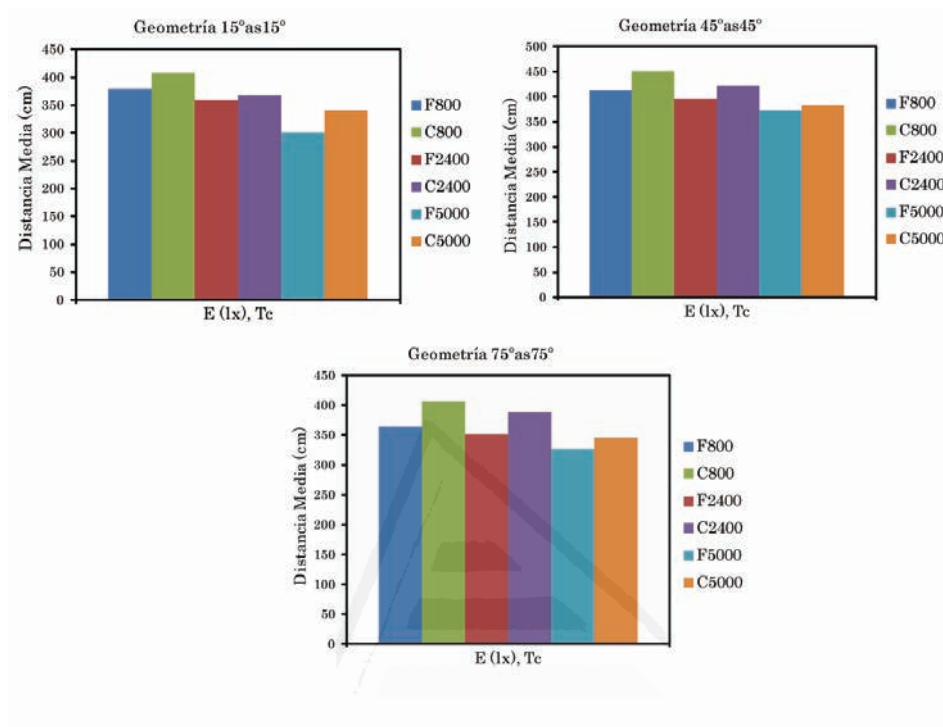


Figura 8.11: Influencia de la temperatura de color y del nivel de iluminación en la detección del sparkle para muestras con pigmentos Xirallic.

Para esta muestra el observador detecta de nuevo claramente mejor el sparkle para niveles de iluminación bajo y para una temperatura de color cálida (3200K).

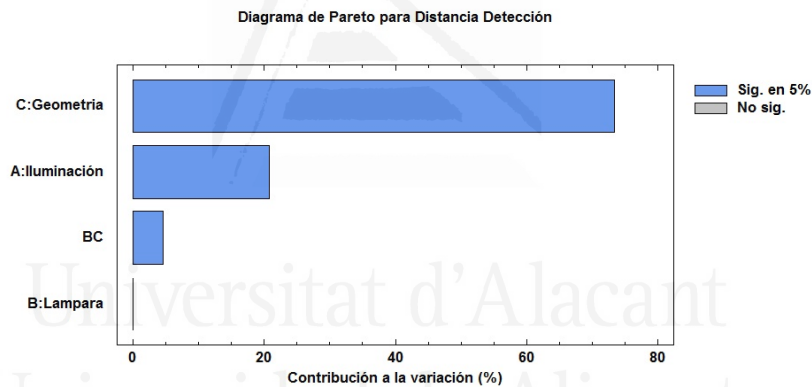
### 8.3.1 Análisis DoE

El análisis de los resultados estadísticos de la tres muestras estudiadas se ha realizado de forma global, y ha sido gracias al diseño de experimentos (tabla 8.2), ya que se ha podido ver la influencia de las tres variables estudiadas, al igual que analizar si existe interacción entre ellas. Como puede apreciarse en el diagrama de Pareto figura 8.12, se observa que las dos variables más significativas son la geometría y la iluminación, aunque entre ambas destaca claramente la influencia de la geometría a la hora de detectar el efecto de textura sparkle. Por otro lado se deduce la escasa influencia de la lámpara o temperatura de color a la hora de detectar el efecto de textura sparkle ya que no es una variable significativa.

En cuanto a las interacciones entre variables, la interacción más significativa es la compuesta entre la geometría de iluminación y la lámpara, como se muestra en la figura 8.12, ya que el resto de combinaciones entre variables no son significativas.

**Tabla 8.2:** Diseño de experimentos para analizar las variables de contorno en la detección del sparkle.

Paso 1: Definir las variables respuesta a ser medidas					
Nombre	Unidades	Analizar	Objetivo		
Distancia Detección	cm	Media	Maximizar		
Paso 2: Definir los factores experimentales a variar					
Nombre	Tipo	Papel	Bajo	Alto	Niveles
A: Iluminación	Catagórico	Controlable			1,2,3
B: Lámpara	Continuo	Controlable	-1	1	
C: Geometría	Catagórico	Controlable			1,2,3



**Figura 8.12:** Diagrama de Pareto para ver la influencia de las variables de contorno en la detección del sparkle.



Con la siguiente representación de los efectos principales para la distancia (figura 8.13), se corroboran algunas conclusiones obtenidas hasta el momento. La primera de ellas es que a niveles de iluminación más bajos (800 lux) el observador es capaz de alejarse más de la muestra para detectar sparkle. La segunda conclusión es que la geometría de iluminación a la cual el observador es capaz de alejarse más de la muestra es para la geometría de 45°as45°. Esta afirmación coincide con los resultados obtenidos en capítulos previos. Y como ultima conclusión que se puede obtener es la poca o nula influencia de la lámpara (Tc) en la detección del sparkle ya que apenas influye en los resultados.

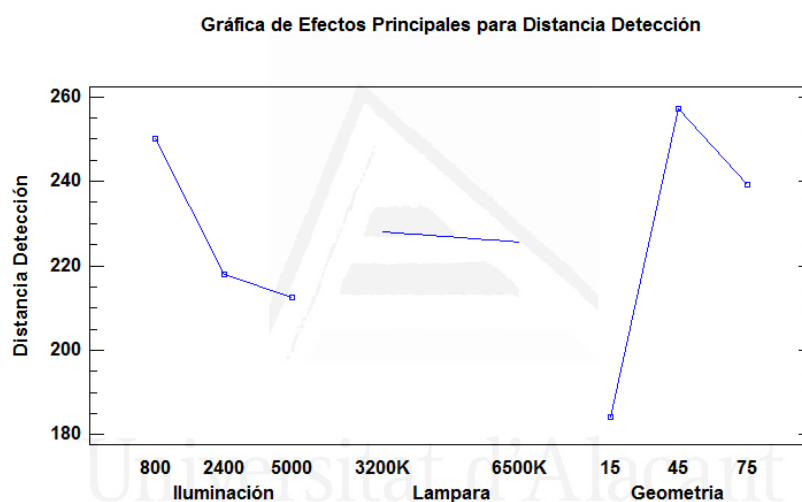
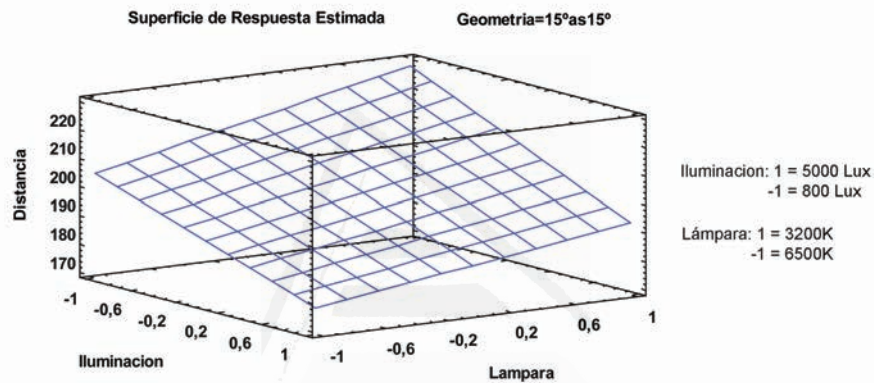


Figura 8.13: Influencia de las variables de contorno en la detección del sparkle.

Como valor óptimo para la detección del sparkle en este estudio se ha obtenido que se recomienda tener un nivel de iluminación bajo con una temperatura de color de la lámpara baja (3200K) y para una geometría de iluminación de  $45^\circ$ as $45^\circ$ , de este modo se maximiza la distancia de detección del sparkle hasta los 370,3 cm. de media, siempre dependiendo del tipo de pigmento.

Un ejemplo de la superficie de respuesta estimada de todas las variables estudiadas la encontramos en la siguiente figura:



**Figura 8.14:** Superficie de respuesta estimada de las variables de contorno en la detección del sparkle.

En este caso concreto, es un ejemplo para una geometría de  $15^\circ$ as $15^\circ$ , un nivel de iluminación bajo y una temperatura de color baja (3200K), la distancia de detección del sparkle se maximiza.

## 8.4 Discusión

Con este estudio se ha comprobado que existen todavía muchas dudas acerca de la percepción del sparkle, ya que como se ha comprobado cualquier ligera variación en alguna de las variables estudiadas, en este caso ambientales, provoca una variación en la forma en la que detectamos la textura de la muestra.

Ante la falta de estudios similares, gracias a este trabajo y a la aplicación del diseño de experimentos, se ha podido aportar algunas aclaraciones en un tema, como es el de la apariencia visual del sparkle en el que todavía queda mucho por trabajar.

Como se ha concluido en algunos capítulos previos, el efecto de textura sparkle es detectado a mayor distancia para niveles de iluminación bajos y para la geometría de  $45^\circ$ as $45^\circ$ , además la temperatura de color no influye significativamente.

Gracias al diseño de experimentos se ha podido aplicar un análisis estadístico de datos para comprobar la influencia de las variables y su interacción entre ellas, obteniendo valiosa información.

No se ha podido corroborar la influencia del ángulo de iluminación a la hora de detectar los pigmentos/flakes bien orientados, ya que según la bibliografía, para las geometrías de  $15^\circ$ as $15^\circ$  y  $45^\circ$ as $45^\circ$  los pigmentos que se detectan estarían bien orientados con respecto a la superficie, en cambio para la geometría de  $75^\circ$ as $75^\circ$  los pigmentos que se detectan corresponden a los que no están bien orientados. Con este estudio no se han podido extraer conclusiones concretas acerca de esta afirmación, ya que en función del pigmento, la temperatura de color, geometría y nivel de iluminación se han obtenido unos resultados muy diversos.

En un futuro sería interesante muestrear más niveles de iluminación, tanto para valores más bajos de 800 lux como para más altos de 5000 lux, sobre todo para encontrar el punto de inflexión en el cual a que niveles de iluminación mínimos el observador deja de detectar sparkle.

## **8.5 Publicaciones**

Gómez, O.; Micó-Vicent, B.; Perales, E.; Chorro, E.; Viqueira, V.; Martínez-Verdú, F.M., “Implementación del diseño de experimentos en la detección visual del sparkle”, XI Congreso Nacional del color, Ourense 2016.

Gómez, O.; Micó-Vicent, B.; Perales, E.; Hurabait, K.; Viqueira, V.; Martínez-Verdú, F.M., “Analysis of the illumination influence in the sparkle detection applying the statistical design of experiments”, CIE Midterm Meeting, Jeju (Korea) 2017.

Gómez, O.; Perales, E.; Micó-Vicent, B.; Viqueira, V.; Hurabait, K.; Martínez-Verdú, F.M., “Statistical design of experiments applied on sparkle visual detection”, In Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, Lillehammer (Norway), September. 2017.

## Capítulo 9

# Conclusiones

A continuación se van a exponer las conclusiones extraídas a lo largo de los distintos capítulos desarrollados en esta tesis doctoral. Cabe reseñar que las siguientes afirmaciones son aplicables a muestras con características similares a las estudiadas, ya que, como se ha visto, cualquier variación de alguna de las variables implicadas en el proceso de detección del sparkle puede generar resultados diferentes a los obtenidos en el estudio. Pero, lo más importante, es que todas las metodologías empleadas aquí (medida instrumental, experimentos psicofísicos, correlación visual e instrumental, y análisis del diseño de experimentos) se puede extender perfectamente en el futuro a tipos de pigmentos goniocromáticos con similares o diferentes efectos de textura sparkle (living sparkle, etc).

### 9.1 Conclusiones globales

- Se ha conseguido demostrar la influencia de los parámetros multiescala en la apariencia del sparkle ([figura 1.1](#)) y extraer qué variables afectan en mayor medida a la hora de detectar el efecto de textura sparkle. Esta cuestión era fundamental ya que hasta la fecha no existía ningún estudio previo que abordara estas cuestiones, lo que era de vital importancia para la industria analizar cómo se detecta la textura de una muestra en función de diversas condiciones, ya sean estructurales, ambientales, colorimétricas, etc.
- Además se ha implementado una metodología fiable y aplicable a otros tipos de pigmentos goniocromáticos existentes con efectos de textura novedosos.
- Se ha utilizado el diseño de experimentos como herramienta principal para limitar los experimentos visuales a realizar, realizando el menor número de evaluaciones

visuales posibles y obteniendo los máximos resultados posibles para la interpretación de la interacción multi-escala de variables de detección visual del sparkle.

- Se ha comprobado con éxito la correlación visual e instrumental de detección de sparkle entre el único dispositivo multiángulo existente en el mercado y las valoraciones visuales obtenidas de un gran número de observadores. Para ello, a lo largo de esta tesis se han realizado un total de más de 35.000 evaluaciones visuales.

-Se ha confirmado la dificultad de generar un algoritmo de medida que incluya todas las variables implicadas en la detección del sparkle, ya que muchas de esas variables, o bien se desconocen a la hora de realizar la medida, o bien no se pueden controlar.

- Pese al grado de confidencialidad del algoritmo implementado en el dispositivo BYK-mac, se ha podido afirmar que los resultados obtenidos por este dispositivo son muy buenos y fiables.

### 9.1.1 Conclusiones parciales

En esta sección se realiza un resumen de las conclusiones parciales obtenidas en cada capítulo, después de realizar cada uno de los experimentos psicofísicos y tras aplicar el diseño estadístico de experimentos.

- **Correlación visual e instrumental:** El grado de sparkle general ( $S_G$ ) se correlaciona muy bien con la percepción visual humana a pesar de la utilización de nuevos y novedosos pigmentos de efecto los cuales no existían, y por lo tanto no fueron empleados, en la calibración del dispositivo comercial BYK-mac. En cuanto al algoritmo implementado por el IO-CSIC, resulta de vital importancia el poder generar una ecuación de sparkle general que englobe en un solo valor los datos generados de contraste y densidad de la muestra. De ese modo será posible realizar una correlación visual e instrumental fiable.
- **Tipo de pigmento:** Se han estudiado los dos tipos de pigmentos metalizados más empleados en la industria, como son los pigmentos silverdollar y cornflake. Ambos tienen características estructurales algo diferentes, lo que hace que sea el pigmento silverdollar el que sea detectado más (lejos) fácilmente por el observador.
- **Tamaño de pigmento:** Para un tamaño pequeño de pigmento no influye el hecho de seleccionar un tipo de pigmento u otro, ya que no se detecta el efecto de textura sparkle por parte del observador. Es necesario tener un tamaño de partícula grande para que el observador detecte el efecto de textura sparkle a mayor distancia.

Gracias al diseño de experimentos (DoE) se pudo ver la interacción existente entre el tamaño y la forma del pigmento a la hora de detectar sparkle. Si el objetivo es maximizar la distancia a la cual un observador detecta sparkle, se debe de seleccionar un pigmento silverdollar con un tamaño de partícula grande.

- **Concentración de pigmentos:** De forma general a menores concentraciones de pigmentos mayor será la distancia a la cual se podrá detectar el efecto de textura sparkle. Esto es debido a que se tiene mejor visibilidad, ya que existe menos competencia entre partículas para ser percibidas respecto del fondo. Indicar que en este aspecto tiene también mucha influencia el tipo y tamaño de pigmento que se use, además de la colorimetría/claridad del fondo de la muestra, lo que puede hacer variar la distancia máxima a la cual es detectable el efecto de textura sparkle.
- **Colorido/Claridad de la muestra:** Ante la falta de muestras concretas para el estudio de la influencia de la colorimetría de la muestra, únicamente se ha podido estudiar la influencia de la variación de la claridad de la muestra sobre dos fondos (negro y blanco). Sobre un fondo negro el efecto de textura sparkle es más fácilmente detectable (croma muy bajo), lo que hace que el observador pueda alejarse más de la muestra para apreciar el sparkle. En cambio sobre fondo blanco, las distancias de detección se acortan sustancialmente, lo que pone de manifiesta la influencia de la claridad del fondo de la muestra a la hora de detectar el sparkle.
- **Geometría de medida:** Se detecta claramente mejor el efecto de textura sparkle para la geometría de  $45^\circ$  a  $45^\circ$ . En todos y cada uno de los experimentos psicofísicos de detección del sparkle, los observadores han coincidido, y todos han sido capaces de detectar a mayor distancia el sparkle para esta geometría de medida.
- **Nivel de iluminación:** Para niveles de iluminación bajos, en torno a 800 lux, el observador era capaz de alejarse y detectar mejor el sparkle. En mayor o menor medida para todos los experimentos psicofísicos realizados, todos los observadores detectaron con más claridad el efecto de textura sparkle para niveles de iluminación bajos. La razón de esta afirmación es que existe menos competencia entre partículas para así poder destacar sobre el fondo y poder ser detectadas con mayor facilidad por el observador.
- **Tipo de lámpara:** En este aspecto no se han obtenido conclusiones fiables, ya que en el experimento psicofísico donde se emplearon distintas temperaturas de color (Cálida - 3200 lux y Día - 6500 lux) los resultados arrojaron que el observador detectaba ligeramente mejor el sparkle para una temperatura de color cálida. Pero la diferencia con respecto a la temperatura de color de

día era muy leve, por lo que sería interesante en un futuro ampliar/muestrear mejor este estudio con más temperaturas de color.

### 9.1.2 Balance de conclusiones

A lo largo de la tesis se han extraído conclusiones que hasta la fecha se desconocían ante la falta de estudios de este tipo. Gracias a este trabajo se tiene claramente identificadas la influencia e interacción de la mayoría de las variables implicadas en la detección del efecto de textura sparkle.

Ante estas afirmaciones se demuestra la dificultad de generar un modelo multi-dimensional no lineal, tanto con variables cuantitativas y cualitativas que integre todas las variables implicadas en el proceso de detección del sparkle por parte de un observador, ya que existen ciertas variables que un dispositivo nunca podrá medir o tener en cuenta. En cuanto a la relevancia de todas las variables estudiadas, claramente destaca la influencia de la colorimetría o claridad del fondo de la muestra así como el tamaño de pigmento empleado en la formulación. El resto de variables tienen todas su importancia en el proceso de detección, ya sea de forma individual o la interacción entre ellas, pero en menor medida que las dos variables citadas anteriormente.

Gracias a esta tesis se ha puesto de manifiesto la necesidad de tener también en consideración la colorimetría de la muestra, ya que pese a existir una buena correlación visual e instrumental por parte del BYK-mac, debido a su análisis del sparkle mediante imágenes en blanco y negro, se está obviando información fundamental de la muestra a la hora de proporcionar un valor de textura lo más realista posible.

## Capítulo 10

# Futuras líneas de investigación

En este apartado van a citarse las futuras líneas de trabajo, que ya se están planteando a partir de los resultados obtenidos a lo largo de toda la tesis.

- **Definición de los diferentes aspectos de textura:** En primer lugar y debido al auge durante los últimos años de incluir pigmentos de efecto en numerosos productos, se ha dado la circunstancia de la aparición de nuevos tipos de pigmentos, los cuales dan un nuevo efecto de textura, como se ha citado a lo largo del trabajo.

Un ejemplo claro serían los pigmentos tipo Xirallic, los cuales se ha comprobado que su comportamiento visual dista mucho de los convencionales pigmentos metalizados. Al efecto producido por los pigmentos Xirallic, la industria lo ha bautizado como “Color Living Sparkle”, pero no existe una definición clara al respecto.

Del mismo modo ocurre a la hora de diferenciar entre “Glitter” y “Sparkle”, pese a tener una normativa al respecto [7], por lo que lo primero que se debería de establecer son unas definiciones claras y concisas de cada termino relacionado con la textura, ya que incluso a día de hoy, preguntando a varios expertos en la materia sobre un tipo de efecto de textura en concreto, cada uno de ellos te proporciona una definición diferente. Es por ello, que se ha establecido un comité técnico de la CIE para en los próximos años poder tener bien definidos todos los conceptos existentes relacionados con la textura, o bien futuros nuevos términos que vayan apareciendo en la industria.

- **Influencia de la colorimetría:** Determinar la influencia del color de fondo en la percepción del sparkle. El efecto sparkle es como el color, una percepción que el observador tiene de una muestra. Por tanto, esta percepción puede



estar influenciada por otros factores, tales como el color de la propia muestra (claridad, tono y colorido), factores que deberían tenerse en cuenta en la evaluación visual para determinar si la percepción del sparkle depende de estos parámetros. Además es necesario comprobar si el actual algoritmo de medida y cálculo del sparkle del BYK-mac los tiene en cuenta para que exista una buena correlación visual e instrumental.

La dificultad de llevar a cabo este experimento psicofísico radica en la generación de las muestras, ya que se debe de fijar el tipo, tamaño y concentración de pigmentos en todas las muestras, y únicamente variar la claridad, tono y colorido de la muestra.

Las muestras ideales serían aquellas pertenecientes a un conjunto de muestras tipo Munsell (figura 10.1), así de este modo se abordaría con fiabilidad la influencia de la colorimetría de la muestra en la detección del sparkle.

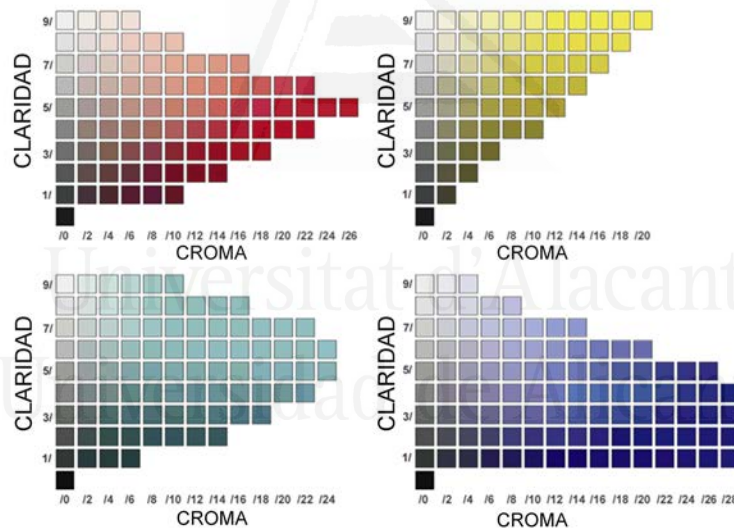


Figura 10.1: Sistema Munsell para generar muestras ideales para realizar el experimento de la influencia de la colorimetría en la detección del sparkle.

- **Influencia de la aplicación del recubrimiento sobre el sustrato:** Este es un aspecto novedoso muy a tener en cuenta, ya que en este caso, ya no depende de la composición del recubrimiento ni de las condiciones ambientales de medida, ahora se trata de que en función de las variables de aplicación de la pintura, ya sea, distancia, presión aplicada, tiempo de aplicación, etc., los resultados visuales son muy diferentes, incluso para muestras iguales en

cuanto a tipo de pigmento, tamaño, concentración, etc., si se aplica de forma diferente, el efecto de textura sparkle se detectará de un modo diferente también.

- **Influencia de los pigmentos de origen asiático imitando pigmentos de proveedores europeos:** Este caso en concreto es muy peculiar, ya que se ha podido realizar unas medidas preeliminares en un conjunto pequeño de muestras, las cuales se caracterizaban por tener el mismo tamaño y concentración de pigmentos, con la única diferencia es que un tipo de pigmento intentaba imitar un tipo de pigmento de un proveedor europeo. Sería de interés conocer en qué medida es posible imitar un tipo de pigmento en concreto, a la vez de analizar las variables instrumentales proporcionadas por ambos pigmentos y estudiar cómo reacciona el observador ante estas muestras, y ver si es capaz de diferenciarlos claramente.
- **Valor de textura total:** Sería sumamente interesante integrar en una única ecuación las diferencias de sparkle obtenidas de las tres geometrías de medida y además sumarle el valor de graininess, ya que también es un parámetro de textura pero bajo unas condiciones de iluminación diferentes. De este modo se podría englobar en un único valor (*delta de efecto*) la apariencia de textura, independientemente de la geometría de medida y del tipo de iluminación.

Una fórmula intuitiva para la industria podría ser la siguiente:

$$\Delta E_{\text{efecto}} = \sqrt{\frac{(\Delta S_{15^\circ})^2 + (\Delta S_{45^\circ})^2 + (\Delta S_{75^\circ})^2 + (\Delta G)^2}{4}} \quad (10.0.1)$$

$\Delta S_{15^\circ}$ : La diferencia de sparkle entre dos muestras para la geometría de  $15^\circ$  as  $15^\circ$ , optimizada a partir del modelo de discriminación inicial propuesto por el BYK-mac.

$\Delta S_{45^\circ}$ : La diferencia de sparkle entre dos muestras para la geometría de  $45^\circ$  as  $45^\circ$ , optimizada a partir del modelo de discriminación inicial propuesto por el BYK-mac.

$\Delta S_{75^\circ}$ : La diferencia de sparkle entre dos muestras para la geometría de  $75^\circ$  as  $75^\circ$ , optimizada a partir del modelo de discriminación inicial propuesto por el BYK-mac.

$\Delta G$ : La diferencia de graininess entre dos muestras.

De este modo se obtiene una diferencia de textura global entre dos muestras, y en función de ese valor obtenido y en base a unos parámetros de calidad establecidos previamente por la industria, se puede saber si una muestra es aceptable o no, sin influencia o valoración de color, durante el proceso de

fabricación de una forma más ágil y optimizada. Y, así, separarlo de la tendencia actual de calcular/proponer una fórmula de diferencia de apariencia total (color + textura).

- **Algoritmo del BYK-mac:** Sería interesante poder estudiar y analizar en profundidad el algoritmo implementado en el BYK-mac, ya que toda la industria e investigadores sobre esta temática tan concreta, nos debemos de basar en los valores instrumentales que nos proporciona, sin conocer cómo se obtienen realmente. Otra alternativa sería validar los nuevos algoritmos basados en nuevos instrumentos de medida del sparkle como los propuestos por X-Rite, el CD6-UPC, y Merck, además de como se ha citado anteriormente, generar un valor de sparkle general para el modelo propuesto por el IO-CSIC.

Se ha comprobado que existe una buena correlación del sparkle general que proporciona el dispositivo junto con los valores de sparkle que proporciona el observador, lo que hace de ello un dispositivo fiable a priori.

- **Estimación magnitud en nuevos dispositivos de medida de sparkle:** Esta tesis corroboró que el grado de sparkle ( $S_G$ ) se correlaciona muy bien con la percepción visual humana a pesar de la utilización de nuevos y novedosos pigmentos de efecto, como por ejemplo la mica sintética. Puede ser de mucho interés en un futuro estudiar otros nuevos pigmentos de efecto u otras muestras con efectos de sparkle similares empleados en otras industrias como plásticos, cosmética, etc. Incluso nuevas geometrías con iluminación igual o diferente a  $45^\circ$ , como el nuevo dispositivo de medida de X-Rite.

También puede ser de interés en el futuro aplicar esta misma metodología para futuros nuevos instrumentos de medida del sparkle, sean o no con las mismas geometrías de medida usadas en el BYK-mac.

## Bibliografía

- [1] Michael R Pointer. «Measuring visual appearance a framework for the future». En: *NPL Report COAM* 19 (2003) (vid. págs. 2, 3).
- [2] Colour Appearance Modeling for Colour Management Systems International Commission on Illumination. Technical Committee TC 8-01. «A colour appearance model for colour management systems: CIECAM02». En: CIE. 2004 (vid. pág. 3).
- [3] Guillaume Ged y col. «Recognizing real materials from their glossy appearance». En: *Journal of vision* 10.9 (2010), págs. 18-18 (vid. pág. 3).
- [4] Frédéric B Leloup y col. «Integration of Multiple Cues for Visual Gloss Evaluation». En: *Proc. Predicting Perceptions: the 3rd International Conference on Appearance*. 2012, págs. 52-55 (vid. págs. 3, 12, 65).
- [5] Frédéric B Leloup y col. «Repeatability and reproducibility of specular gloss meters in theory and practice». En: *Journal of Coatings Technology and Research* 13.6 (2016), págs. 941-951 (vid. pág. 3).
- [6] Michal Haindl y Jiri Filip. *Visual texture: Accurate material appearance measurement, representation and modeling*. Springer Science & Business Media, 2013 (vid. págs. 3, 13, 58, 59).
- [7] *ASTM E 284-13b, Standard Terminology of Appearance. ASTM International, West Conshohocken, PA*. 2013 (vid. págs. 3, 12-14, 19, 43, 83, 87, 89, 117, 146, 183).
- [8] Richard S Hunter y Richard W Harold. *The measurement of appearance*. John Wiley y Sons, 1987 (vid. págs. 8, 12).

- [9] Daniel Lozano. *La Apariencia Visual*. Editorial Dunken, 2015 (vid. págs. 8, 10).
- [10] John B Hutchings. «The continuity of colour, design, art, and science. I. The philosophy of the total appearance concept and image measurement». En: *Color Research and Application* 20.5 (1995), págs. 296-306 (vid. pág. 10).
- [11] John B Hutchings. *Food colour and appearance*. Springer Science & Business Media, 2011 (vid. pág. 11).
- [12] CS McCamy. «Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part I. Macro appearance». En: *Color Research and Application* 21.4 (1996), págs. 292-304 (vid. págs. 12, 57).
- [13] CS McCamy. «Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part II. Micro appearance». En: *Color Research and Application* 23.6 (1998), págs. 362-373 (vid. págs. 12, 14, 57).
- [14] Christian Eugène. «Measurement of total visual appearance: a CIE challenge of soft metrology». En: *12th Imeko TC1 and TC7 Joint Symposium on Man, Science and Measurement*. 2008, págs. 61-65 (vid. págs. 12, 13).
- [15] Michael R Pointer. «CIE TC1-65. A framework for the measurement of visual appearance - Technical Report 2005.» En: *CIE Publication* (2006), págs. 175-2006 (vid. págs. 12, 13, 43, 44).
- [16] Jonathan B Phillips, James A Ferwerda y Ann Nunziata. «Gloss discrimination and eye movements». En: *SPIE Electronic Imaging*. International Society for Optics y Photonics. 2010, 75270Z-75270Z (vid. págs. 12, 32).
- [17] Frédéric B Leloup y col. «Geometry of illumination, luminance contrast, and gloss perception». En: *JOSA A* 27.9 (2010), págs. 2046-2054 (vid. pág. 12).
- [18] Frédéric B Leloup y col. «Luminance-based specular gloss characterization». En: *JOSA A* 28.6 (2011), págs. 1322-1330 (vid. pág. 12).
- [19] Frédéric B Leloup y col. «The influence of the illumination geometry and luminance contrast on gloss perception». En: *CIE Expert Symposium on Appearance* (2010) (vid. pág. 12).

- [20] Roland W Fleming, Ron O Dror y Edward H Adelson. «Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties». En: *Journal of Vision* 3.5 (2003), pág. 3 (vid. pág. 12).
- [21] Josh Wills y col. «Toward a perceptual space for gloss». En: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 28.4 (2009), pág. 103 (vid. pág. 12).
- [22] Fabio Pellacini, James A Ferwerda y Donald P Greenberg. «Toward a psychophysically-based light reflection model for image synthesis». En: *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 2000, págs. 55-64 (vid. pág. 12).
- [23] James A Ferwerda, Fabio Pellacini y Donald P Greenberg. «Psychophysically based model of surface gloss perception». En: *Photonics West 2001-Electronic Imaging*. International Society for Optics y Photonics. 2001, págs. 291-301 (vid. pág. 12).
- [24] *ASTM D 523-89 (Reapproved 1999). Standard Test Method for Specular Gloss, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1999.* (Vid. pág. 12).
- [25] *ASTM D 4449-90 (Reapproved 1999). Standard Test Method for Visual Evaluation of Gloss DiFFerence Between Surfaces of Similar Appearance, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1999.* (Vid. pág. 12).
- [26] *ASTM D 5767-95 (Reapproved 1999). Standard Test Methods for Instrumental Measurement of Distinctness-of-Image Gloss of Coating Surfaces, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1999.* (Vid. pág. 12).
- [27] *ASTM E430 - 11. Standard Test Methods for Measurement of Gloss of High-Gloss Surfaces by Abridged Goniophotometry.* ASTM (vid. pág. 12).
- [28] Gerhard Pfaff. *Special Effect Pigments: technical basics and applications*. Vincentz Network GmbH & Co KG, 2008 (vid. págs. 13, 17, 26-29, 32, 40, 46, 47).
- [29] Maria E Nadal y Edward A Early. «Color measurements for pearlescent coatings». En: *Color Research & Application* 29.1 (2004), págs. 38-42 (vid. pág. 13).

- [30] Ye S Baek, Youngshin Kwak y Seungjoon Yang. «Visual appearance measurement of surfaces containing pearl flakes». En: *JOSA A* 32.5 (2015), págs. 934-942 (vid. pág. 13).
- [31] Ravishankar Rao, Gerald L Lohse y col. «Towards a texture naming system: identifying relevant dimensions of texture». En: *Visualization, 1993. Visualization'93, Proceedings., IEEE Conference on*. IEEE. 1993, págs. 220-227 (vid. pág. 13).
- [32] Eric Kirchner y col. «Observation of visual texture of metallic and pearlescent materials». En: *Color Research & Application* 32.4 (2007), págs. 256-266 (vid. pág. 13).
- [33] Eric Kirchner y col. «Quantifying the influence of texture on perceived color differences for effect coatings». En: *Proceedings of the 11th Congress of the International Color Association, Sydney*. 2009 (vid. pág. 13).
- [34] Neik Dekker y col. «Total appearance differences for metallic and pearlescent materials: contributions from color and texture». En: *Color Research & Application* 36.1 (2011), págs. 4-14 (vid. pág. 13).
- [35] Eric Kirchner y col. «Visibility of sparkle in metallic paints». En: *JOSA A* 32.5 (2015), págs. 921-927 (vid. págs. 13, 14, 19, 51, 94, 96, 118).
- [36] Andreas Höpe y col. «Goniochromatic and sparkle properties of effect pigmented samples in multidimensional configuration». En: *IS&T/SPIE Electronic Imaging*. International Society for Optics y Photonics. 2015 (vid. pág. 13).
- [37] Omar Gómez y col. «Influence of the Effect Pigment Size on the Sparkle Detection Distance». En: *Color and Imaging Conference*. Vol. 2015. 1. Society for Imaging Science y Technology. 2015, págs. 175-179 (vid. págs. 13, 14).
- [38] Elisabet Chorro y col. «The minimum number of measurements for colour, sparkle, and graininess characterisation in gonio-apparent panels». En: *Coloration Technology* 131.4 (2015), págs. 303-309 (vid. pág. 13).
- [39] Alejandro Ferrero y Sergio Bayón. «The measurement of sparkle». En: *Metrologia* 52.2 (2015), pág. 317 (vid. págs. 13, 51, 94, 102).

- [40] José M Medina y Jose A Diaz. «Advances in Industrial Color Testing of Automotive Metallic Finishes». En: *Photonics Spectra* 49.4 (2015), págs. 63-66 (vid. pág. 13).
- [41] Victor Medina, Alexis Paljic y Dominique Lafon-Pham. «A study of image exposure for the stereoscopic visualization of sparkling materials». En: *IS&T/SPIE Electronic Imaging*. International Society for Optics y Photonics. 2015, 93960N-93960N (vid. pág. 13).
- [42] Alejandro Ferrero y col. «A single analytical model for sparkle and graininess patterns in texture of effect coatings». En: *Optics express* 21.22 (2013), págs. 26812-26819 (vid. págs. 13, 51, 58, 61, 94, 95).
- [43] Sergey Ershov, Andrei Khodulev y Konstantin Kolchin. «Simulation of sparkles in metallic paints». En: *Proceeding of Graphicon*. 1999, págs. 121-128 (vid. págs. 13, 51, 58).
- [44] Roman Ďurikovič. «Explicit method of sparkling effect simulation». En: *Journal of Three Dimensional Images*, 16(4):96-100 (2002) (vid. págs. 13, 51, 58).
- [45] Roman Ďurikovič y William L Martens. «Simulation of sparkling and depth effect in paints». En: *Proceedings of the 19th spring conference on Computer graphics*. ACM. 2003, págs. 193-198 (vid. pág. 13).
- [46] Michal Haindl y Jiri Filip. «Advanced textural representation of materials appearance». En: *Siggraph Asia 2011 Courses*. ACM. 2011, pág. 1 (vid. pág. 13).
- [47] Julie Dorsey, Holly Rushmeier y François Sillion. *Digital modeling of material appearance*. Morgan Kaufmann, 2010 (vid. pág. 13).
- [48] *VW 50194: 2010-09: Definition of tolerances and evaluation of the differences in the sparkling and graininess of effect paints*. 2010 (vid. pág. 14).
- [49] Hans-Joachim Streitberger y Karl-Friedrich Dossel. *Automotive paints and coatings*. John Wiley & Sons, 2008 (vid. pág. 16).
- [50] Wilhelm Kettler. *Colour Technology of Coatings*. Vincentz Network, 2016 (vid. pág. 16).



- [51] *ASTM D16 - 16. Standard Terminology for Paint, Related Coatings, Materials, and Applications. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2016* (vid. pág. 16).
- [52] *CIE No 124-1: Colour notations and colour order systems. Bureau de la CIE, Wien. CIE, 1997* (vid. pág. 16).
- [53] *DIN 55943: Farbmittel - Begriffe. Deutsches Institut fuer Normung eV, Berlin. 2001* (vid. págs. 16, 23).
- [54] Alejandro Ferrero y col. «Color characterization of coatings with diffraction pigments». En: *JOSA A* 33.10 (2016), págs. 1978-1988 (vid. págs. 17, 40).
- [55] Georg A Klein y Todd Meyrath. *Industrial color physics*. Vol. 154. Springer Series in Optical Sciences. Springer, 2010 (vid. págs. 17, 19, 25, 29, 117, 131).
- [56] Peter Wiskling. *Metallic Effect Pigments: fundamentals and applications*. Vincentz Network GmbH y Co KG, 2006 (vid. pág. 17).
- [57] Max Born y Emil Wolf. «Principles of Optics, 7-th edition». En: *Cambridge University Press* 952 (1999), pág. 11 (vid. pág. 18).
- [58] Eric Kirchner y Werner Cramer. «Making sense of measurement geometries for multi-angle spectrophotometers». En: *Color Research & Application* 37.3 (2012), págs. 186-198 (vid. págs. 20, 40).
- [59] Hyoseung Park, Ye S Baek y Youngshin Kwak. «Pearliness as an intrinsic characteristic of surface». En: *International Color Symposium* (2011), págs. 139-142 (vid. pág. 25).
- [60] Werner R Cramer. «Examples of interference and the color pigment mixtures green with red and red with green». En: *Color Research & Application* 27.4 (2002), págs. 276-281 (vid. págs. 28, 43).
- [61] LM Greenstein y PE Lewis. «Pigment Handbook». En: *Vol. 1 John Wiley & Sons, New York* (1988) (vid. págs. 31, 40).
- [62] C Schmidt y M Friz. «Optical physics of synthetic interference pigments». En: *Kontakte* (1992), págs. 15-15 (vid. pág. 31).
- [63] RN Jagtap, CK Nere y KG Patel. «Coloration of polypropylene with interference pigment and the effect of wetting agents on its optical properties».

- En: *Journal of Coatings Technology and Research* 2.8 (2005), págs. 599-606 (vid. pág. 32).
- [64] *DIN 55944:2003-11. Colouring materials - Classification according to coloristic and chemical aspects*. 2011 (vid. pág. 33).
- [65] *DIN 55923:1983-02. Pigments; aluminium pigments and aluminium pigment pastes for paints; technical delivery specifications*. 1983 (vid. pág. 33).
- [66] *ISO 787-7:2009. General methods of test for pigments and extenders -Part 7: Determination of residue on sieve - Water method -Manual procedure* (vid. pág. 34).
- [67] Milton Kerker. *The scattering of light*. Academic Press, New York. 1969 (vid. pág. 37).
- [68] Craig F Bohren y Donald R Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 2008 (vid. pág. 37).
- [69] Hans G Völz y col. «Pigments, inorganic». En: *Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry* (2006) (vid. pág. 40).
- [70] Gerhard Pfaff y Peter Reynders. «Angle-dependent optical effects deriving from submicron structures of films and pigments». En: *Chemical reviews* 99.7 (1999), págs. 1963-1982 (vid. pág. 40).
- [71] Gunter Buxbaum. *Industrial inorganic pigments*. John Wiley & Sons, 2008 (vid. pág. 40).
- [72] Frank J Maile, Gerhard Pfaff y Peter Reynders. «Effect pigments: past, present and future». En: *Progress in Organic Coatings* 54.3 (2005), págs. 150-163 (vid. pág. 40).
- [73] Roy S Berns. *Principles of Color Technology*. Wiley New York, 2000 (vid. págs. 41, 42, 45).
- [74] Michael Bass y col. «Handbook of Optics, Volume I: Geometrical and Physical Optics». En: *Polarized Light, Components and Instruments (set)* (2010) (vid. pág. 41).
- [75] Francisco J. Burgos. «Gonio-hyperspectral imaging system based on light-emitting diodes for the analysis of automotive coatings. Tesis Doctoral».

- En: *Centre for Sensors, Instruments and Systems Development, Universitat Politècnica de Catalunya* (2016) (vid. págs. 43, 52, 58, 63, 94).
- [76] Werner R Cramer. «Magical Mixtures». En: *Paint & Coatings Industry* 9 (1999), pág. 72 (vid. pág. 43).
- [77] Werner R Cramer y Peter W Gabel. «Measuring special effects». En: *European coatings journal* 7-8 (2001), págs. 34-39 (vid. págs. 43, 47).
- [78] P Gabel, A Eberle y H Pieper. «Goniometric Quality Control of Pearl Pigments». En: *Farbe* 42.4 (1996), págs. 159-168 (vid. pág. 43).
- [79] Heike Hupp y Edgar Dörsam. «Measuring printed special-effect colours-First experiences with the Multi FX10 spectrophotometer». En: *Iarigai 2006, Proceedings* (2006), págs. 121-138 (vid. pág. 43).
- [80] T Baurle. «The determination of the color tolerances for metallic and pearlescent colors». En: *Farbe* 42.4 (1996), págs. 145-150 (vid. pág. 43).
- [81] Allan BJ Rodrigues y Larry E Steenhoek. «ASTM E-12 12: Measurement of Metallic and Pearlescent Colors». En: *Farbe* 42.4 (1996), págs. 151-158 (vid. pág. 43).
- [82] Allan BJ Rodrigues. «Color and appearance measurement of metallic and pearlescent finishes». En: *ASTM Standardization News* 23 (1995), págs. 68-68 (vid. pág. 43).
- [83] Gerhard Rosler. «Multigeometry color measurements of effect surfaces». En: *Die Farbe* 37 (1990), págs. 111-121 (vid. pág. 43).
- [84] *ASTM D 2175-01 (Reapproved 2013). Standard Practice for Specifying the Geometry of Multiangle Spectrophotometers, American Society for Testing and Materials (ASTM), 2001* (vid. pág. 43).
- [85] *ASTM E 2194 - 03. Standard Practice for Multiangle Measurements of Metal Flake Pigmented Materials, American Society for Testing and Materials (ASTM) , 2003* (vid. págs. 43, 45, 48).
- [86] *ASTM E2539 - 14. Standard Test Method for Multiangle Color Measurement of Interference Pigments. ASTM* (vid. pág. 43).

- [87] *DIN 6175-2:2001-03. Farbtoleranzen für Automobillackierungen - Teil 2: Effektlackierungen, Deutsches Institut für Normung (DIN), März 2001* (vid. pág. 43).
- [88] Fred E Nicodemus y col. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Vol. 160. National Bureau of Standards Washington, DC, USA, 1977 (vid. pág. 43).
- [89] Katharina Kehren y col. «Performance of multi-angle spectrophotometers». En: *Midterm Meeting of the International Colour Association (AIC)*. 2011, págs. 138-141 (vid. pág. 45).
- [90] Elísabet Chorro y col. «Reproducibility comparison between two multi-gonio-spectrophotometers». En: *Book of Abstracts of the Eleventh Congress of the International Colour Association. Sydney: AIC*. 2009, págs. 389-395 (vid. págs. 45, 47).
- [91] *ASTM E 2214-08. Standard Practice for Specifying and Verifying the Performance of Color-Measuring Instruments, American Society for Testing and Materials (ASTM) , 2008*. (Vid. pág. 45).
- [92] David R Wyble y Danny C Rich. «Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part I: Repeatability». En: *Color Research & Application* 32.3 (2007), págs. 166-175 (vid. pág. 45).
- [93] David R Wyble y Danny C Rich. «Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part II: Inter-instrument reproducibility». En: *Color Research & Application* 32.3 (2007), págs. 176-194 (vid. pág. 45).
- [94] Walter Franz. «Color formulation and quality assurance for special-effect paints-Challenges and solutions». En: *Pitture e Vernici-Europe*. 80 (2004), págs. 19-25 (vid. pág. 46).
- [95] Eric Kirchner y Jyotsna Ravi. «Predicting and measuring the perceived texture of car paints». En: *Predicting Perceptions: Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance*. Lulu. com. 2012, pág. 25 (vid. pág. 51).
- [96] Ana M Rabal, Joaquín Campos y Alicia Pons. «Gonio-espectrofotómetro para medidas de BRDF de patrones de reflectancia y objetos gonio-aparentes. Tesis Doctoral». En: *Universidad de Zaragoza* (2014). Presentado: 18 03 2014 (vid. págs. 51, 52, 98, 100).

- [97] Ana M Rabal y col. «Diseño y Construcción de un Novedoso Espectro-Gonio-Fotómetro». En: *IX Reunión Nacional de Óptica* (2009) (vid. pág. 51).
- [98] Alejandro Ferrero y col. «Variables separation of the spectral BRDF for better understanding color variation in special effect pigment coatings». En: *JOSA A* 29.6 (2012), págs. 842-847 (vid. pág. 51).
- [99] Esther Perales y col. «Influence of spectral power distribution of light sources on the colour appearance of goniochromatic colours». En: *CIE Centenary Conference*. 2013 (vid. pág. 53).
- [100] H Arai y G Baba. «Micro-brilliance of anisotropic paint surfaces». En: *Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association*. 2005, págs. 813-816 (vid. pág. 58).
- [101] Eric Kirchner, GJ van den Kieboom y R Super. «Accurate measurement of sparkle for effect coatings». En: *Proceedings of the AIC Interim Meeting, AIC, Stockholm*. 2008 (vid. pág. 58).
- [102] Zhongning Huang, Haisong Xu y M Ronnier Luo. «Camera-based model to predict the total difference between effect coatings under directional illumination». En: *Chinese Optics Letters* 9.9 (2011), pág. 093301 (vid. págs. 58, 60, 94).
- [103] Rafael C Gonzalez y Richard E Woods. «Digital image processing». En: *Nueva Jersey* (2008) (vid. pág. 58).
- [104] Milan Sonka, Vaclav Hlavac y Roger Boyle. *Image processing, analysis, and machine vision*. Cengage Learning, 2014 (vid. pág. 58).
- [105] M Mazo, L Boquete y R Barea. «Visión Artificial». En: *Publicaciones UAH*. ISBN 84.8138 (1996), pág. 101 (vid. pág. 58).
- [106] Jurandy Almeida y col. «Making colors worth more than a thousand words». En: *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing*. ACM. 2008, págs. 1180-1186 (vid. pág. 59).
- [107] Yixin Chen, Jia Li y James Z Wang. *Machine learning and statistical modeling approaches to image retrieval*. Vol. 14. Springer Science & Business Media, 2006 (vid. pág. 59).
- [108] Nicolaas Prins y col. *Psychophysics: a practical introduction*. Academic Press, 2016 (vid. pág. 63).

- [109] Stanley Coren. *Sensation and perception*. Wiley Online Library, 2003 (vid. pág. 64).
- [110] Jose M. Artigas. *Óptica Fisiológica: Psicofísica de la visión*. McGraw-Hill/Interamericana de España, 1995 (vid. pág. 64).
- [111] Mark D Fairchild. *Color appearance models*. Vol. 3rd. Ed. John Wiley & Sons, 2013 (vid. págs. 64, 80).
- [112] *ASTM D 2616-96. Standard Test Method for Evaluation of Visual Difference with a Gray Scale, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1996*. (Vid. págs. 64, 65).
- [113] Mauro Borgo, Alessandro Soranzo y Massimo Grassi. *MATLAB for Psychologists*. Springer Science & Business Media, 2012 (vid. pág. 65).
- [114] Wolfgang Härdle y Léopold Simar. *Applied multivariate statistical analysis*. Vol. 22007. Springer, 2007 (vid. pág. 65).
- [115] Zhong-Lin Lu y Barbara Doshier. *Visual psychophysics: From laboratory to theory*. MIT Press, 2013 (vid. págs. 66, 83).
- [116] Karl R. Wursthorn Julia C. O'Neill. «Optimizing Subjective Results». En: *ASA/ASQ Fall Technical Conference (2002)* (vid. pág. 66).
- [117] Manuel Melgosa y col. «Notes on the application of the standardized residual sum of squares index for the assessment of intra-and inter-observer variability in color-difference experiments». En: *JOSA A* 28.5 (2011), págs. 949-953 (vid. pág. 67).
- [118] Pedro A Garcia y col. «Measurement of the relationship between perceived and computed color differences». En: *JOSA A* 24.7 (2007), págs. 1823-1829 (vid. pág. 67).
- [119] Shing-Sheng Guan y M Ronnier Luo. «Investigation of parametric effects using small colour differences». En: *Color Research & Application* 24.5 (1999), págs. 331-343 (vid. pág. 67).
- [120] John H Xin, Hui-Liang Shen y C Chuen Lam. «Investigation of texture effect on visual colour difference evaluation». En: *Color Research and Application* 30.5 (2005), págs. 341-347 (vid. pág. 67).

- [121] Thomas P Ryan y JP Morgan. «Modern experimental design». En: *Journal of Statistical Theory and Practice* 1.3-4 (2007), págs. 501-506 (vid. pág. 68).
- [122] Douglas C Montgomery. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, 2008 (vid. págs. 68, 69).
- [123] Veronica Czitrom. «One factor at a time versus designed experiments». En: *The American Statistician* 53.2 (1999), págs. 126-131 (vid. pág. 68).
- [124] W Edwards Deming. «Out of the crisis, Massachusetts Institute of Technology». En: *Center for advanced engineering study, Cambridge, MA* 510 (1986) (vid. pág. 68).
- [125] LM Lye. «Tools and toys for teaching design of experiments methodology». En: *33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering* (2005) (vid. pág. 68).
- [126] Albert Rossler. *Design of Experiments for Coatings*. Vincentz Network, 2014 (vid. págs. 69, 75).
- [127] Abel Díaz. *Diseño Estadístico de Experimentos*. Universidad de Antioquia, 1999 (vid. pág. 74).
- [128] Ranjit K Roy. *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons, 2001 (vid. págs. 74, 75).
- [129] Douglas C Montgomery. «Generation III six sigma». En: *Quality and Reliability Engineering International* 21.6 (2005), págs. iii-iv (vid. pág. 74).
- [130] Keki R Bhote. *World class quality: Using design of experiments to make it happen*. AMACOM Div American Mgmt Assn, 1999 (vid. pág. 75).
- [131] Veronica Czitrom y Patrick D Spagon. *Statistical case studies for industrial process improvement*. Vol. 1. Siam, 1997 (vid. pág. 75).
- [132] CF Jeff Wu y Michael S Hamada. *Experiments: planning, analysis, and optimization*. Vol. 552. John Wiley & Sons, 2011 (vid. pág. 75).
- [133] Michael Starkey, Jeff Aughton y Roger Brewin. «Extending process thinking: design of experiments in sales and marketing». En: *The TQM Magazine* 9.6 (1997), págs. 434-439 (vid. pág. 75).

- [134] Arzum E Celik y Yalcin Karatepe. «Evaluating and forecasting banking crises through neural network models: An application for Turkish banking sector». En: *Expert systems with Applications* 33.4 (2007), págs. 809-815 (vid. pág. 75).
- [135] Omar Gómez y col. «Visual and instrumental correlation of sparkle by the magnitude estimation method». En: *Applied Optics* 55.23 (2016), págs. 6458-6463 (vid. pág. 79).
- [136] Tarbam EU project. «<http://www.eurekanetwork.org/content/e-3037-tarbam>». En: (2008) (vid. págs. 80, 91).
- [137] Stanley S Stevens y Eugene H Galanter. «Ratio scales and category scales for a dozen perceptual continua». En: *Journal of experimental psychology* 54.6 (1957), pág. 377 (vid. pág. 80).
- [138] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). «Colorimetry, 3rd Edition». En: *CIE Publication* (2004) (vid. pág. 81).
- [139] Francisco M Martínez Verdú y col. «Comparison of colorimetric features of some current lighting booths for obtaining a right visual and instrumental correlation for gonio-apparent coatings and plastics». En: *Proceedings of CIE 2012 Lighting Quality and Energy Efficiency*. 2012 (vid. págs. 81, 83).
- [140] Gabi Kigle-Böckler. «New and innovative testing technologies for effect finishes». En: *Color and Imaging Conference*. Vol. 2009. 1. Society for Imaging Science y Technology. 2009, págs. 91-94 (vid. pág. 81).
- [141] Kenneth Knoblauch y Laurence T Maloney. *Modeling psychophysical data in R*. Vol. 32. Springer Science y Business Media, 2012 (vid. pág. 83).
- [142] Manuel Melgosa y col. «Measuring color differences in automotive samples with lightness flop: A test of the AUDI2000 color-difference formula». En: *Optics express* 22.3 (2014), págs. 3458-3467 (vid. pág. 85).
- [143] Min Huang y col. «Evaluation of threshold color differences using printed samples». En: *JOSA A* 29.6 (2012), págs. 883-891 (vid. pág. 85).
- [144] Ana M Rabal y col. «Automatic gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in-and out-of-plane and retroreflection geometries». En: *Metrologia* 49.3 (2012), pág. 213 (vid. pág. 98).



- [145] Antonio G Navarro. «Evaluación visual de la distancia de detección del-Doctoral. Trabajo fin de Máster.» En: *Universidad de Alicante* (2012) (vid. pág. 117).
- [146] Gorow Baba. «Gonio-spectrophotometric analysis of pearl-mica paint». En: *Die Farbe* 37 (1990), págs. 99-110 (vid. pág. 141).
- [147] Martin Haas. «Impacts on the Impression of Printed Effect Pigments». En: *38th International Research Conference of iarigai*. 2011 (vid. pág. 143).
- [148] Janos Schanda. «CIE colorimetry». En: *Colorimetry: Understanding the CIE system* (2007), págs. 25-78 (vid. pág. 162).
- [149] *ANSI C78.376. American national standard for electric lamp: specification for the chromaticity for fluorescent lamps, American National Standard Institute (ANSI). Rosslyn, VA: National Electrical Manufacturers Association. 2001* (vid. pág. 164).