

DESCRIPCIÓN

PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR EL COLOR DE MATERIALES GONIOAPARENTES.**5 Objeto de la invención**

La presente invención divulga un procedimiento que permite estimar el color de recubrimientos gonioaparentes para cualquier ángulo de incidencia de la luz sobre el recubrimiento gonioaparente y para cualquier ángulo de observación.

10

La presente invención permite conocer en profundidad la apariencia de color de un objeto con recubrimiento gonioaparente (con un reflectancia espectral muy variable según las direcciones de iluminación y observación) a partir de una medida sencilla de su reflectancia espectral. De este modo, con un instrumento sencillo, un tiempo de caracterización muy corto y un número reducido de datos es posible estimar y visualizar la apariencia en 3D de objetos comerciales con este tipo de recubrimiento, siendo el caso más claro de aplicación de la presente invención el de la carrocería de un automóvil.

15

El procedimiento consiste en la aplicación de la técnica de análisis de componentes principales (Principal Components Analysis, PCA) a una serie de medidas de BRDF espectral a un número determinado de geometrías de medida, y en utilizar el resultado de este análisis (cuya principal ventaja es la separación de la información espectral de la información geométrica) para interpolar las diferentes variables que determinan la reflectancia de estos recubrimientos. La identificación de estas variables se hace a partir de la asunción de un modelo de reflectancia previamente publicado. Las variables son la reflectancia espectral de los pigmentos para dos condiciones de iluminación extremas y el grado de orientación no paralela de los pigmentos. Estas variables tienen una dependencia predecible respecto al ángulo de orientación de los pigmentos y el ángulo de incidencia de la luz sobre ellos para cada geometría de medida.

20

25

Este procedimiento permite valorar la apariencia tridimensional de color de un material gonioaparente para cualquier geometría de medida e iluminante, a partir de un número pequeño de medidas realizadas a otras geometrías.

30

La invención se enmarca dentro del sector de las tecnologías física, instrumentación óptica, química de pigmentos especiales (de efecto metalizado, perlado, de interferencia).

35 Antecedentes de la invención

Los recubrimientos gonioaparentes también son conocidos como recubrimientos con pigmentos de efecto especial ("coatings with special effect pigments"). Los pigmentos de efecto especial crean ilusión de profundidad óptica y presentan un efecto llamativo de variación de color con el ángulo (ver F. J. Maile, G. Pfaff and P. Reynders, "Effect pigments: past, present and future," Progress in Organic Coatings 54, 150-163 (2005)). Este cambio de color se observa tanto en claridad, croma y, a diferencia de los recubrimientos metálicos, también en tono. Como consecuencia de su atractiva apariencia, están empezando a ser muy populares en la industria de la automoción, siendo además muy utilizados en otros mercados (por ejemplo, el de la cosmética), o en aplicaciones de seguridad (anti-falsificación de dinero). Debido a su creciente popularidad, se requiere el desarrollo de nuevas técnicas e instrumentos para caracterizar la reflectancia espectral y el color para cualquier geometría de medida iluminación/observación y para cualquier iluminante. Hoy en día existen varios goniospectrómetros comerciales portátiles, cuyo uso está muy extendido en industrias como la de automoción (X-Rite MA98, Datacolor FX10, BYK-mac). Estos instrumentos no utilizan exactamente las mismas geometrías. Los estudios sobre las geometrías de medida óptimas para caracterizar estos recubrimientos no son del todo concluyentes. La norma ASTM para medidas multi-ángulo de color de pigmentos de interferencia (ASTM E 2539-08, Standard Practice for Multiangle Color Measurement of Interference Pigments. American Society for the Testing of Materials, West Conshohocken, PA; 2009) recomienda ocho geometrías de medida para la aplicación de control de calidad, pero indica que podrían ser "deseables o necesarias" geometrías adicionales para otras aplicaciones. Nadal e Early (M. E. Nadal and E. A. Early "Color Measurements for Pearlescent Coatings," Color Res. Appl. 29, 38-42 (2004)) han propuesto una combinación de tres ángulos de iluminación y cinco de observación.

40

45

50

55

Para la industria, el instrumento ideal para la medida del color de recubrimientos gonioaparentes debe ser portátil, rápido, sencillo y ser capaz de obtener toda la información necesaria del color de estos recubrimientos. Esto último se conseguiría eligiendo adecuadamente las geometrías de medida, de manera que no quede excluida una geometría en la que se pudiese obtener información no obtenida en otras geometrías de medida. Rapidez, simplicidad y portabilidad se consiguen eliminando en la medida de lo posible geometrías de medida redundantes, esto es que aporten la misma información. Las medidas

60

realizadas con un instrumento así deben ser suficientes para estimar el color de cualquier recubrimiento para cualquier condición de iluminación y observación.

El modelo de reflectancia espectral para recubrimientos gonioaparentes publicado recientemente por
 5 Kirchner y Cramer (E. Kirchner and W. Cramer, "Making Sense of Measurement Geometries for Multi-angle Spectrophotometers," Color Res. Appl. 37, 186-198 (2012)) proporciona un marco teórico de partida para determinar lógicamente el conjunto de geometrías de medida idóneo para cualquier recubrimiento. Muy recientemente, los inventores de la presente invención han publicado un artículo titulado "Variables separation of the spectral BRDF for better understanding color variation in special effect pigment coatings",
 10 en el cual se divulga la aplicación de la técnica de análisis de componentes principales (*Principal Components Analysis, PCA*) al modelo de reflectancia espectral para recubrimientos gonioaparentes publicado recientemente por Kirchner y Cramer.

Por otro lado, existen en el estado de la técnica solicitudes de patentes de métodos para caracterizar las propiedades ópticas de superficies tales como US-A1-2002163640 ("Method for quickly retrieving approximate color of metallic paint color") y US-A1-2011250351 ("Process for generating bidirectional reflectance distribution functions of gonioapparent materials with limited measurement data"), unos con geometrías de medida fijas y otros con geometrías variables (mayor complejidad), pero ninguno de ellos permite realizar una estimación de la BRDF espectral para cualquier ángulo de incidencia y para cualquier
 20 ángulo de observación.

Descripción de la invención

El procedimiento propuesto en la presente invención da como resultado, para cualquier geometría de
 25 iluminación/observación, la estimación de la Función de Distribución Bidireccional de Reflectancia espectral (BRDF) de un recubrimiento gonioaparente, partiendo tan sólo de las medidas de BRDF realizadas a un número limitado de geometrías. Si bien existen multi-gonio-espectrofotómetros en centros de investigación que permiten predecir a cualquier geometría de iluminación/observación, esto no es, en cualquier caso, práctico y se han desarrollado para la industria pequeños multi-gonio-espectrofotómetros portátiles, más
 30 rápidos y prácticos, con alrededor de una decena de geometrías de medida. El procedimiento de la presente invención podría aplicarse para diferentes conjuntos de geometrías de medida, pero hay que señalar que cuanto más geometrías y mejor escogidas (menos redundantes) éstas sean, más fiel será la estimación de la BRDF a otras geometrías. Una buena estimación de la BRDF a cualquier geometría es fundamental, pues a partir de la BRDF puede conocerse por integración la reflectancia espectral del
 35 recubrimiento para cualquier dirección y ángulo sólido de observación/iluminación, es decir, para cualquier situación geométrica con observadores e iluminantes reales. Como es bien sabido, el conocimiento de la reflectancia espectral permite conocer el color para cualquier tipo de iluminante.

El procedimiento de estimación del color de materiales gonioaparentes de la presente invención consiste en
 40 expresar las medidas de BRDF en una base matemática diferente mediante un análisis de componentes principales (*Principal Components Analysis, PCA*) de manera que quede claramente separada la variación espectral de la variación geométrica, y en relacionar esta nueva expresión con un modelo físico-óptico de reflectancia de este tipo de recubrimiento.

El procedimiento para estimar el color de materiales gonioaparentes de la presente invención comprende cinco pasos. Teniendo en cuenta lo anterior, los dos primeros pasos son los siguientes:
 i) realizar unas medidas de la Función de Distribución Bidireccional de Reflectancia Espectral "BRDF" a un conjunto predeterminado de geometrías;
 ii) aplicar un Análisis por Componentes Principales "PCA" a las medidas realizadas en el paso
 50 anterior.

La técnica PCA está bien descrita en la literatura, por lo que aquí sólo se detalla la forma en que ésta se aplica a los datos de la presente invención y la expresión final que se debe obtener. Los datos son una concatenación de N espectros de BRDF, uno por cada geometría de medida. Cada longitud de onda de los
 55 espectros (M en total) corresponde a una realización diferente de la variable BRDF. El PCA se aplicará sobre la BRDF espectral relativa, definida como:

$$BRDF_r(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda) = \frac{BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda)}{\langle BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda) \rangle_\lambda} - 1 \quad (ec1)$$

donde los subíndices i y s se refieren respectivamente a las direcciones de iluminación y observación, θ y ϕ son las coordenadas esféricas y azimutal de las direcciones iluminación u observación, λ es la longitud de
 60 onda y $\langle BRDF \rangle_\lambda$ es el promedio espectral de la BRDF.

El tercer paso del procedimiento de la presente invención comprende:

- iii) expresar, para cada medida realizada, la BRDF como una combinación lineal de unas direcciones de iluminación y de unas direcciones de observación según la ecuación ec2:

$$BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) = \langle BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) \rangle_l \left(1 + \sum_{j=1}^N c_j(q_i, f_i; q_s, f_s) H_j(l) \right) \quad (ec1)$$

donde $\langle BRDF \rangle_\lambda$ es el promedio espectral de BRDF, c_j son unos autovectores que representan la información geométrica de la BRDF y H_j representa la información espectral.

La matriz covarianza de la $BRDF_r$ (a diagonalizar en el PCA) será una matriz $N \times N$. La diagonalización de esta matriz produce tres tipos de elementos: N autovalores (lleva información sobre la varianza espectral para cada componente), N autovectores (información sobre la varianza espectral a cada geometría para cada componente) y N autoespectros (la distribución espectral para cada componente).

Autovectores y autoespectros pueden combinarse para expresar la BRDF como:

$$BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) = \langle BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) \rangle_l \left(1 + \sum_{j=1}^N c_j(q_i, f_i; q_s, f_s) H_j(l) \right) \quad (ec2)$$

Donde los coeficientes c_j llevan la información geométrica de la BRDF y los H_j llevan la información espectral. Los coeficientes c_j están relacionados directamente con los autovectores y los H_j con los autoespectros, donde la única diferencia está en que los H_j están normalizados a la desviación típica de los autoespectros, y los c_j son los autovectores normalizados a la inversa de la desviación típica de los autoespectros, para mantener constante el producto $c_j \cdot H_j$.

El cuarto paso del procedimiento de la presente invención comprende:

- iv) comparar la ecuación ec2 anterior con la ecuación ec3:

$$BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) = a_0(q_i, f_i; q_s, f_s) BRDF_0(l) + D(q_{flake}) \sum_{j=1}^n a_j(q_{inc}) BRDF_j(l)$$

donde la $D(\theta_{flake})$ es la función de distribución de los ángulos de orientación de unos pigmentos que forman los materiales gonioaparentes, y $a_j(\theta_{inc})$ es la función que relaciona el color de los pigmentos en función del ángulo de incidencia de la luz sobre los pigmentos; tal que la comparación entre ambas ecuaciones permite determinar las funciones $D(\theta_{flake})$ y $a_j(\theta_{inc})$ ya que $BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l)$ es igual en ambas ecuaciones y conocida para cada medida realizada.

El modelo físico-óptico asumido en el procedimiento de la presente invención define dos ángulos fundamentales para entender la reflectancia espectral de estos recubrimientos:

- 1) Ángulo de incidencia sobre los pigmentos de interferencia del recubrimiento (q_{inc}). Este ángulo se calcula a partir de las direcciones de iluminación y observación y del índice de refracción del material y del pigmento, teniendo en cuenta que la reflexión sobre el pigmento es especular. Por definición, la dependencia de la reflectancia del pigmento con la longitud de onda es una función de q_{inc} . De este modo, podría escribirse la reflectancia espectral del recubrimiento como una combinación lineal de n espectros $BRDF_j(l)$ con ponderaciones a_j dependientes de q_{inc} . En el caso más sencillo, se trataría de una combinación lineal de dos espectros, uno representando la distribución espectral de la reflectancia a ángulos bajos de q_{inc} y otro a ángulos altos.
- 2) Ángulo de orientación de los pigmentos (q_{flake}) respecto a la superficie del recubrimiento. No todos los pigmentos son paralelos a la superficie, por lo que el efecto gonioaparente no se produce simplemente en la dirección especular. Se calcula teniendo en cuentas las mismas consideraciones que en el cálculo de q_{inc} . La distribución de estas orientaciones $[D(q_{flake})]$, modifican la reflectancia espectral medida, que se compone de la suma de las reflexiones en todos los pigmentos en una dirección de observación dada.

Este modelo permite escribir una expresión general de la BRDF de recubrimientos gonioparentes como:

$$5 \quad BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) = a_0(q_i, f_i; q_s, f_s)BRDF_0(l) + D(q_{flake}) \sum_{j=1}^n a_j(q_{inc})BRDF_j(l) \quad (ec3)$$

donde el sumando $BRDF_0(l)$ es la componente de la BRDF que no depende de los pigmentos de interferencia, de modo que a_0 no depende tampoco de q_{inc} ni de q_{flake} . Tanto $BRDF_0(l)$ como los espectros $BRDF_j(l)$ se identifican con los autoespectros $H_j(\lambda)$ de la ecuación ec2.

10 La determinación de estas las funciones $D(\theta_{flake})$ y $a_j(\theta_{inc})$ para un recubrimiento dado resuelve el problema de cambio de color que presentan los recubrimientos gonioparentes. Esta determinación se hace a partir de relacionar los pesos a_j (ec3) con los coeficientes experimentales c_j (ec2).

15 1) Determinación de $D(\theta_{flake})$. Se representa en función de θ_{flake} el valor de los coeficientes c_2 relativos a un θ_{inc} bajo, siendo c_2 el peso asociado al autoespectro con más peso a ángulos de iluminación bajos en relación a su peso a los ángulos de iluminación altos, es decir, el asociado a la componente espectral de la reflectancia que predomina cuando se iluminan los pigmentos ángulo bajos. La curva obtenida se ajusta a una distribución gaussiana, que se relaciona directamente con $D(\theta_{flake})$.

20 2) Determinación de $a_j(\theta_{inc})$. Una vez conocido $D(\theta_{flake})$, es posible obtener los $a_j(\theta_{inc})$ a partir de los c_j , siendo la mayor complicación saber elegir la condiciones que determinan qué coeficientes c_j están relacionados con la reflexión en los pigmentos. Estos son los que representan un cambio considerable de valor entre geometrías de medida alejadas. En muchos casos no son más de dos autoespectros, los que representan el cambio de color debido a los pigmentos: uno relacionado con ángulos q_{inc} altos y otro relacionado con ángulos bajos. Los autovectores c_j asociados a estos autoespectros se dividen por el $D(\theta_{flake})$ calculado y se representan sus valores en función de q_{inc} , sólo los que corresponden a bajos ángulos θ_{flake} , que son menos ruidosos. En un caso típico, se verán dos curvas que se cruzan, una que domina a ángulos q_{inc} altos y otro a ángulos bajos. Estas curvas se ajustarán a un polinomio.

30 Este procedimiento puede aplicarse a conjuntos diferentes de geometrías de medida, siempre y cuando estas geometrías permitan identificar la suficiente información espectral como para determinar, en mayor o menor grado, $D(\theta_{flake})$ y $a_j(\theta_{inc})$.

35 El quinto paso del procedimiento de la presente invención comprende:

v) estimar el color de un material gonioparente aplicando la ec3 con las funciones $D(\theta_{flake})$ y $a_j(\theta_{inc})$ previamente calculadas.

40 En una realización particular de la invención, sería posible realizar un software que estime automáticamente y según el procedimiento detallado de la presente invención, la BRDF de recubrimientos gonioparentes para un instrumento dado, lo cual da toda la información necesaria para estimar el color de la superficie para cualquier geometría iluminación/observación y para cualquier iluminante.

45 Para el procedimiento definido anteriormente según la presente invención, el conjunto predeterminado de geometrías que optimiza el procedimiento comprende nueve configuraciones tal que:

Configuración	1	2	3	4	5	6	7	8	9
θ_i (°)	20	20	20	20	20	50	50	50	50
θ_s (°)	30	10	0	-10	-30	70	30	-30	-70

50 donde θ_i se corresponde con el ángulo de iluminación respecto a la superficie que se quiere medir, y θ_s es el ángulo de observación respecto a la normal, expresándose como negativo cuando la observación se produce desde el semiplano de incidencia que contiene la dirección de iluminación.

El conjunto predeterminado definido anteriormente mantiene optimizado el procedimiento de la presente invención para un intervalo de $\pm 3^\circ$ en cada uno de los valores de las nueva configuraciones.

55

El procedimiento de la presente invención tiene múltiples aplicaciones en todos los campos donde se utilizan los materiales gonioaparentes, siendo su uso preferido la estimación del color de un material gonioaparente comprendido en una pintura aplicable a vehículos. Por esta razón, debe entenderse que la presente invención se refiere asimismo a un método para determinar el color de un material gonioaparente comprendido en una pintura aplicable a vehículos, donde el método comprende predecir el color del material gonioaparente mediante el procedimiento definido anteriormente para cualesquiera realización del procedimiento de la presente invención.

Breve descripción de las figuras.

10 La figura 1 muestra la definición de los ángulos θ_{flake} y θ_{inc} . Se muestra un pigmento de interferencia dentro del material, el ángulo con el que incide sobre él un rayo (θ_{inc}) y su orientación respecto a una superficie de la muestra (θ_{flake}).

15 La figura 2 muestra una representación de los pesos c_2 en función de θ_{flake} para determinar $D(\theta_{flake})$.

La figura 3 muestra una representación de a_{low} (peso para ángulos de incidencia bajos sobre el pigmento) y a_{high} (peso para ángulos de incidencia altos sobre el pigmento), junto con el ajuste polinómico.

20 La figura 4 muestra un ejemplo de realización de la matriz de covarianza para medidas reales de BRDF espectral, a partir de las nueve geometrías de medida propuestas. Los números fueron redondeados al primer decimal. La figura 4A corresponde a una muestra de Arctic Fire y la figura 4B a una muestra de Lapis Sunlight.

25 La figura 5 muestra un ejemplo de realización de la diagonalización de las matrices de covarianza mostradas en la figura 4. Los números fueron redondeados al primer decimal. Los valores de la diagonal principal son los autovalores, el resto de los elementos son cero. Solo tres autovalores tienen un valor no despreciable. 5A corresponde a una muestra de Arctic Fire y 5B a una muestra de Lapis Sunlight.

30 La figura 6 muestra los tres autovectores obtenidos de la diagonalización mostrada en la figura 5, que se corresponden con los tres autovalores más altos. La figura 6A corresponde a una muestra de Arctic Fire y la figura 6B a una muestra de Lapis Sunlight.

35 La figura 7 muestra los tres autoespectros obtenidos de la diagonalización mostrada en la figura 5, que se corresponden con los tres autovalores más altos. La figura 7A corresponde a una muestra de Arctic Fire y la figura 7B a una muestra de Lapis Sunlight.

40 La figura 9 muestra los valores $a(q_{inc})$ calculados a partir de los autovectores y el ajuste realizado con un polinomio. La figura 9A corresponde a una muestra de Arctic Fire y la figura 9B a una muestra de Lapis Sunlight.

45 La figura 10 muestra un histograma de las diferencias de color entre las medidas reales a toda geometría del recubrimiento gonioaparente Lapis Sunlight y las estimaciones a partir de solo nueve geometrías, según la presente invención.

La figura 11 muestra un histograma de las diferencias de color entre las medidas reales a toda geometría del recubrimiento gonioaparente Arctic Fire y las estimaciones a partir de solo nueve geometrías, según la presente invención.

50 La figura 12 muestra las posiciones de iluminación y observación para el conjunto de nueve geometrías de medida que optimizan el procedimiento de la presente invención.

Descripción de un ejemplo de realización de la invención

55 Se muestra a continuación un ejemplo de realización del procedimiento descrito. Se quiere automatizar el procedimiento para cualquier recubrimiento gonioaparente. Se parte para ello de tan sólo nueve geometrías de medida, las que se muestran en la siguiente tabla:

60

Tabla 1

	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_s(^{\circ})$	$f_s-f_i(^{\circ})$	$\theta_{inc} (^{\circ})$	$\theta_{flake} (^{\circ})$
1	20	30	180	16,3	3,1
2	20	10	180	10,0	3,3
3	20	0	0/180	6,6	6,6
4	20	10	0	3,3	9,9
5	20	30	0	3,2	16,3
6	50	70	180	34,7	4,0
7	50	30	180	25,0	5,6
8	50	30	0	5,6	25,1
9	50	70	0	4,0	34,7

Los valores de $\theta_i (^{\circ})$ y $\theta_s (^{\circ})$ de la Tabla 1, representan el conjunto de geometrías que optimiza el procedimiento de la presente invención. Los valores de la tabla 1 están representados en la figura 12.

Para cualquier recubrimiento gonioaparente a caracterizar, se mide la BRDF a cada una de las nueve geometrías de medida (medidas 1 a 9 de la tabla 1). A continuación, se aplica la técnica de componentes principales "PCA" a los espectros obtenidos.

Los datos experimentales son una concatenación de nueve espectros de BRDF, uno por cada geometría de medida. La BRDF es una función de distribución que expresa cómo una superficie determinada refleja la energía radiante en cada dirección del espacio. Cada longitud de onda de los espectros (M en total), en este caso 401 espectros entre 380 nm y 780 nm, corresponde a una realización diferente de la variable BRDF. El PCA se aplicará sobre la BRDF espectral relativa, definida como:

$$BRDF_r(q_i, f_i; q_s, f_s; l) = \frac{BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l)}{\langle BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) \rangle_l} - 1 \quad (1)$$

donde los subíndices i y s se refieren respectivamente a las direcciones de iluminación y observación, θ y ϕ son las coordenadas esféricas y azimutal de la direcciones iluminación u observación, λ es la longitud de onda y $\langle BRDF \rangle_\lambda$ es el promedio espectral de la BRDF.

La matriz covarianza de la $BRDF_r$ (a diagonalizar en el PCA) será una matriz 9×9 (ver Figura 4A-4B). La diagonalización de esta matriz produce tres tipos de elementos: 9 autovalores (llevan información sobre la varianza espectral para cada componente) que se corresponden con los elementos de la matriz covarianza una vez diagonalizada (ver Figura 5A-5B), 9 autovectores (llevan información sobre la varianza espectral a cada geometría para cada componente) (ver Figura 6A-6B) y 9 autoespectros (representan la distribución espectral para cada componente) (ver Figura 7A-7B).

Autovectores y autoespectros pueden combinarse fácilmente para expresar la BRDF como:

$$BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) = \langle BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) \rangle_l \left(1 + \sum_{j=1}^N c_j(q_i, f_i; q_s, f_s) H_j(l) \right) \quad (2)$$

Donde los coeficientes c_j llevan la información geométrica de la BRDF y los H_j llevan la información espectral. Los coeficientes c_j están relacionados directamente con los autovectores y los H_j con los autoespectros, donde la única diferencia está en que los H_j están normalizados a la desviación típica de los autoespectros, y los c_j son los autovectores normalizados a la inversa de la desviación típica de los autoespectros, para mantener constante el producto $c_j \cdot H_j$.

Bastan tres autoespectros para reproducir mediante su combinación lineal el color a cualquier geometría de iluminación observación. Un autoespectro corresponde a la reflectancia espectral independiente de los pigmentos de interferencia (primera componente principal), otro a la reflectancia espectral cuando se incide sobre los pigmentos con ángulo bajo de incidencia θ_{inc} (segunda componente principal) y el tercero a la reflectancia espectral cuando se incide con un ángulo alto (tercera componente principal).

En el presente ejemplo de realización, el procedimiento de la presente invención define dos ángulos fundamentales para entender la reflectancia espectral de estos recubrimientos (ver Figura 1):

- Ángulo de incidencia sobre los pigmentos de interferencia del recubrimiento (q_{inc}). Este ángulo se calcula a partir de las direcciones de iluminación y observación y del índice de refracción del material. El índice de refracción del material es 1 y el del pigmento es 1.5 para este ejemplo concreto de realización, teniendo en cuenta que la reflexión sobre el pigmento es especular. Por definición, la dependencia de la reflectancia del pigmento con la longitud de onda es una función de q_{inc} . De este modo, podría escribirse la reflectancia espectral del recubrimiento como una combinación lineal de n espectros $BRDF_j(l)$ con ponderaciones a_j dependientes de q_{inc} . En el caso más sencillo, se trataría de una combinación lineal de dos espectros, uno representando la distribución espectral de la reflectancia a ángulos bajos de q_{inc} y otro a ángulos altos (ver Figura 9A-9B).
- Ángulo de orientación de los pigmentos q_{flake} respecto a la superficie del recubrimiento. No todos los pigmentos son paralelos a la superficie, por lo que el efecto gonioparente no se produce simplemente en la dirección especular. Se calcula teniendo en cuenta las mismas consideraciones que en el cálculo de q_{inc} . La distribución de estas orientaciones [$D(q_{flake})$] (ver Figura 8A-8B), modifican la reflectancia espectral medida, que se compone de la suma de las reflexiones en todos los pigmentos en una dirección de observación dada.

Este modelo permite escribir una expresión general de la BRDF de recubrimientos gonioparentes como:

$$BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; l) = a_0(q_i, f_i; q_s, f_s)BRDF_0(l) + D(q_{flake}) \sum_{j=1}^n a_j(q_{inc})BRDF_j(l) \quad (3)$$

donde el sumando $BRDF_0(l)$ es la componente de la BRDF que no depende de los pigmentos de interferencia, de modo que a_0 no depende tampoco de q_{inc} ni de q_{flake} . Tanto $BRDF_0(l)$ como los espectros $BRDF_j(l)$ se identifican con los autoespectros $H_j(\lambda)$ de la ecuación 2 (ver Figura 7A-7B).

- 25 El siguiente paso es determinar $D(\theta_{flake})$. Para ello, se representan los valores de los autovectores de la segunda componente principal c_2 en función de θ_{flake} , pero sólo los correspondientes a las geometrías con $\theta_{inc} < 7^\circ$ (3, 4, 5, 8 y 9), que son cinco puntos bien distribuidos a lo largo del dominio de θ_{flake} , siendo c_2 el peso asociado a un autoespectro con más peso a ángulos de iluminación bajos en relación a su peso a los ángulos de iluminación altos, es decir, el asociado a la componente espectral de la reflectancia que predomina cuando se iluminan los pigmentos ángulo bajos (ver figura 2). Los valores representados se ajustan a una función gaussiana más una constante. La función gaussiana será $D(\theta_{flake})$ (Figura 8A-8B).

- Tras determinar $D(\theta_{flake})$, se puede determinar $a_j(\theta_{inc})$ (ver Figura 9A-9B). Una vez conocido $D(\theta_{flake})$, se pueden obtener los $a_j(\theta_{inc})$ a partir de los c_j , siendo la mayor complicación saber elegir las condiciones que determinan qué coeficientes c_j están relacionados con la reflexión en los pigmentos. Estos son los que representan un cambio considerable de valor entre geometrías de medida alejadas. Por tanto, para determinar $a_j(\theta_{inc})$ se modifican los autovectores de las segunda y tercera componentes principales dividiendo por $D(\theta_{flake})$, se representan estos valores en función de θ_{inc} , pero sólo los correspondientes a las geometrías con $\theta_{flake} < 7^\circ$ (1, 2, 3, 6, 7), que son cinco puntos bien distribuidos a lo largo del dominio de θ_{inc} .
- 40 Estos se ajustan a dos polinomios, uno por componente. Estos dos polinomios representan $a_2(\theta_{inc})$ y $a_3(\theta_{inc})$.

- Como demostración de que este procedimiento es válido utilizando sólo estas 9 geometrías, se automatizó este procedimiento y se comparó una estimación de color con medidas reales de color a 448 geometrías repartidas uniformemente dentro de los hemisferios de iluminación y observación. Esta comparación se hizo para dos recubrimientos de efecto especial diferentes (Lapis Sunlight y Arctic Fire). El resultado de la comparación se muestra en las figuras 4A-4B y 5A-5B, respectivamente, donde se representa el histograma de las diferencias de color ΔE entre los colores medidos y los estimados por el procedimiento, según este ejemplo de invención.

REIVINDICACIONES

1.- Procedimiento para estimar el color de materiales gonioaparentes caracterizado porque comprende los siguientes pasos:

5

- i) realizar unas medidas de la Función de Distribución Bidireccional de Reflectancia Espectral “BRDF” a un conjunto predeterminado de geometrías;
- ii) aplicar un Análisis por Componentes Principales “PCA” a las medidas realizadas en el paso anterior;
- 10 iii) expresar, para cada medida realizada, la BRDF como una combinación lineal de unas direcciones de iluminación y de unas direcciones de observación según la ecuación ec2:

$$BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda) = \langle BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda) \rangle_\lambda \left(1 + \sum_{j=1}^N c_j(q_i, f_i; q_s, f_s) H_j(\lambda) \right)^{-1}$$

donde $\langle BRDF \rangle_\lambda$ es el promedio espectral de BRDF, c_j son unos autovectores que representan la información geométrica de la BRDF y H_j representa la información espectral;

15

- iv) comparar la ecuación ec2 anterior con la ecuación ec3:

$$BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda) = a_0(q_i, f_i; q_s, f_s) BRDF_0(\lambda) + D(\theta_{flake}) \sum_{j=1}^n a_j(\theta_{inc}) BRDF_j(\lambda)$$

20

donde la $D(\theta_{flake})$ es la función de distribución de los ángulos de orientación de unos pigmentos que forman los materiales gonioaparentes, y $a_j(\theta_{inc})$ es la función que relaciona el color de los pigmentos en función del ángulo de incidencia de la luz sobre los pigmentos; tal que la comparación entre ambas ecuaciones permite determinar las funciones $D(\theta_{flake})$ y $a_j(\theta_{inc})$ ya que $BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda)$ es igual en ambas ecuaciones y conocida para cada medida realizada;

25

- v) estimar el color de un material gonioaparente aplicando la ec3 con las funciones $D(\theta_{flake})$ y $a_j(\theta_{inc})$ previamente calculadas.

30

2.- Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque el paso ii) comprende aplicar el Análisis por Componentes Principales “PCA” sobre la BRDF espectral relativa definida según la ecuación ec1:

$$BRDF_r(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda) = \frac{BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda)}{\langle BRDF(q_i, f_i; q_s, f_s; \lambda) \rangle_\lambda} - 1$$

donde los subíndices i y s se refieren respectivamente a las direcciones de iluminación y observación, θ y ϕ son las coordenadas esféricas y azimutal de la direcciones iluminación u observación, λ es la longitud de onda y $\langle BRDF \rangle_\lambda$ es el promedio espectral de la BRDF.

35

3.- Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, caracterizado porque $D(\theta_{flake})$ es la función gaussiana que se ajusta a la representación de los valores de los coeficientes c_2 , uno por cada medida, relativos a un θ_{inc} , los cuales se representa en función de θ_{flake} .

40

4.- Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado porque $a_j(\theta_{inc})$ se calcula dividiendo los autovectores c_j entre el $D(\theta_{flake})$ calculado y se representan sus valores en función de θ_{inc} para aquellos valores de θ_{flake} inferiores a un valor predeterminado, tal que se obtienen dos curvas que se cruzan donde cada curva se ajusta a un polinomio.

45

5.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el conjunto predeterminado de geometrías que optimiza el procedimiento comprende nueve configuraciones tal que:

Configuración	1	2	3	4	5	6	7	8	9
θ_i (°)	20	20	20	20	20	50	50	50	50
θ_s (°)	30	10	0	-10	-30	70	30	-30	-70

donde θ_i se corresponde con el ángulo de iluminación respecto a la superficie que se quiere medir, y θ_s es el ángulo de observación respecto a la normal, expresándose como negativo cuando la observación se produce desde el semiplano de incidencia que contiene la dirección de iluminación.

- 5 6.- Procedimiento según la reivindicación 5, caracterizado porque el conjunto predeterminado de geometrías que optimiza el procedimiento tiene, para cada una de las geometrías, una tolerancia de $\pm 3^\circ$.
- 7.- Uso del procedimiento definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 para estimar el color de un material gonioaparente comprendido en una pintura aplicable a vehículos.

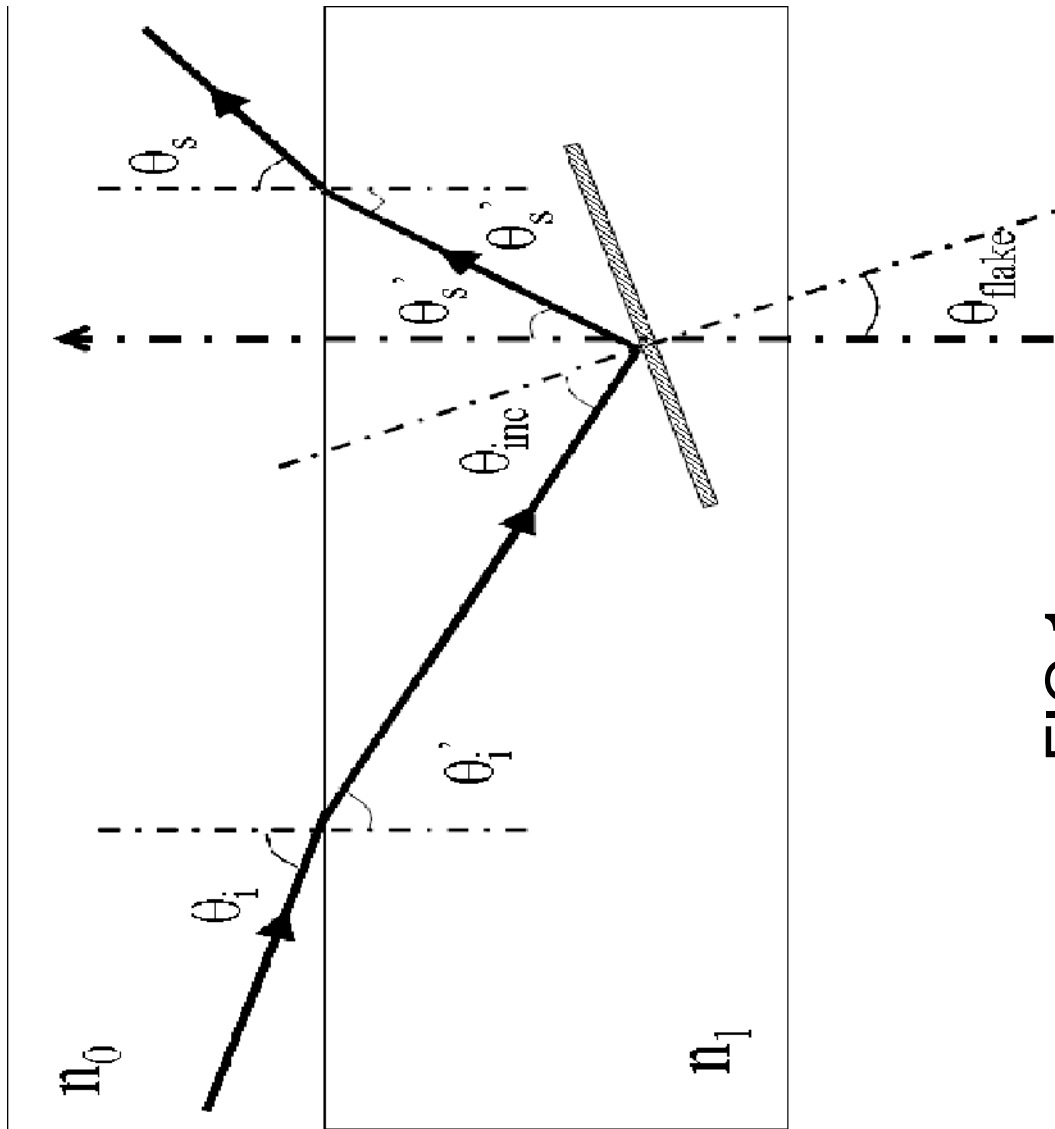


FIG.1

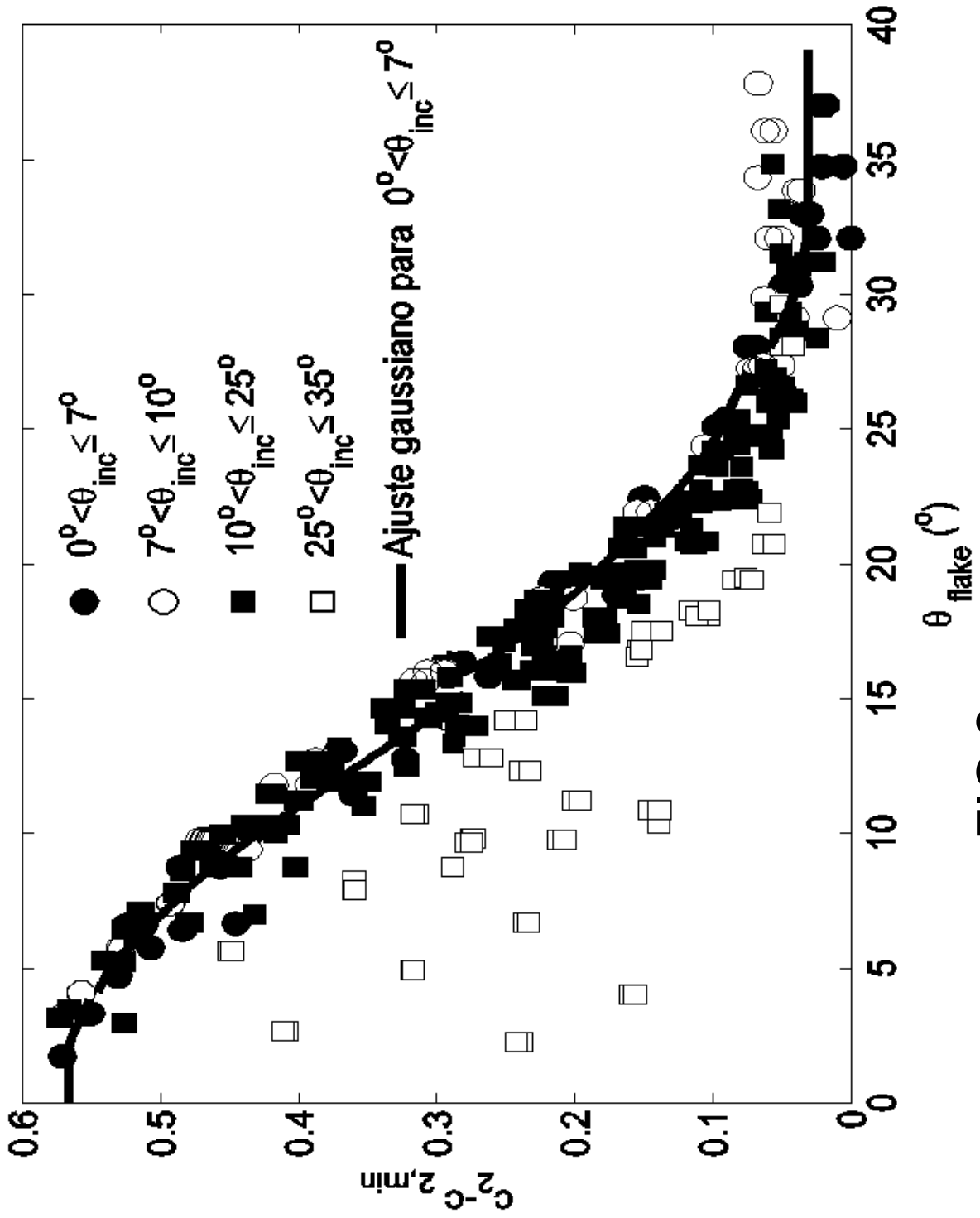


FIG.2

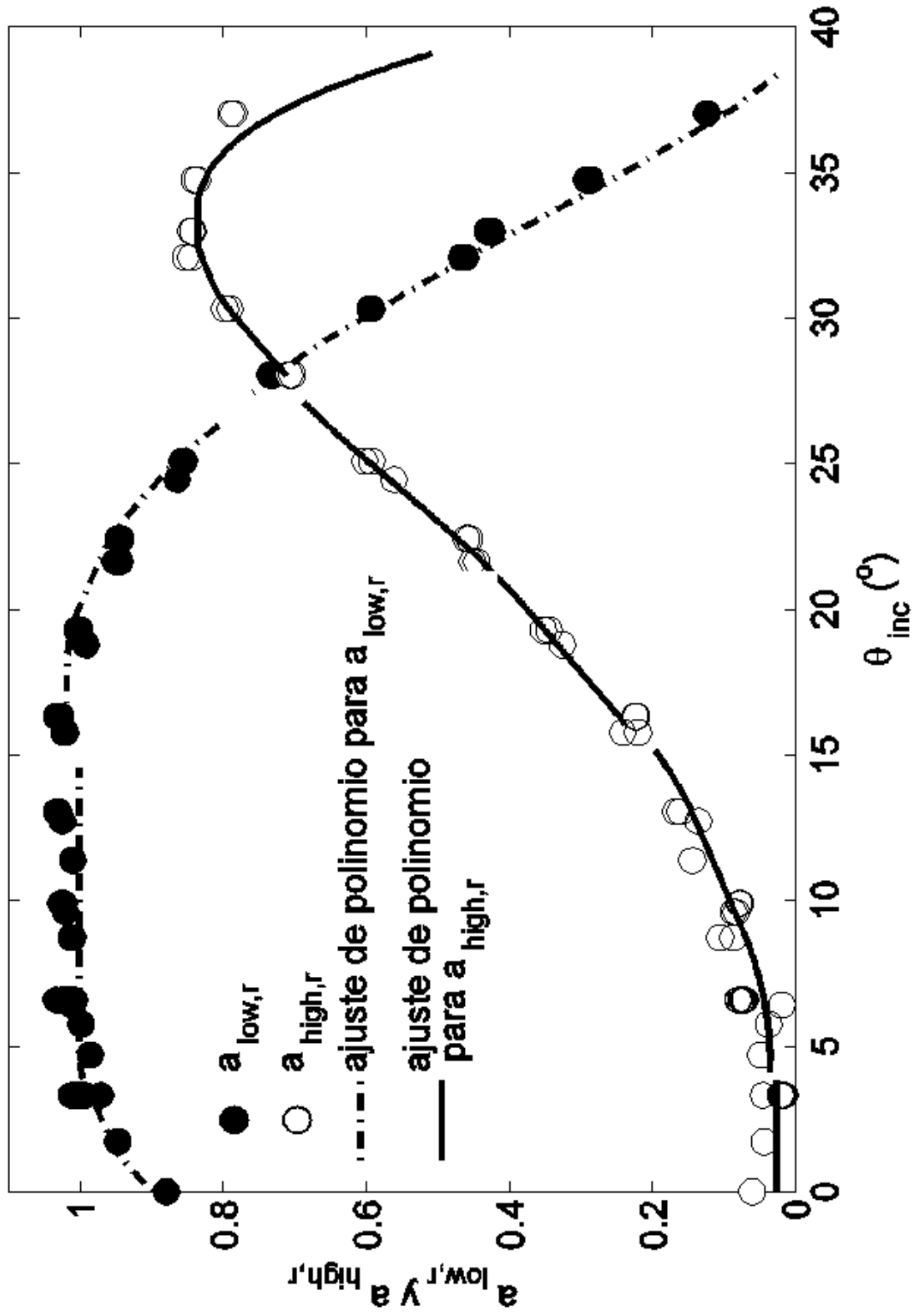


FIG.3

1,4	1,3	1,1	0,9	0,5	-0,2	1	-0,1	-0,3
1,3	1,4	1,2	1	0,5	-0,3	0,8	-0,1	-0,3
1,1	1,2	1	0,9	0,5	-0,3	0,6	0	-0,1
0,9	1	0,9	0,7	0,4	-0,3	0,5	0,1	0
0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	-0,2	0,2	0,4	0,4
-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	1,6	0,5	-0,1	0
1	0,8	0,6	0,5	0,2	0,5	1,1	-0,1	-0,3
-0,1	-0,1	0	0,1	0,4	-0,1	-0,1	0,8	1
-0,3	-0,3	-0,1	0	0,4	0	-0,3	1	1,3

FIG. 4A

3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	1,5	3,1	1,9
3,1	3	2,9	2,8	2,5	1	2,5	1,9
2,9	2,9	2,8	2,7	2,4	1,1	2,4	1,9
2,8	2,8	2,7	2,6	2,4	1,2	2,4	1,9
2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	1,7	2,3	2
1,5	1	1,1	1,2	1,7	4,5	3,2	2,2
3,1	2,5	2,4	2,4	2,3	3,2	4,1	2
1,9	1,9	1,9	1,9	2	2,2	2	2
1,6	1,5	1,6	1,7	1,9	2,4	1,8	2

FIG. 4B

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,3	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1,8	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2,4	0
0	0	0	0	0	0	0	0	5,2

FIG. 5A

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1,6	0	0
0	0	0	0	0	0	0	4,6	0
0	0	0	0	0	0	0	0	20,5

FIG. 5B

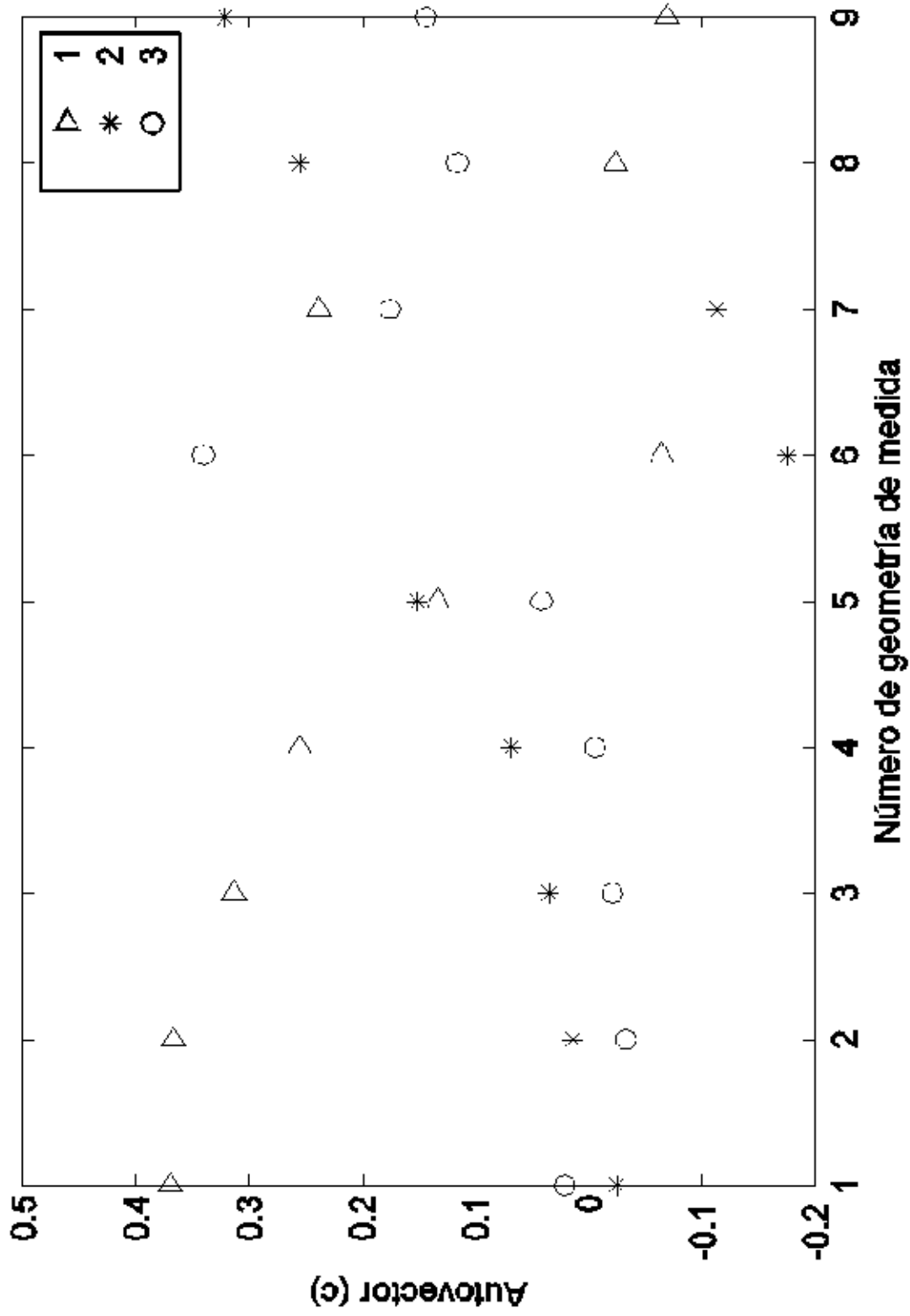


FIG.6A

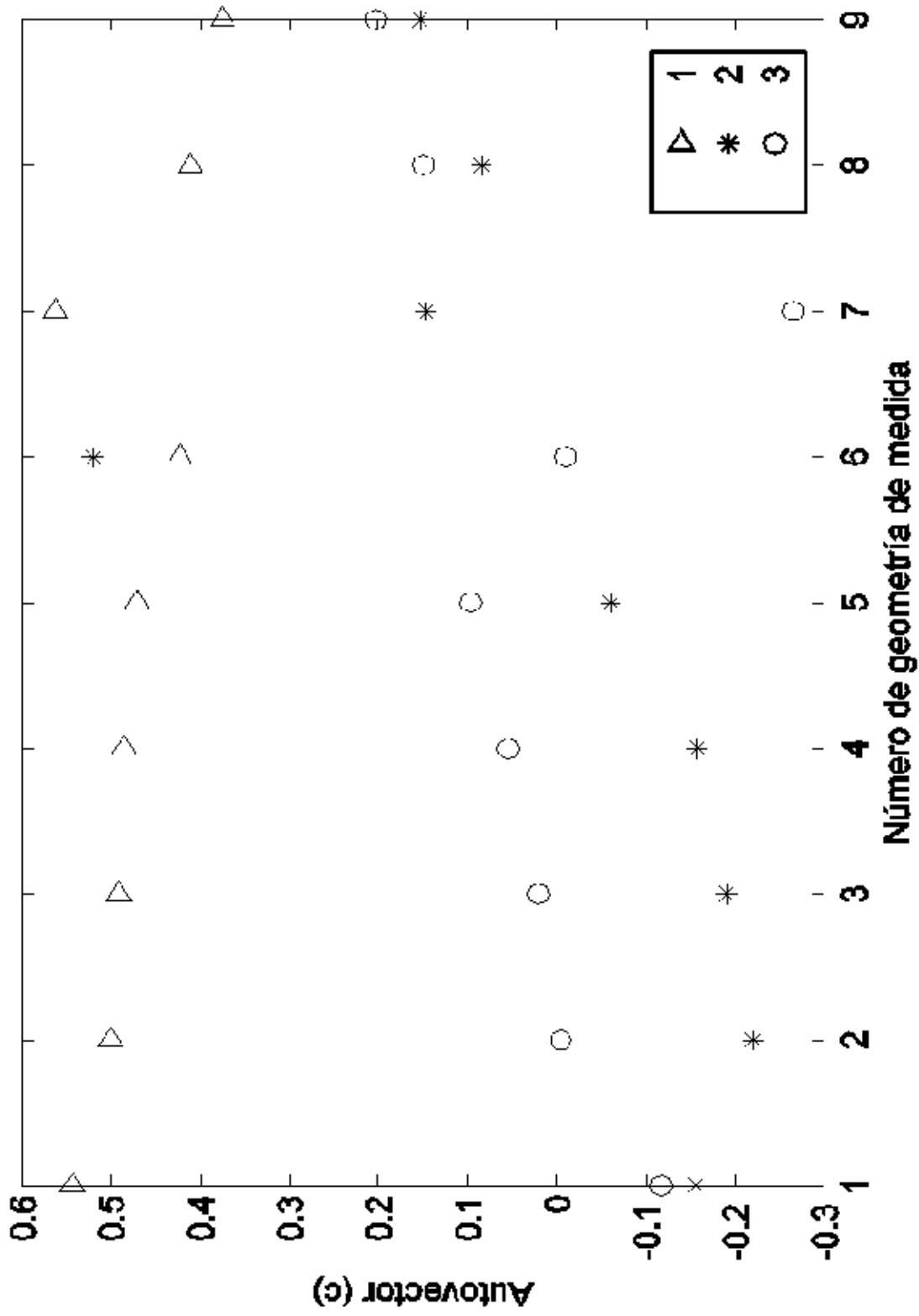


FIG.6B

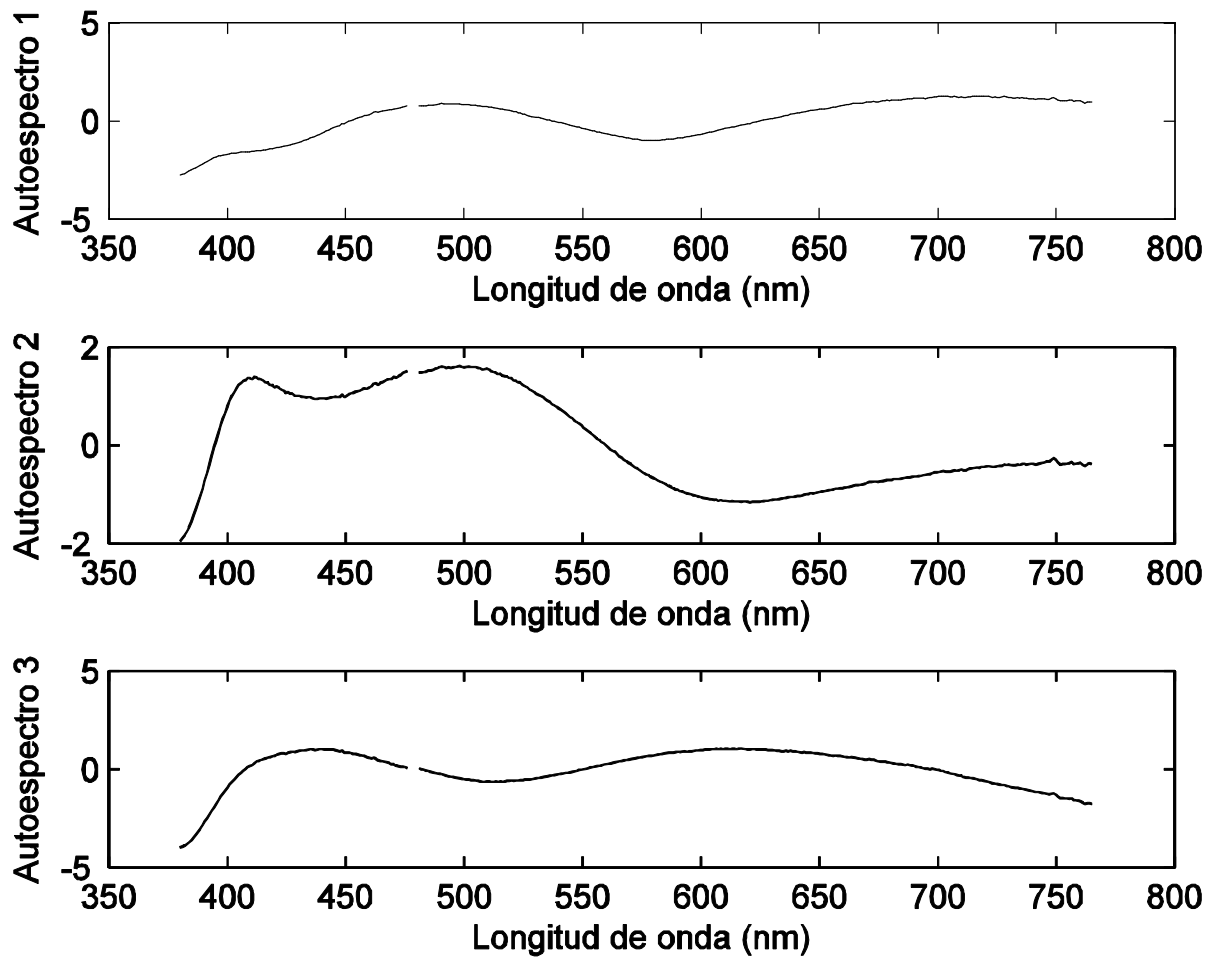


FIG. 7A

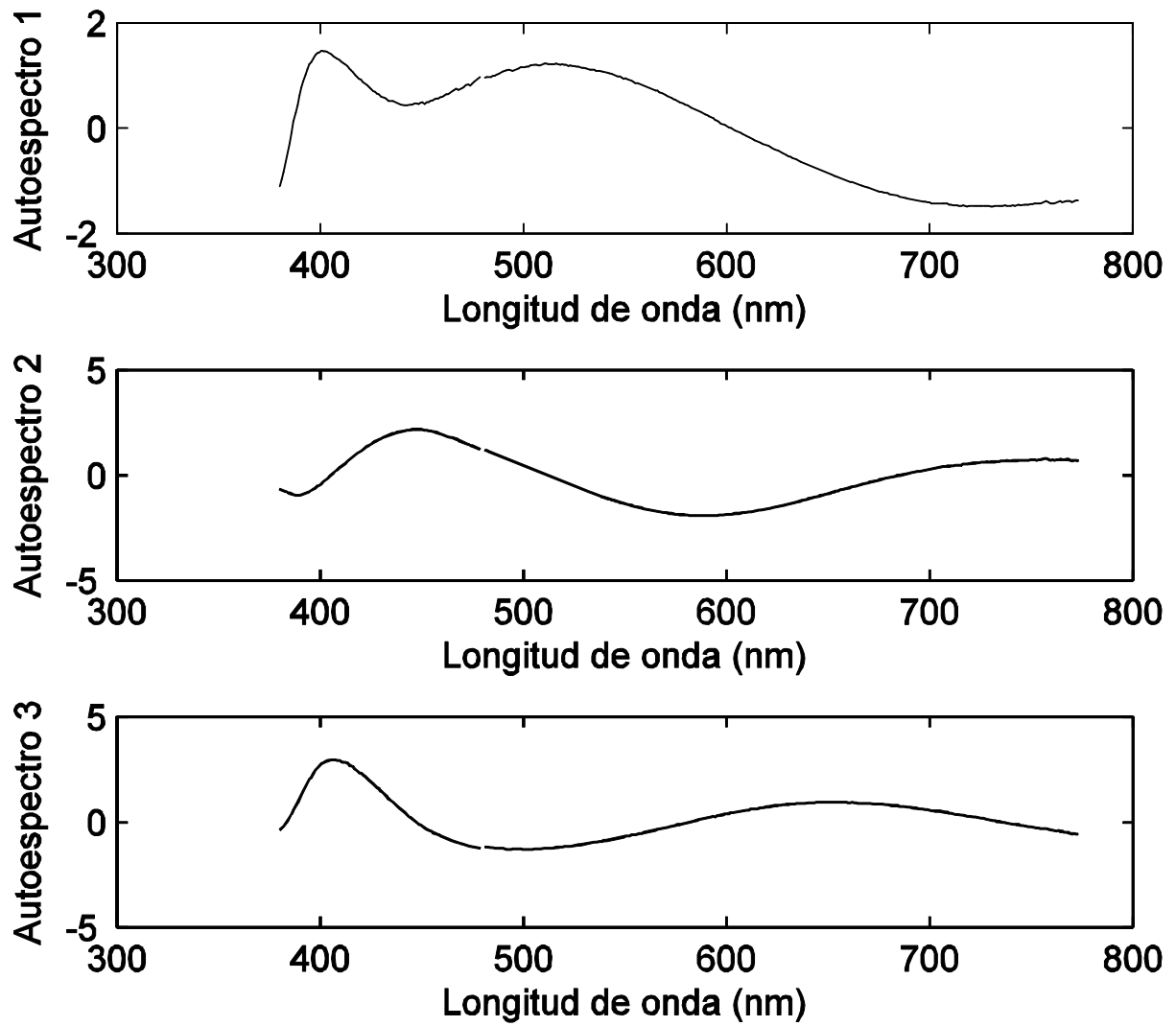


FIG. 7B

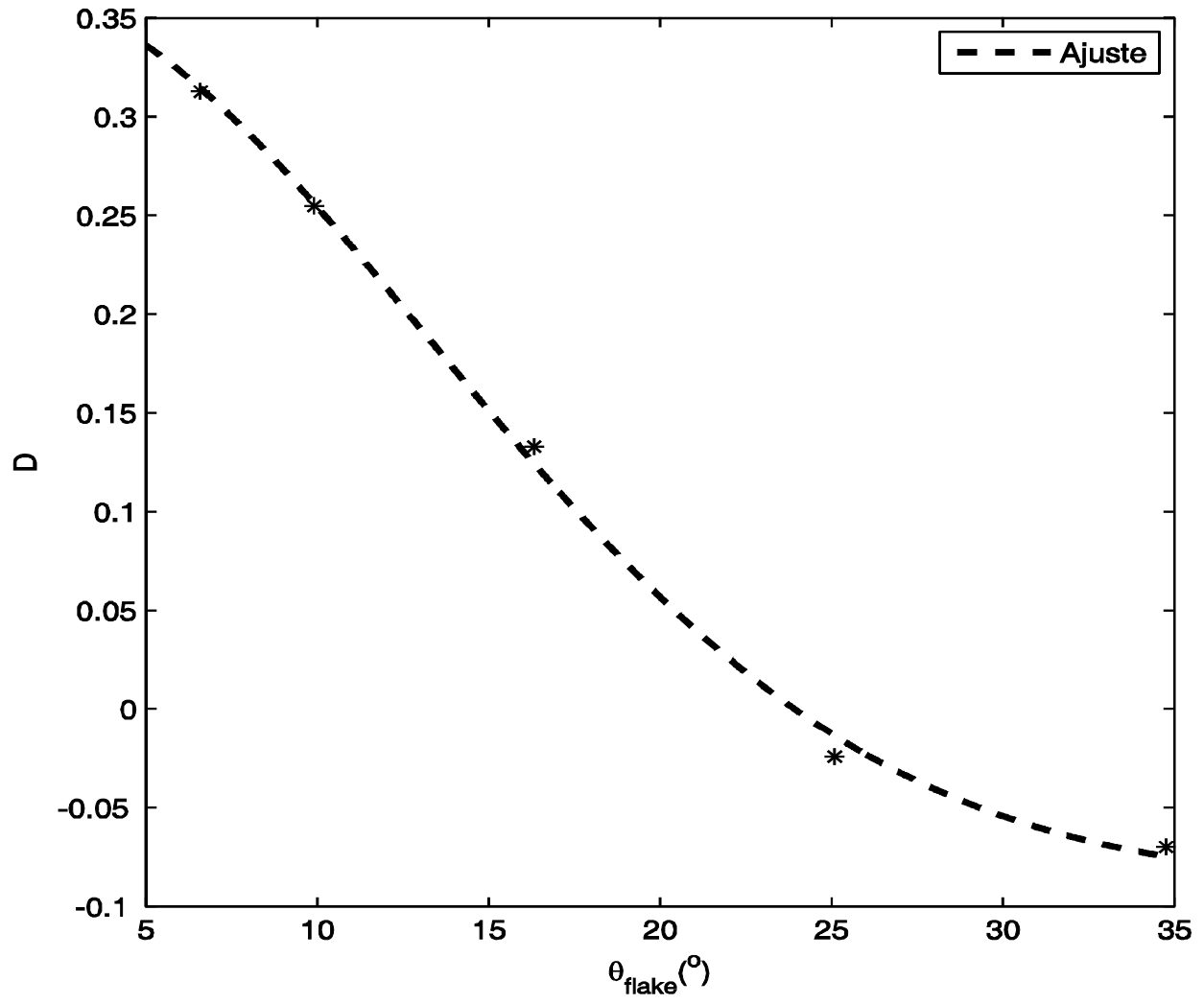


FIG. 8A

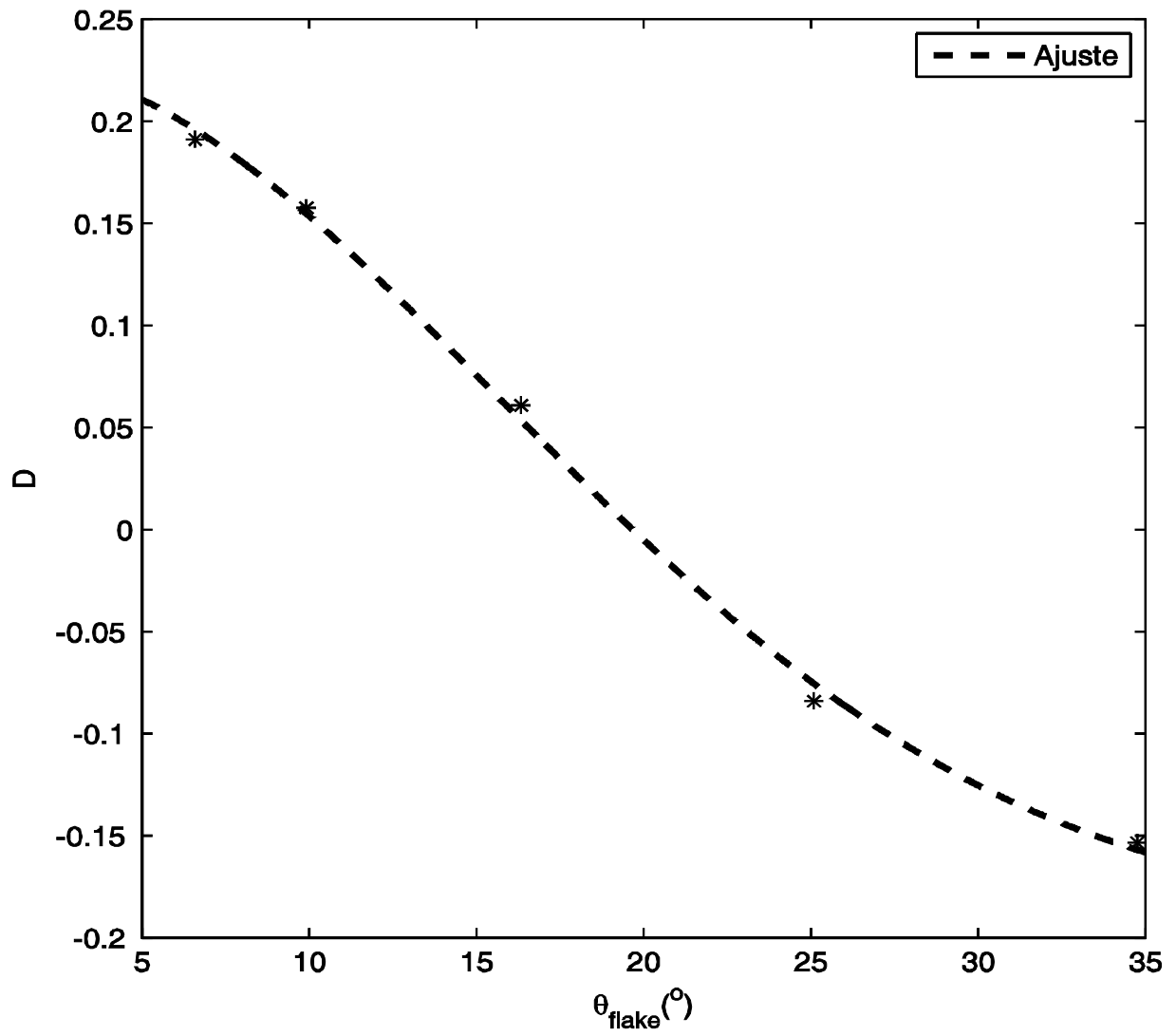


FIG. 8B

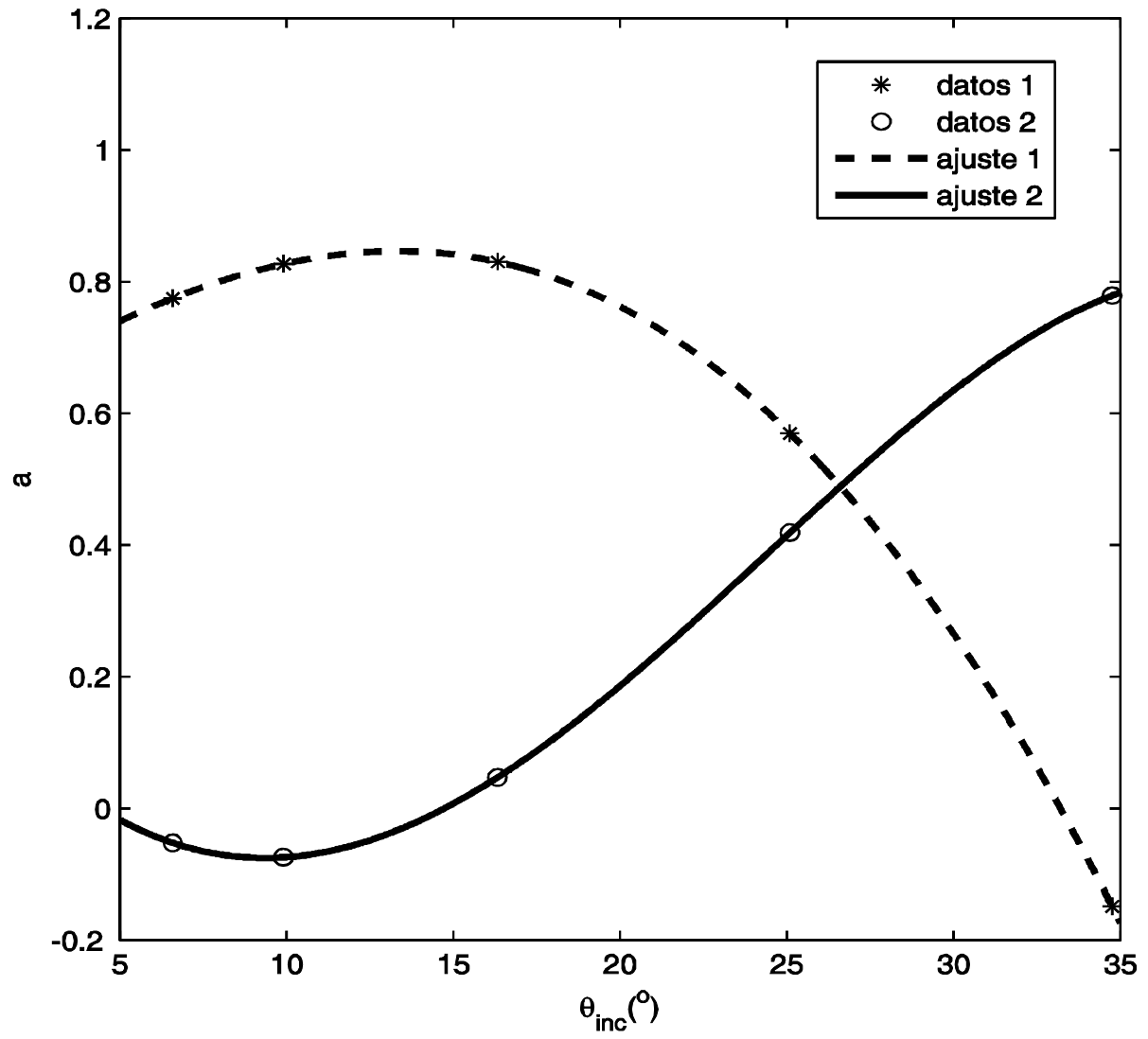


FIG. 9A

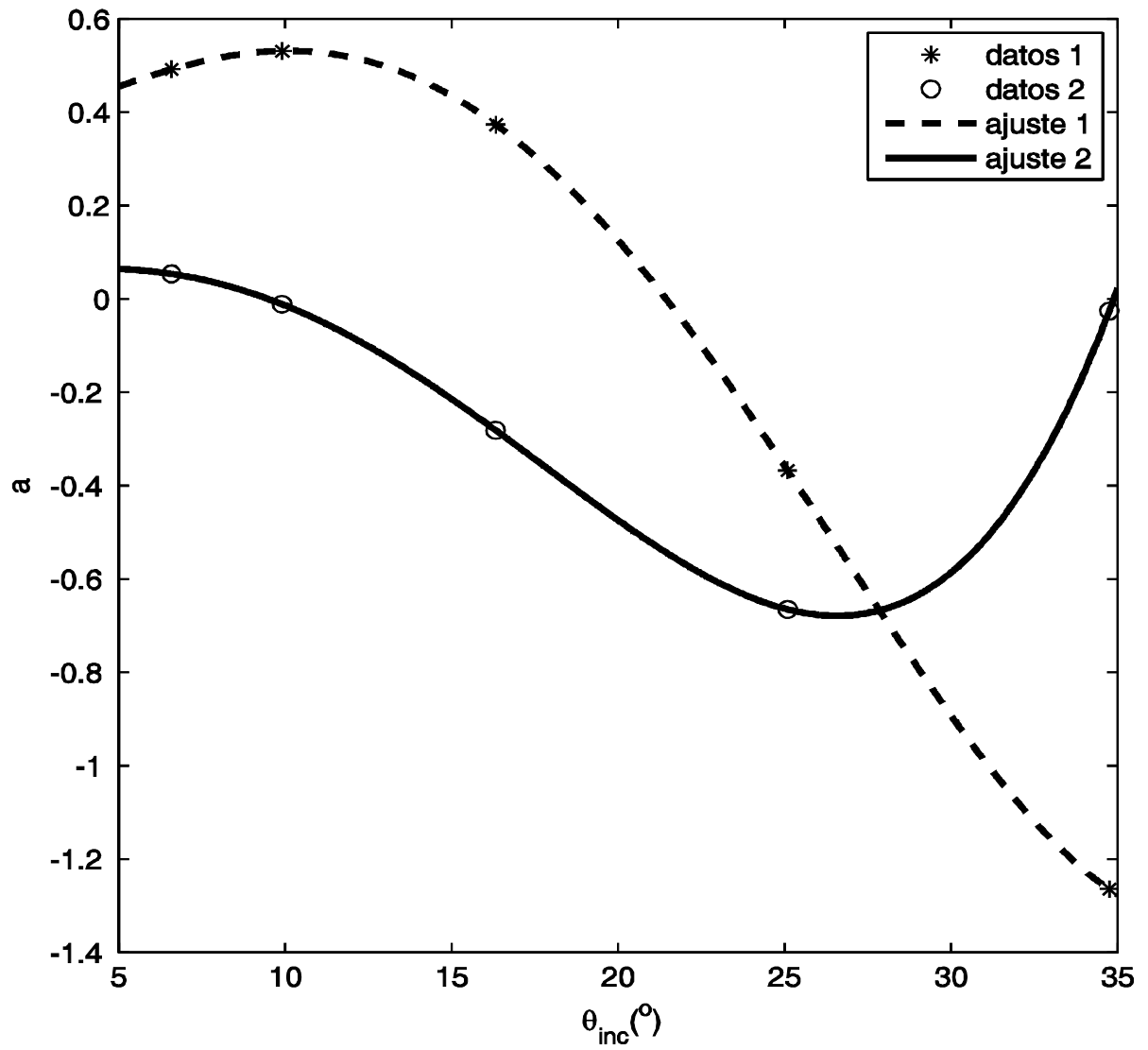


FIG. 9B

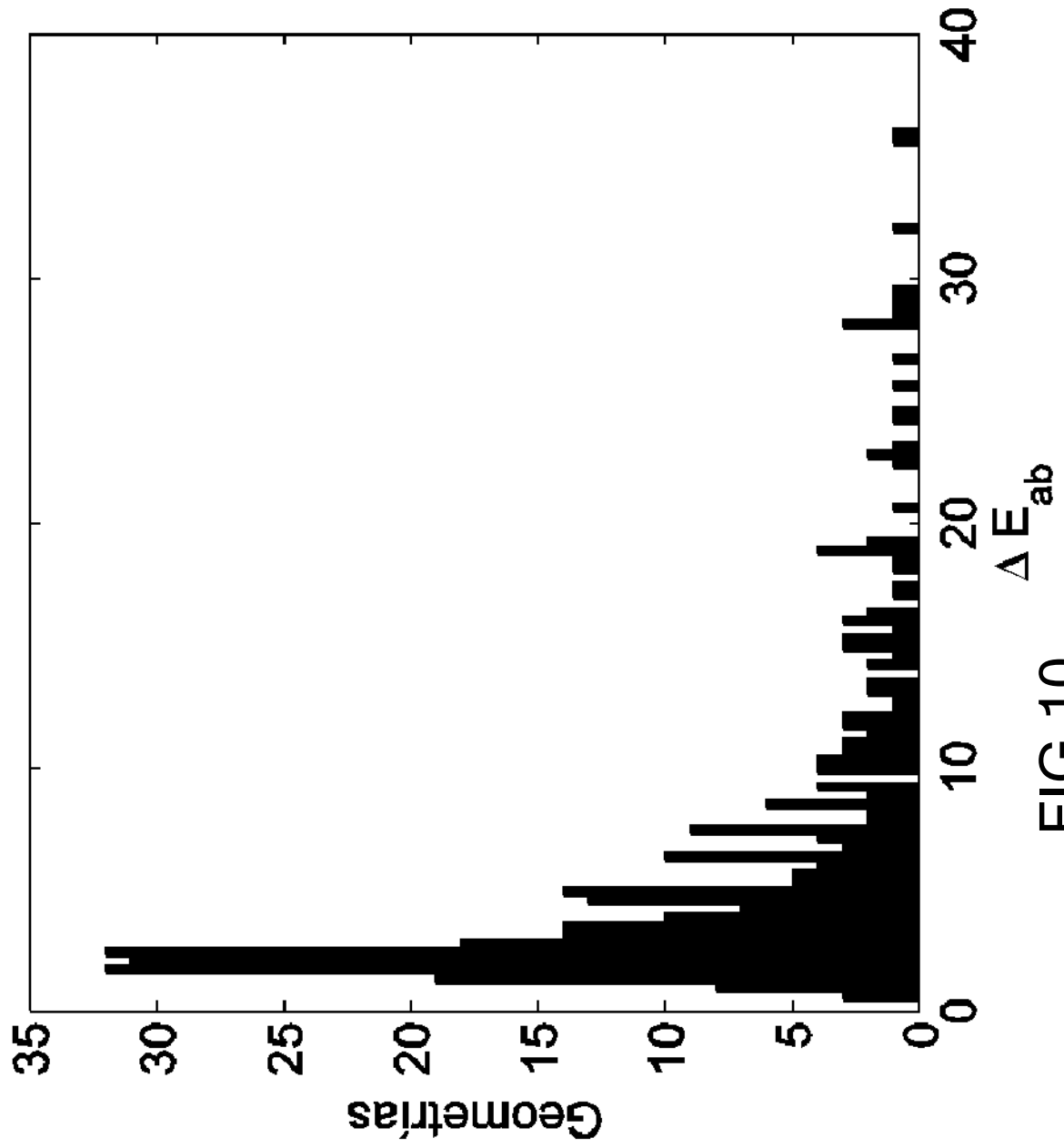


FIG.10

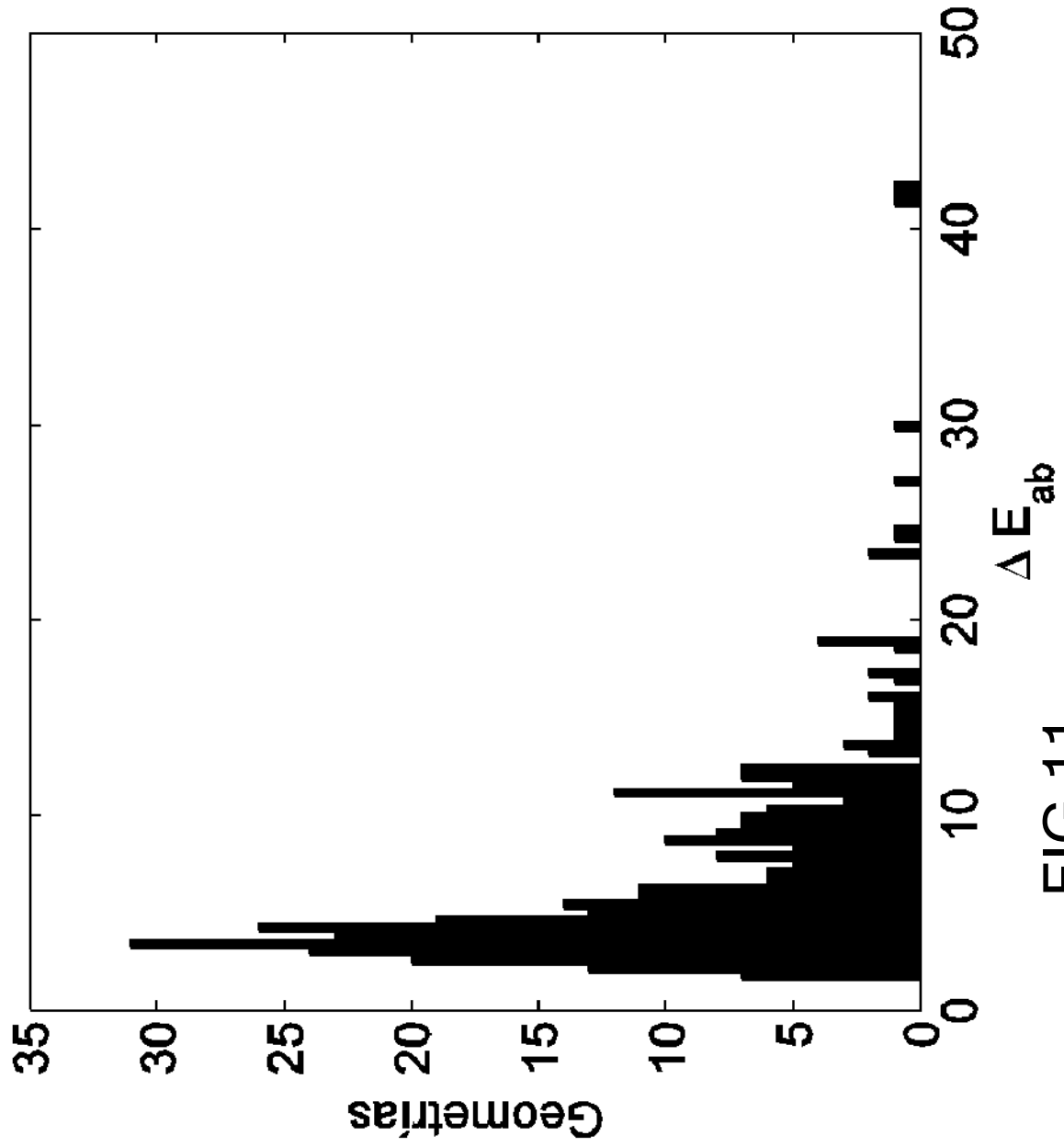


FIG.11

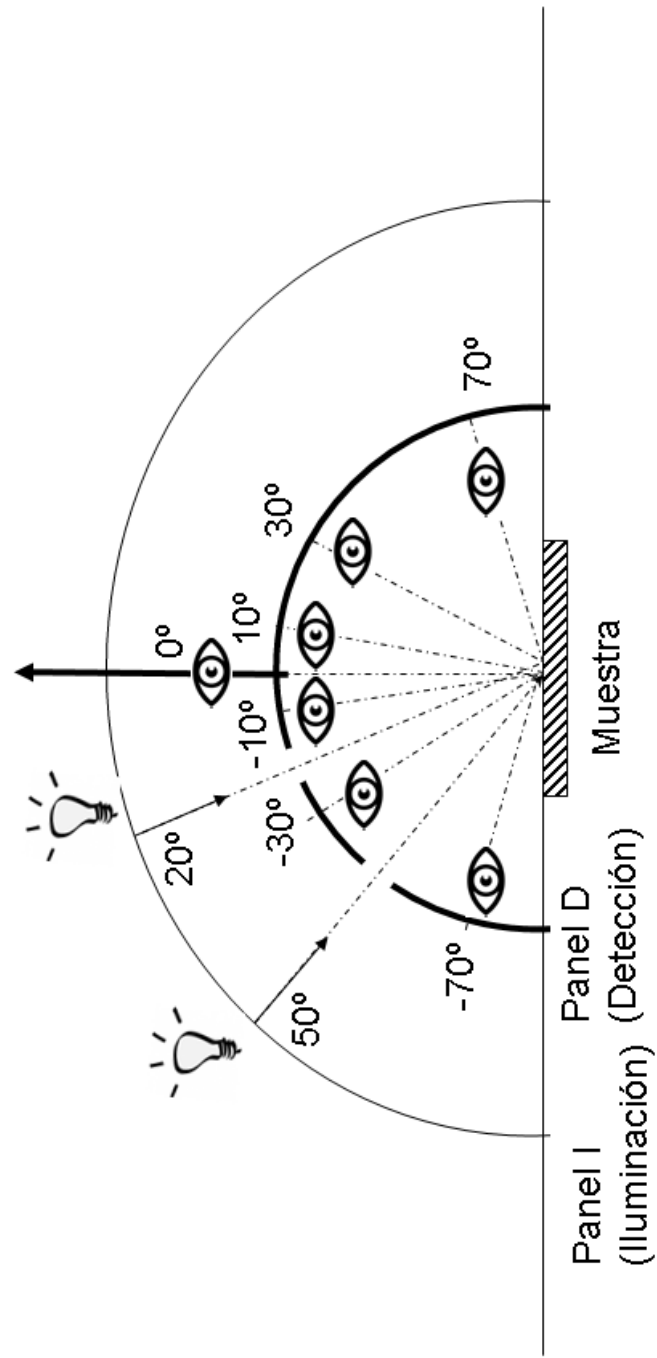


FIG.12