

# Clasificación de cielos estándar ISO 15469 CIE S 011/2003 usando datos de distribución de luminancia obtenidos a través de imágenes HDR

## *ISO 15469 CIE S 011/2003 standard sky classification using luminance distribution data obtained through HDR images*

Fernando Ramirez-Cabrera<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

\* Autor para correspondencia: fernando.ramirez@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 10/01/2023    Fecha de aceptación del manuscrito: 08/02/2023    Fecha de publicación: 30/06/2023

**Resumen**—El aprovechamiento de la energía solar es clave para el desarrollo de fuentes de energía renovable, lo que hace necesario estimar la cantidad de energía que se recibe del sol. Para ello, se han propuesto varios métodos para predecir la energía solar, lo que requiere la estandarización de los diferentes tipos de cielos en el mundo. El estándar ISO 15469 CIE 011/2003 se ha utilizado para este fin. En este estudio, se compararon dos métodos de clasificación de cielos CIE: la comparación de las funciones de gradación e indicatriz teóricas y los grupos homónimos observados, y la comparación del error medio cuadrático (RMSE) entre las distribuciones de luminancia de la bóveda celeste y las luminancias teóricas definidas por el estándar CIE. Los datos de distribución de luminancias utilizados proceden de imágenes de alto rango dinámico (HDR). Los resultados muestran que aproximadamente el 50 % de las imágenes analizadas coinciden en la clasificación. Sin embargo, se observó que un gran porcentaje de las imágenes que no mostraron coincidencias difieren un máximo de dos tipos de clasificación. Estos hallazgos indican que ambos métodos de clasificación son efectivos para estimar la energía solar recibida del cielo y proporcionan una evaluación precisa de la clasificación de cielos CIE

**Palabras clave**—Energía solar, Energía renovable, Clasificación de cielos CIE, ISO 15469 CIE 011/2003, Imágenes de alto rango dinámico (HDR)

**Abstract**—The use of solar energy is key to the development of renewable energy sources, which makes it necessary to estimate the amount of energy received from the sun. To this end, several methods have been proposed to predict solar energy, which requires standardizing the different types of skies around the world. The ISO 15469 CIE 011/2003 standard has been used for this purpose. In this study, two methods of CIE sky classification were compared: the comparison of theoretical gradation and indicator functions and homonymous observed groups, and the comparison of the root mean square error (RMSE) between the luminance distributions of the sky vault and the theoretical luminances defined by the CIE standard. The luminance distribution data used came from high dynamic range (HDR) images. The results show that approximately 50 % of the analyzed images coincide in their classification. However, it was observed that a large percentage of the images that did not show coincidences differed by a maximum of two classification types. These findings indicate that both classification methods are effective in estimating solar energy received from the sky and provide an accurate assessment of CIE sky classification..

**Keywords**—Solar energy, Renewable energy, CIE sky classification, ISO 15469 CIE 011/2003, High dynamic range (HDR) images

## INTRODUCCIÓN

El sol representa para nuestra vida la principal fuente de energía, de él derivan de una manera u otra todas las otras fuentes de energías presentes en la tierra, entre ellas la luz natural que constituye sin duda una fuente de energía renovable. Pero para poder aprovechar esta energía debemos ser capaces de proporcionar al menos un pronóstico aproximado de la cantidad de energía que recibimos y determinar de dónde proviene, por lo tanto, es necesario un modelo matemático que permita estimar la contribución energética de la luz solar, pero para lograrlo se debe tener un conocimien-

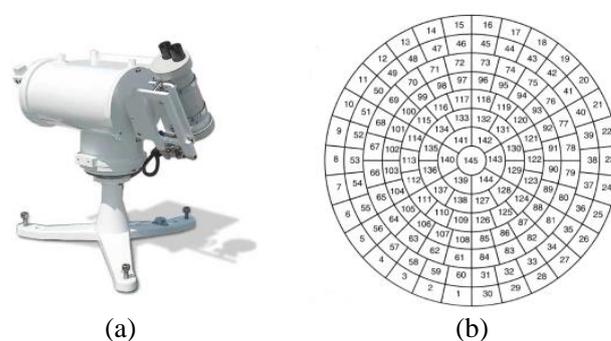
to previo de la distribución angular de las luminancias en el cielo. Existen diversos problemas para modelizar la distribución de luminancia del cielo, por una parte, las innumerables condiciones del cielo posibles y, por otra parte, los diversos modelos propuestos, derivados de investigaciones que van desde los más básicos que simplifican las condiciones de cielo, hasta los más complejos en donde se establecen procedimientos propios que tienen en cuenta un tipo de cielo. Por esta razón fue necesario parametrizar las condiciones de la bóveda celeste mediante una serie de índices que si bien es cierto no siempre coinciden con las complejas condiciones del cielo, facilitan el cálculo de la distribución de luminan-

cias. Dado que es importante conocer el tipo de cielo para la modelización de la distribución de luminancia en la bóveda celeste, la Comisión Internacional de Iluminación CIE (por sus siglas en francés) adoptó una clasificación de 15 tipos de cielos estándar en el intento de organizar todo el espectro probable de cielos del mundo. El estándar ISO 15469 CIE S 011/2003 de la CIE, enumera un conjunto de distribuciones angulares de luminancias relativas que son consecuencia de dos funciones: gradación e indicatriz, que modelan el cielo en un amplio rango de condiciones que van desde los cubiertos, donde solo llega iluminación difusa, hasta cielos claros donde no hay nubes presentes. Las distribuciones de luminancias propuestas por el estándar se caracterizan por ser simétricas respecto al meridiano solar, además se adaptan mejor a cielos homogéneos (cielos totalmente cubiertos), pero el estándar no detalla un procedimiento de clasificación de cielos, por esta razón un número importante de investigaciones se han centrado en el desarrollo de métodos matemáticos para la clasificación de cielos a partir de la distribución angular de la luminancia. Los primeros avances en el modelado de la distribución angular de las luminancias se dieron por parte de Moon y Spencer (1942), quienes sugirieron un modelo de distribución angular de luminancia a partir de sus observaciones de cielos cubiertos, que luego fue adoptado por la CIE. Perraudau y Chauvel (1986) introdujeron 5 tipos de distribución de luminancia de cielo mediante el uso de índices de nubosidad. Perez *et al.* (1990) desarrollaron un modelo en donde la luminancia de un punto del cielo es producto de la luminancia cenital y un factor geométrico, asimismo, Perez *et al.* (1993) propuso un modelo para describir los patrones de distribución angular de la luminancia para todos los tipos de cielo (All weather model). Igawa *et al.* (1999) plantearon un conjunto de 20 distribuciones de cielo en función de la luminancia global, determinando para cada uno de ellos las funciones de gradación e indicatrices respectivas, mas adelante, Igawa (2004) propuso un modelo para el cálculo de la distribución de luminancia para todas las condiciones del cielo por medio de índices de cielo, según este modelo, las condiciones de cielo se clasifican según estos índices. Sin embargo, Kittler (1994), Kittler y Darula Diplng (1997) presentaron un modelo estándar de distribución de luminancia de cielo, estableciendo la relación entre la luminancia cenital y la luminancia difusa, además introdujeron las nociones de función de gradación relativa y función indicatriz relativa, estos elementos apropiadamente combinados resultaron en los 15 tipos de cielos estándar que fueron adoptados por la CIE. Este trabajo ha considerado inicialmente tres procedimientos de clasificación de tipos de cielo CIE que se detallan a continuación:

1. Clasificación del tipo de cielo por comparación de los grupos de gradación e indicatriz teóricos y los grupos homónimos observados.
2. Clasificación del tipo de cielo por comparación del error medio cuadrático RMSE entre las medidas de luminancia experimentales y las luminancias teóricas calculadas de acuerdo con el estándar CIE, método propuesto por Tregenza (1999)
3. Clasificación del tipo de cielo mediante el análisis de la relación entre la luminancia del cenit y la iluminan-

cia difusa en un plano horizontal, según la propuesta de Kittler y Darula Diplng (1997).

El último procedimiento resulta útil solo para determinados ángulos de cenit solar ( $Z_s$ ), para el resto de los ángulos, proporciona resultados ambiguos, por lo tanto, para este trabajo se descarta. Como todos los procedimientos matemáticos, los modelos para el cálculo de la distribución de la luminancia requieren de datos para su verificación, por esta razón se han desarrollado diversos tipos de tecnologías para la medición de las luminancias. Los equipos actuales usados para medir la luminancia pueden clasificarse en dos grupos: instrumentos con sensores móviles e instrumentos con sensores estáticos. Dentro de los primeros se tiene el sky scanner (Figura 1a), el cual realiza mediciones de luminancia de 145 sectores del cielo en periodos determinados de tiempo, a distintas alturas y distintas orientaciones hasta cubrir toda la bóveda celeste (Figura 1b).



**Fig. 1:** (a) Sky scanner; (b) División del cielo en 145 sectores.

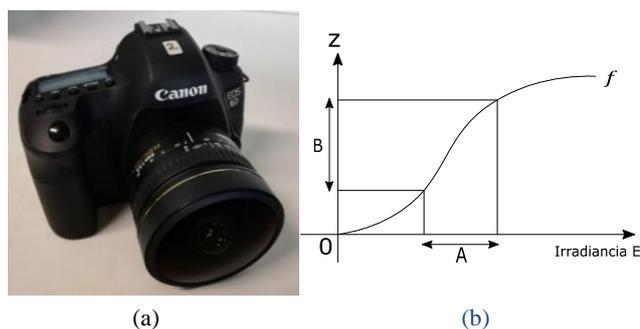
Sin embargo, el sky scanner presenta ciertas desventajas, este equipo está diseñado con la intención de obtener la luminancia media de un número limitado de sectores del cielo, por lo que no tiene suficiente resolución para representar adecuadamente las luminancias del cielo, otra desventaja es el tiempo de escaneo de los 145 sectores de la bóveda celeste, aproximadamente 4 minutos (Figura 1b). Con el propósito de sortear las limitaciones que presenta el sky scanner se han presentado estudios que relacionan la distribución de las luminancias del cielo con imágenes provenientes de cámaras fotográficas. Uno de los primeros trabajos presentado en el siglo pasado (McArthur y Hay, 1981) consistía en correlacionar fotografías del cielo con medidas de radiancia solar difusa, dada la tecnología analógica de la época las imágenes tenían que ser previamente digitalizadas para obtener dicha relación. Sin embargo, en la actualidad no se tiene estos inconvenientes, las cámaras actuales ya proporcionan una imagen digital que facilita el uso de técnicas que permiten mejorar la calidad de la imagen y consecuentemente de la información que en ellas se encuentra. La técnica que más se usa con la finalidad de obtener información del cielo es la generación de imágenes de alto rango dinámico o imágenes HDR por sus siglas en inglés (High Dynamic Range). La generación de imágenes de alto rango dinámico es una técnica fotográfica que permite capturar el detalle en las luces y en las sombras dentro de una misma escena. Se logra combinando varias fotografías con diferentes tiempos de exposición, es decir, fotografías de bajo rango dinámico LDR (Neve *et al.*, 2009). La ventaja de esta técnica es que posibilita que

todas las zonas de la escena queden perfectamente expuestas, aunque tengan un gran contraste entre luces y sombras, de esta manera se consigue más precisión en los valores de luminancia. Considerando estos antecedentes, el objetivo de este trabajo es evaluar cómo se comportan los dos primeros procedimientos de clasificación de cielos descritos anteriormente cuando se utilizan imágenes de alto rango dinámico de la bóveda celeste.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Cámara fotográfica digital

La cámara digital usada en este trabajo es la Canon EOS 6D con sensor de formato completo full frame, tecnología CMOS y resolución de 20 megapíxeles, (Figura 2a). Los sensores CMOS son más sensibles a la luz por lo que responden mejor en condiciones pobres de iluminación que otros tipos de sensores presentes en el mercado con tecnología CCD. El sensor está compuesto por una matriz de píxeles que se cargan de manera proporcional a la cantidad de luz que deja pasar el obturador hacia el sensor, de esta manera el sensor obtiene valores de irradiancias que mediante un algoritmo matemático lleva a cabo una conversión analógica digital obteniendo la función de respuesta  $f$  de la cámara (Figura 2b), esta función es única para cada cámara.



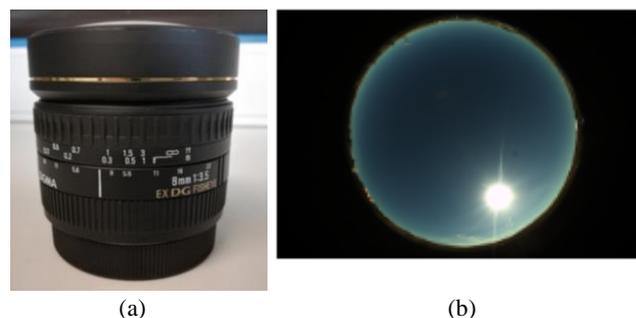
**Fig. 2:** (a) Cámara fotográfica EOS 6D; (b) Curva de respuesta hipotética de una cámara.

La Figura 2b muestra la curva de respuesta hipotética de una cámara que se puede traducir como la respuesta del sensor a la irradiancia  $E$  frente al valor digital de los píxeles de la imagen  $Z$ , se observa que la respuesta varía con la irradiancia; solo un intervalo de valores de irradiancia, denotado por  $A$  tiene una resolución lo suficientemente buena como para ser utilizado en la generación de la imagen mediante píxeles  $B$ , dado que para valores de irradiancia inferiores la imagen presenta mucho ruido y para superiores se satura.

### Objetivo ojo de pez

Dado que se pretende fotografiar la totalidad de la bóveda celeste se debe emplear un objetivo gran angular que abarque al menos  $180^\circ$ . Con este fin, en este trabajo se ha empleado el objetivo ojo de pez Sigma de 8mm, modelo F3.5 EX (Figura 3a).

Los objetivos ojos de pez tienen la capacidad de alcanzar ángulos de visión extremos permitiendo capturar fotografías con  $180^\circ$  de campo escénico, además presentan una distorsión inherente que se asemeja a una imagen reflejada en una esfera, ya que no es posible formar una imagen de un campo



**Fig. 3:** (a) Objetivo ojo de pez; (b) imagen del cielo característica capturada con el objetivo ojo de pez.

hemisférico en un plano sin distorsión (Figura 3b), por eso es necesario realizar una proyección sobre un plano, precisamente esta proyección es lo que caracteriza la lente, es decir la manera en que se obtiene una realidad tridimensional (espacio) y la imagen bidimensional (foto). El tipo de proyección más común en estos objetivos es la equisólida lo que significa que la relación entre el área del espacio y el área resultante en la imagen es constante (Miyamoto, 1964)

### Imágenes de alto rango dinámico HDR

Las imágenes de alto rango dinámico usadas para este trabajo fueron tomadas en la finca de prácticas de la Universidad Pública de Navarra, ( $42^\circ 47'$  N;  $1^\circ 37'$  O) durante los meses de julio a octubre del 2018, en este periodo se capturaron 1885 imágenes que fueron analizadas por los dos métodos de clasificación de cielos evaluados.

### Metodología

Siendo el objetivo de este trabajo evaluar el comportamiento de dos procedimientos de clasificación de tipos de cielos cuando se utilizan imágenes de alto rango dinámico, el primer paso es establecer las condiciones para la generación de imágenes HDR. El manejo de la información proporcionada por la cámara es importante, ya que de esta depende el análisis de la distribución de la luminancia, por lo tanto, se ha dividido la metodología en tres partes:

1. Calibración geométrica de la cámara.
2. Generación de imágenes HDR de la bóveda celeste.
3. Procedimientos de clasificación de cielos.

Cabe añadir que las imágenes HDR no están calibradas fotométricamente, es decir, no son las luminancias reales. Los procedimientos de clasificación de cielos empleados en este trabajo usan valores de luminancias relativas a un punto determinado, por lo tanto, este hecho no tiene importancia.

### Calibración geométrica de la cámara.

La calibración geométrica de la cámara es fundamental en el análisis de información espacial pues permite la localización y comparación de los datos teóricos y los observados. En este trabajo la información es recogida íntegramente a partir de los píxeles de la imagen que contienen información de la distribución de la luminancia difusa y de la posición espacial

del punto del espacio que se representa en el píxel correspondiente. Dado que el objetivo ojo de pez que se utiliza en este trabajo lleva a cabo una proyección equisólida, su función de proyección se recoge en la ecuación 1.

$$R = 2f \sin(\theta/2) \tag{1}$$

Donde  $\theta$  es el ángulo entre un punto en el mundo real y el eje óptico, que va desde el centro de la imagen hasta el centro del objetivo ojo de pez,  $f$  es la distancia focal de la lente y  $R$  es la posición radial de un punto en la imagen. Se puede observar que la función de proyección relaciona el ángulo  $\theta$  y la distancia radial  $R$  de un elemento espacial. Al analizar la función de proyección, 90 grados es el ángulo  $\theta$  máximo del objetivo con un campo de visión de 180 grados, y tomando una distancia focal  $f$  de 1 la proyección equisólida máxima que se obtiene es  $R = \sqrt{2}$  que es la distancia radial máxima del círculo de la imagen capturada (Figura4).

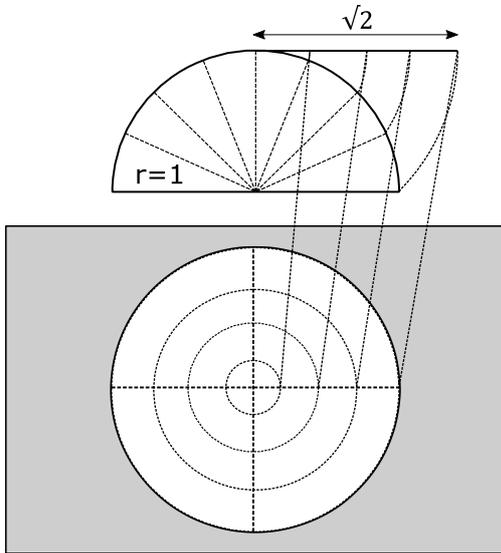


Fig. 4: Proyección equisólida del objetivo.

En la práctica, es inevitable que existan variaciones de la función de proyección ideal debido a las limitaciones en la fabricación, por esta razón se consideró apropiado verificar la proyección de la lente. Haciendo uso de instrumentos de precisión del laboratorio de óptica del departamento de Física de la Universidad Pública de Navarra se determinó la función de proyección que más se ajusta al objetivo. El proceso consiste en capturar una fotografía de una fuente de luz (LED) previamente alineada al objetivo con el propósito de determinar las coordenadas de los píxeles que corresponden al centro de la imagen, luego hacer girar la cámara en su propio eje una serie de ángulos y registrar una imagen en cada uno de ellos, de esta manera se encuentra la posición de los píxeles respecto a ese ángulo en particular, el proceso se repite hasta cubrir los 90 grados de visión requeridos.

El resultado obtenido es la función de proyección de la lente ajustada que responde a la ecuación 2

$$R = 1,88852 \sin(0,538784 \theta) \tag{2}$$

Una vez encontrada la función de proyección, el siguiente paso es asignar la ubicación de los píxeles de la imagen mediante un sistema de coordenadas espaciales que determine

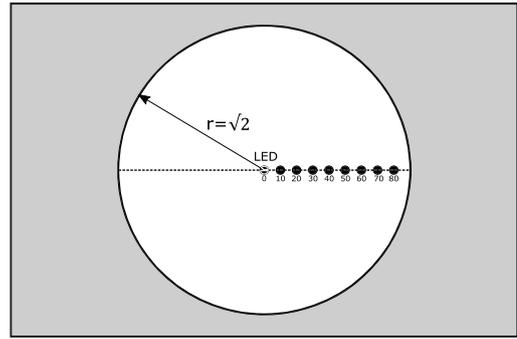


Fig. 5: Proceso de calibración de cámara.

su posición a través de dos coordenadas: acimut que es el ángulo formado por un elemento del cielo y el sur en la superficie de una esfera; y cenit  $Z$  que representa la posición de un elemento del cielo, relativa a la normal del plano. Para encontrar el ángulo del cenit  $Z$  se requiere la distancia radial  $R$  del centroide de cada píxel de la imagen, por lo que se estableció la posición de los píxeles relativa al centro de la imagen mediante matrices de coordenadas  $(x, y)$  y con ayuda de la relación pitagórica (ecuación 3) se obtiene la distancia radial  $R$ .

$$R = \sqrt{(matriz_x)^2 + (matriz_y)^2} \tag{3}$$

El ángulo de cenit  $Z$  de los puntos en el espacio que representan la posición del píxel correspondiente se encuentra con la función de proyección del objetivo previamente encontrada (ecuación 2), donde  $Z = \theta$  y  $R$  es la distancia radial ya calculada, obteniendo así la ecuación 4.

$$Z = \frac{\arcsin\left(\frac{R}{1,88852}\right)}{0,538784} \tag{4}$$

El resultado es una matriz que contiene la distribución cenital de cada punto del espacio que se representa en el píxel correspondiente; se puede observar la representación gráfica de la matriz en la Figura 6.

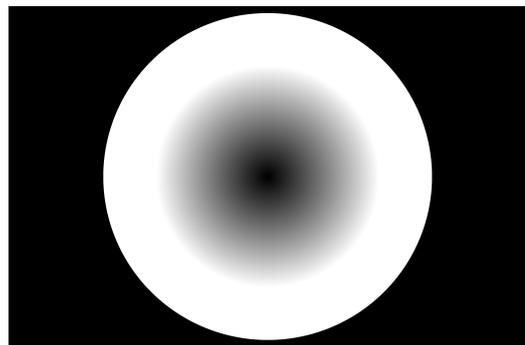


Fig. 6: Representación de la matriz de ángulos de cenit:  $1^\circ:0.01775$ .

El ángulo de acimut de cada píxel se calcula mediante la relación tangencial de sus coordenadas rectangulares usando la ecuación 5.

$$\tan(\gamma) = \frac{\text{coordenadas}_y}{\text{coordenadas}_x} \tag{5}$$

Siendo que la distribución de la luminancia depende de la posición del sol, también es importante conocer su ubica-

ción exacta, para este trabajo se recurrió al algoritmo de posicionamiento del sol (PSA) desarrollado por B.Muriel *et al.* (2001). Este algoritmo requiere como datos de entrada el año, mes, día, hora UTC, latitud y longitud del lugar, el resultado es la posición del sol en coordenadas locales, es decir, acimut solar  $\gamma_s$  y cenit solar  $Z_s$ .

### Generación de imágenes HDR de la bóveda celeste.

El proceso para la captura de las imágenes HDR consiste en colocar sobre una estructura fija la cámara y el objetivo dirigidos hacia la bóveda celeste a  $90^\circ$  del plano de la estructura, con orientación norte sur (Figura 7).



Fig. 7: Montaje de la cámara en la estructura.

### Procedimientos de clasificación de cielos.

Los procedimientos de clasificación de cielos elegidos en este trabajo tienen como base lo establecido en la norma ISO 15469 CIE S 011/2003, por lo tanto, es necesario establecer los principales puntos de referencia de la bóveda celeste (ver Figura 8).

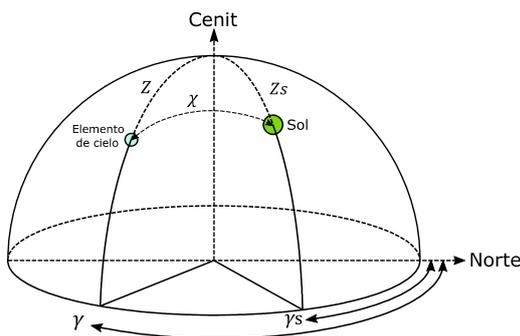


Fig. 8: Puntos de referencia de la bóveda celeste.

Dado que la luminancia de un punto cualquiera en la bóveda celeste varía con la distancia al sol, es preciso determinar la distancia angular entre el sol y cada uno de los elementos del cielo por medio de la ecuación 6.

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos |\gamma - \gamma_s|) \quad (6)$$

Donde  $\chi$  es la distancia angular entre el sol y un elemento arbitrario del cielo,  $Z$  es el ángulo de cenit del elemento del cielo,  $Z_s$  es el ángulo de cenit del sol,  $\gamma$  es el ángulo de acimut del elemento del cielo y  $\gamma_s$  es el ángulo de acimut del sol.

### Clasificación del tipo de cielo por comparación entre los grupos de gradación e indicatriz teóricos frente a los grupos homónimos observados.

El estándar CIE define a la luminancia relativa de un punto con respecto a la luminancia cenital mediante el producto de las funciones de gradación e indicatriz, por lo tanto, el primer paso para el desarrollo de este procedimiento es el cálculo de dichas funciones teóricas siguiendo el proceso descrito a continuación:

1. Determinación de las coordenadas solares a través del algoritmo PSA mediante la información proporcionada por la imagen.
2. Cálculo de las distancias angulares al sol  $\chi$  mediante la ecuación 6.
3. Cálculo de la función de gradación  $\varphi(Z)$  teórica. Esta función representa el aumento o la disminución de la luminancia del cielo desde el cenit hacia el horizonte y responde a la ecuación 7. Los coeficientes  $a$  y  $b$  definen seis grupos de la función de gradación estándar. Los valores de los coeficientes de los seis grupos y las curvas características se pueden observar en la Figura 9a.

$$\varphi(Z) = 1 + a \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad (7)$$

4. Cálculo del valor de la función de gradación del cenit  $\varphi(0)$  mediante la ecuación 8.

$$\varphi(0) = 1 + a \exp(b) \quad (8)$$

5. Cálculo de la función de gradación relativa, entre la función de gradación  $\varphi(Z)$  del elemento del cielo y la función de gradación cenital  $\varphi(0)$ , como se observa en la ecuación 9.

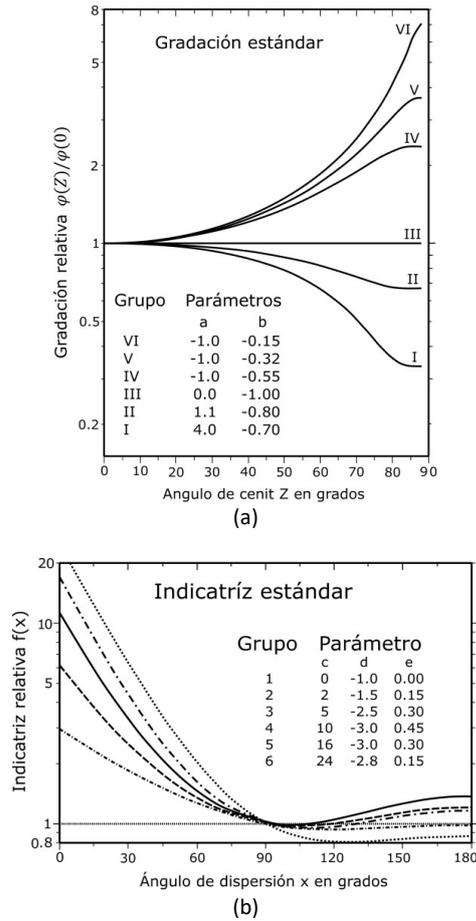
$$\frac{\varphi(Z)}{\varphi(0)} = \frac{1 + a \exp(b/\cos Z)}{1 + a \exp(b)} \quad (9)$$

6. Cálculo de la función indicatriz  $f(\chi)$ . Esta función expresa la relación entre la luminancia de un punto del cielo situado a una distancia angular del sol  $\chi$  y la de otro punto situado a la distancia angular de  $90^\circ$ . La indicatriz está ligada a la dispersión de la radiación solar a su paso por la atmósfera, y se calcula mediante la ecuación 10.

$$f(\chi) = 1 + c \left[ \exp(d \cdot \chi) - \exp\left(\frac{d \cdot \pi}{2}\right) \right] + e \cos^2(\chi) \quad (10)$$

Los coeficientes  $c$ ,  $d$  y  $e$  definen los seis grupos de la función indicatriz estándar; los valores de los coeficientes de los seis grupos y las curvas características pueden observarse en la Figura 9b.

Puesto que el estándar ISO 15469 CIE S 011/2003 describe la luminancia de un punto de la bóveda celeste relativa al cenit, es preciso determinar la función indicatriz en el cenit  $f(Z_s)$  por medio de la ecuación 11, de esta manera el valor de la luminancia de un punto de la bóveda celeste  $L_v(z, \gamma)$  queda definida por medio de la ecuación 12.



**Fig. 9:** (a) Representación gráfica de los seis grupos de funciones de gradación relativa estándar y los valores de los coeficientes a y b correspondientes; (b) Representación gráfica de los seis grupos de funciones indicatriz estándar y los valores de los coeficientes c, d y e correspondientes.

$$f(Z_s) = 1 + c \left[ \exp(d Z_s) - \exp\left(\frac{d\pi}{2}\right) \right] + e \cos^2(Z_s) \quad (11)$$

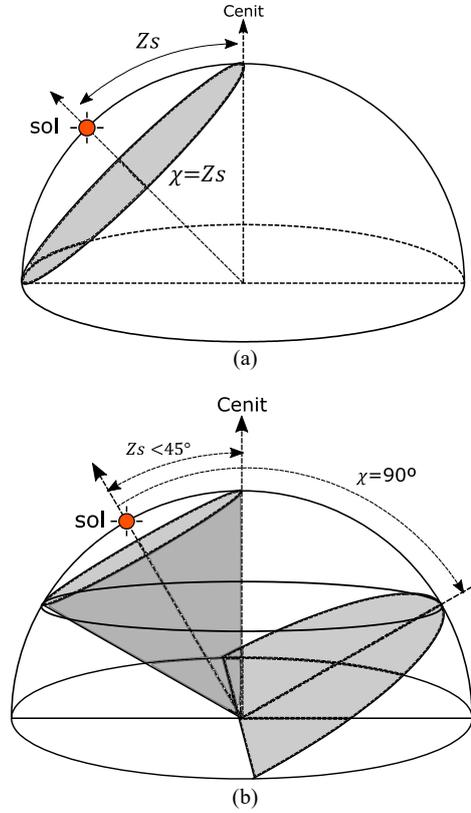
$$L_v(z, \gamma) = \frac{L}{L_Z} = \frac{f(\chi) \varphi(Z)}{f(Z_s) \varphi(0^\circ)} \quad (12)$$

Donde  $L_v$  es la luminancia en un elemento arbitrario del cielo ( $Kcdm^{-2}$ ),  $L_Z$  es la luminancia del cielo en el cenit ( $Kcdm^{-2}$ ).

La determinación del tipo de cielo CIE se hace por combinación de los grupos de gradación e indicatriz. Al combinar los 6 grupos de gradación con los 6 grupos indicatriz se podría obtener hasta 36 tipos de cielos diferentes, no obstante, la CIE solo considera los 15 tipos de cielos estándar mostrados en la Tabla 1.

El siguiente paso es la extracción de las funciones de gradación e indicatriz experimentales de los píxeles de la imagen HDR, el propósito es determinar a qué grupo pertenecen dichas funciones y así clasificar el tipo de cielo, para lo cual se tomaron las siguientes consideraciones. Para el cálculo de la función de gradación los datos de interés son las luminancias relativas al cenit de los puntos en que la distancia al sol  $\chi$  se mantenga constante, ya que en ellos la función indicatriz se mantendrá igualmente constante y la variación que se

pueda apreciar entre las luminancias solo será achacable a la gradación. Para una distancia al sol  $\chi$  dada, dichos puntos se encuentran en la circunferencia que resulta de la intersección entre la bóveda celeste y el cono que tiene por vértice el centro de dicha bóveda, por eje la dirección del vector del sol y por ángulo  $\chi$ , como se observa en las Figuras 10 a y b.



**Fig. 10:** Consideraciones para el cálculo de la función de gradación: (a) cuando  $Z_s=45^\circ$ ; (b) cuando  $Z_s<45^\circ$ .

Si como distancia angular se elige aquella que cumple  $\chi = Z_s$  (10a), la ecuación 12 quedaría reducida a la 13 y, por tanto las luminancias relativas al cenit observadas proporcionarán los valores de la función de gradación relativa.

$$\frac{L(Z, \gamma)_{\chi=Z_s}}{L_Z} = \frac{f(Z_s) g(Z)}{f(Z_s) g(0)} = \frac{g(Z)}{g(0)} \quad (13)$$

En la Figura 10a se observa que si  $Z_s > 45^\circ$  al hacer  $\chi = Z_s$  puede tenerse información de la evolución total de la gradación (desde  $Z = 0$  a  $Z = 90$ ). Por el contrario, si  $Z_s \leq 45$  (ver Figura 10b) se perderá información de los almicántaras más bajos y a la hora de comparar la gradación con los estándares el ajuste será menos preciso, por esta razón, para este trabajo se han tomado los siguientes criterios:

1. Si  $Z_s \geq 45$  se consideraran los valores experimentales correspondientes a la distancia al sol  $\chi = Z_s$ .
2. Si  $Z_s < 45$  se consideraran los valores experimentales correspondientes a dos  $\chi$  distintas. La primera igual a  $Z_s$  y la segunda igual a  $90^\circ$ , y como se observa en la Figura 10b, en ese caso, para  $\chi = 90$  la ecuación 12 se transforma en la ecuación 14, por lo que, a diferencia de los que ocurre cuando  $\chi = Z_s$  las luminancias relativas al cenit no proporcionan directamente los valores de la función de gradación relativa, ver ecuación 14.

**Tabla 1:** Descripción de los 15 cielos estándar; Fuente: 2003-Spatial Distribution of Daylight CIE Standard General Sky.

Tipos	Grupo de gradación	Grupo Indicatriz	Gradación		Indicatriz			Descripción de la distribución de luminancia
			a	b	c	d	e	
1	I	1	4,0	-0,7	0	-1	0	Cielo cubierto estándar del CIE, con gradación pronunciada de la luminancia hacia el cenit, uniformidad azimutal.
2	I	2	4,0	-0,7	2	-1,5	0,15	Cielo cubierto con gradación pronunciada y un ligero brillo hacia el sol.
3	II	1	1,1	-0,8	0	-1,0	0	Cielo cubierto graduado moderadamente con uniformidad azimutal.
4	II	2	1,1	-0,8	2	-1,5	0,15	Cielo cubierto graduado moderadamente y un ligero brillo hacia el sol.
5	III	1	0	-1,0	0	-1,0	0	Cielo con luminancia uniforme.
6	III	2	0	-1,0	2	-1,5	0,15	Cielo parcialmente nublado, sin gradación hacia el cenit, ligero brillo hacia el sol.
7	III	3	0	-1,0	5	-2,5	0,30	Cielo parcialmente nublado, sin gradación hacia el cenit, brillante en la región circunsolar.
8	III	4	0	-1,0	10	-3,0	0,45	Cielo parcialmente nublado, sin gradación hacia el cenit, corona solar clara.
9	IV	2	-1,0	-0,55	2	-1,5	0,15	Cielo parcialmente nublado con el sol obscurecido.
10	IV	3	-1,0	-0,55	5	-2,5	0,30	Parcialmente nublado con la zona circunsolar más brillante.
11	IV	4	-1,0	-0,55	10	-3,0	0,45	Cielo azul blanco con corona solar clara.
12	V	4	-1,0	-0,32	10	-3,0	0,45	Cielo despejado, baja turbidez en la luminancia.
13	V	5	-1,0	-0,32	16	-3,0	0,30	Cielo despejado, atmósfera contaminada.
14	VI	5	-1,0	-0,15	16	-3,0	0,30	Cielo turbio sin nubes con corona solar amplia.
15	VI	6	-1,0	-0,15	24	-2,8	0,15	Cielo azul blanco turbio, con corona solar amplia.

$$\frac{L(Z, \gamma)_{\chi=90}}{L_z} = \frac{f(90)g(Z)}{f(Zs)g(0)} = \frac{g(Z)}{f(Zs)g(0)} \quad (14)$$

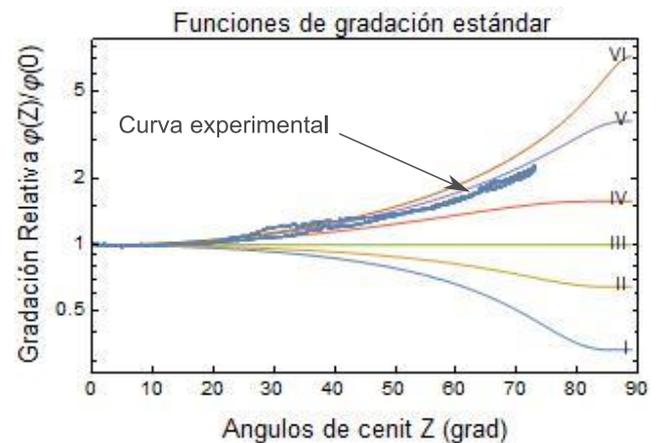
$$f(Zs) = \frac{L(Z, \gamma)_{\chi=Zs}}{L(Z, \gamma)_{\chi=90}} \quad (15)$$

Para obtener  $f(Zs)$  basta con dividir los valores de luminancias relativas al cenit para un mismo  $Z$  como en las dos circunferencias de la Figura 10b. Los sucesivos valores de la función de gradación experimental serán los correspondientes a  $\chi = Zs$  más los correspondientes a  $\chi = 90$  multiplicados, estos últimos, por  $f(Zs)$ .

Una vez establecidas las consideraciones para la determinación de la función de gradación de las imágenes HDR, a continuación, se detalla el procedimiento para el cálculo de las luminancias relativas al cenit de la imagen HDR:

1. Extracción de las luminancias del cenit  $L_z$  de la imagen HDR considerando un grado de apertura.
2. Extracción de los valores de luminancias  $L$  de la imagen HDR cuya distancia al sol es igual al ángulo de cenit solar  $Zs$ , es decir  $\chi = Zs$ .
3. Cálculo de las luminancias relativas al cenit  $L_v(z, \gamma)$  mediante la ecuación 12.
4. Extracción de los ángulos de cenit de los píxeles cuya distancia al sol es  $\chi = Zs$ . El resultado es la función de gradación relativa de las luminancias de la imagen HDR; la representación de las funciones de gradación relativa teórica frente a sus homónimas de la imagen

HDR, permite observar de manera gráfica a que grupo de gradación teórica se asemeja la función de gradación experimental, se puede observar un ejemplo en la Figura 11.



**Fig. 11:** Función de gradación relativa experimental para el cielo correspondiente a las 10:12 del 06 de agosto de 2018 en Pamplona, Navarra

Para el cálculo de la función indicatriz de la imagen HDR también se realizaron consideraciones que se detallan a continuación. Si se analizan las luminancias registradas por la cámara y se extraen las pertenecientes a un determinado almicantrat, el cociente entre las luminancias observadas en los distintos puntos de dicho almicantrat (con distintas  $\chi$ ) y la del punto en donde  $\chi = 90$ , proporcionará los distintos puntos  $f(\chi_i)$  de la función indicatriz observada de acuerdo con la ecuación 16.

$$\frac{\frac{L(Z,\chi)}{L_z}}{\frac{L(Z,\chi=90)}{L_z}} = \frac{\frac{f(\chi_i)\varphi(Z)}{f(Z_s)\varphi(0^\circ)}}{\frac{f(90)\varphi(Z)}{f(Z_s)\varphi(0^\circ)}} = \frac{f(\chi_i)}{f(90)} = f(\chi_i) \quad (16)$$

Para que, en un momento dado, en un determinado almicantarat (de ángulo de cenit  $Z$ ) exista un punto  $\chi = 90$ , es necesario que se verifique la desigualdad de la ecuación 17.

$$\left| \frac{1}{\tan(Z)\tan(Z_s)} \right| \leq 1 \quad (17)$$

En la Figura 13a pueden apreciarse los puntos A y B en los que  $\chi = 90$ , pertenecientes al almicantarat 1, ecuación 18., en el almicantarat 2 no existe ningún punto en que  $\chi = 90$ .

$$(\gamma - \gamma_s) = \pm \text{Cos}^{-1} \left( \frac{-1}{\tan(z) \cdot \tan(Z_s)} \right) \quad (18)$$

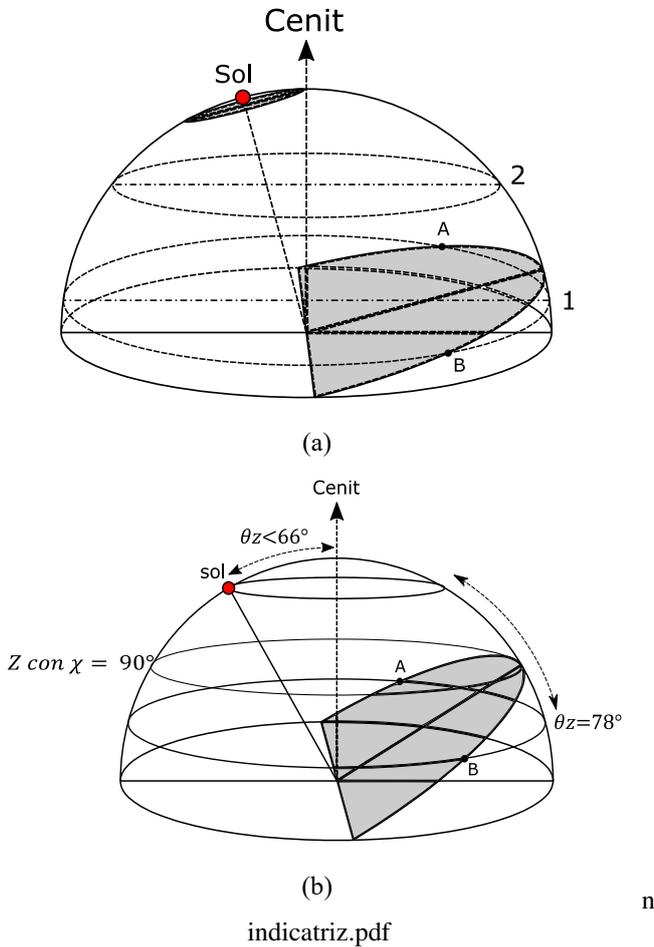


Figura 12: (a) Puntos en los que se encuentra  $\chi = 90$  sobre almicantarat 1; (b) Consideraciones para el cálculo de la función indicatriz cuando  $Z_s < 66^\circ$

Si de todos los posibles almicantarates se elige el correspondiente al del sol en el momento dado, de acuerdo con la ecuación 17, solo si  $Z_s$  es mayor a  $45^\circ$  habrá puntos con  $\chi = 90$ . Además, si se elige otro almicantarat para identificar la función indicatriz, hay que tener en cuenta que a medida que su ángulo de cenit  $Z$  se aleja de  $Z_s$ , las distancias mínimas al sol van aumentando, lo que hace que se pierda información de cómo es la función indicatriz para valores pequeños de  $\chi$ . Con el fin de que la indicatriz observada se

extienda a un rango amplio de valores de  $\chi$ , lo que asegurará una mejor identificación del grupo indicatriz, en este trabajo se han adoptado los siguientes criterios:

1. Si  $Z_s \geq 66^\circ$  se utilizarán las medidas del almicantarat solar con  $Z = Z_s$ .
2. Si  $Z_s < 66^\circ$  se utilizarán las medidas de dos almicantaratas. El primero es el más próximo al solar  $Z$  con distancia solar a  $90^\circ$ ; el segundo es el de  $Z = 78^\circ$ .

Habiendo establecido las consideraciones para la extracción de la función indicatriz de las imágenes HDR, a continuación, se describe el procedimiento de extracción de dicha función:

1. Selección de los píxeles de la imagen HDR cuya distancia al sol  $\chi$  sea igual a 90 grados.
2. Extracción de la función indicatriz  $f(\chi)$  del almicantarat solar de la imagen HDR que dependerá de la posición del sol, haciendo caso a las consideraciones previamente detalladas, es decir, cuando  $Z_s \geq 66^\circ$  y cuando  $Z_s < 66^\circ$ . Además, se tendrán en cuenta por separado las mitades del cielo divididas por el meridiano solar ya que la luminancia a  $90^\circ$  en cielos intermedios pueden ser diferentes para cada mitad del cielo.
3. Extracción y representación de las luminancias  $L$  y sus respectivas distancias angulares  $\chi$  de la función indicatriz experimental de la imagen HDR. Al igual que con la función de gradación, la representación de las funciones indicatrices teórica y experimental permite observar de manera gráfica a qué grupo de función indicatriz estándar se asemeja la experimental. El resultado se muestra en la Figura 13.

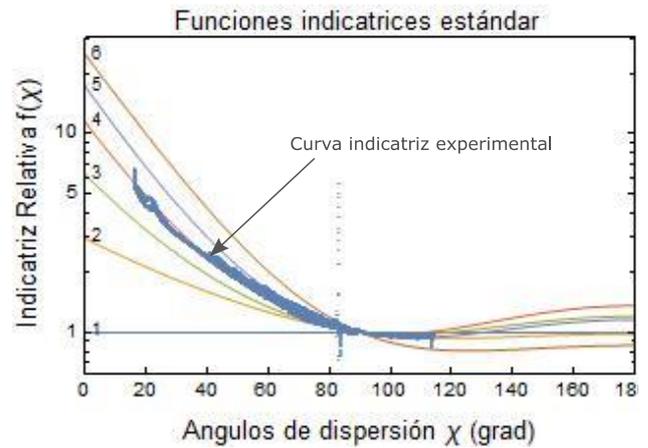


Fig. 13: Función indicatriz relativa experimental para el cielo correspondiente a las 10:12 del 06 de agosto de 2018 en Pamplona, Navarra.

4. Selección del tipo de cielo CIE mediante la combinación de la función de gradación y función indicatriz. Dado que la CIE no contempla todas las combinaciones posibles dentro de sus 15 tipos de cielos estándar, para este trabajo se usa la propuesta de Kobav *et al.* (2013) recogida en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Tipos de cielo CIE según la combinación entre la función de gradación e indicatriz.

Indicatriz	Gradación					
	I	II	III	IV	V	VI
1	1	3	5	9	9	9
2	2	4	6	9	9	9
3	2	7	7	10	10	12
4	8	8	8	11	12	14
5	8	8	8	11	13	14
6	8	8	8	13	13	15

*Clasificación del tipo de cielo por comparación del error medio cuadrático (RMSE) entre las medidas de luminancia experimental y las luminancias teóricas definidas por el estándar CIE.*

Este procedimiento de clasificación de tipos de cielos se basa en la comparación entre la distribución angular de luminancias relativas al cenit  $L_v(z, \gamma)$  de la imagen HDR y las correspondientes a cada uno de los 15 tipos de cielos estándar establecidos por la CIE. El tipo de cielo se elige determinando que distribución de luminancia relativa teórica es el que presenta el menor RMSE cuando se lo compara con la experimental. El procedimiento se describe a continuación:

1. Determinación de las coordenadas solares, azimut solar  $\gamma_s$  y cenit solar  $Z_s$ , mediante el algoritmo de posicionamiento PSA.
2. Cálculo de las distancias angulares al sol  $\chi$  mediante la función de proyección ajustada, expresada en la 6.
3. Generación de las 15 distribuciones de luminancias relativas estándar de la CIE, correspondientes a los cielos estándar CIE recogidos en la Tabla 1, en la que se ha incluido los valores de los parámetros  $a, b, c, d$  y  $e$  para cada uno de dichos cielos.
4. Cálculo de la función de gradación teórica  $\varphi(Z)$  mediante la ecuación 7.
5. Cálculo de la función de gradación del punto cenital  $\varphi(0)$  siguiendo la ecuación 8
6. Cálculo de la función indicatriz estándar teórica  $f(\chi)$  haciendo uso de la ecuación 10.
7. Cálculo del valor de la función indicatriz en el cenit  $f(Z_s)$  mediante la ecuación 11.
8. Cálculo y representación de las 15 distribuciones de luminancias estándar relativas al cenit  $L_v(z, \gamma)$ , por medio de la ecuación 12.
9. Cálculo de la distribución de luminancia relativa al cenit  $L_v$  experimental de la imagen HDR empleando la ecuación 12; como luminancia del cenit  $L_z$  se consideró el valor correspondiente del píxel central de la fotografía.
10. Extracción del tipo de cielo mediante el cálculo del mínimo valor del RMSE entre los valores de distribución de luminancia estándar y la distribución de luminancia experimental.

## RESULTADOS

Con el propósito de analizar los resultados alcanzados, en la Tabla 3 se recogen las frecuencias de ocurrencia de los 15 tipos de cielo obtenidas mediante el procedimiento de comparación de las funciones de gradación e indicatriz (Grad-Ind). Por su parte la Tabla 4 muestra la frecuencia de clasificación tras la aplicación del procedimiento de comparación del error medio cuadrático (RMSE) entre las medidas de luminancia experimental y las luminancias teóricas. Para facilitar el análisis de los resultados obtenidos, las Figuras 14a y b ilustran los porcentajes de ocurrencia de ambos procedimientos, mientras que la Figura 14c los agrupa.

A primera vista (ver Figura 14c) las frecuencias de clasificación de los 15 tipos de cielo obtenidas por los dos métodos son semejantes, el porcentaje de ocurrencia más relevante en ambos procedimientos es el de tipo de cielo 12 con 23,7% para el método Grad-Ind y el 24,4% para el procedimiento RMSE; así mismo, otro porcentaje notable en los dos procedimientos es el tipo de cielo 13, con el 11% de ocurrencia para el método Grad-Ind frente al 15% obtenido por el método RMSE. De igual forma, si observamos que porcentaje de clasificación es el que presenta la menor frecuencia, ambos métodos coinciden en el tipo de cielo 3, resultando el 2% para el método Grad-Ind, y el 1,6% para el procedimiento RMSE.

El estándar ISO 15469 CIE S 011/2003 establece un conjunto de 15 tipos de cielo estándar repartidos en 3 grupos: los 5 primeros corresponden a cielos cubiertos, los 5 siguientes son cielos parcialmente cubiertos y los 5 últimos son los cielos claros, teniendo en cuenta esto, resulta interesante conocer cuál es el porcentaje de ocurrencia para cada uno de estos grupos según la información ilustrada en la Figura 14c, así pues, la Tabla 5 muestra la ocurrencia de los 3 conjuntos de cielos, se puede apreciar que el porcentaje de los tipos de cielos cubiertos es semejante en ambos procedimientos, siendo del 16,92% para el procedimiento RMSE y el 14,27% del procedimiento Grad-Ind. Por otro lado, los porcentajes de ocurrencia para los tipos de cielos claros superan el 50% en ambos procedimientos de clasificación, lo que quiere decir que la mayoría de las imágenes analizadas corresponden a tipos de cielos claros.

## DISCUSIÓN

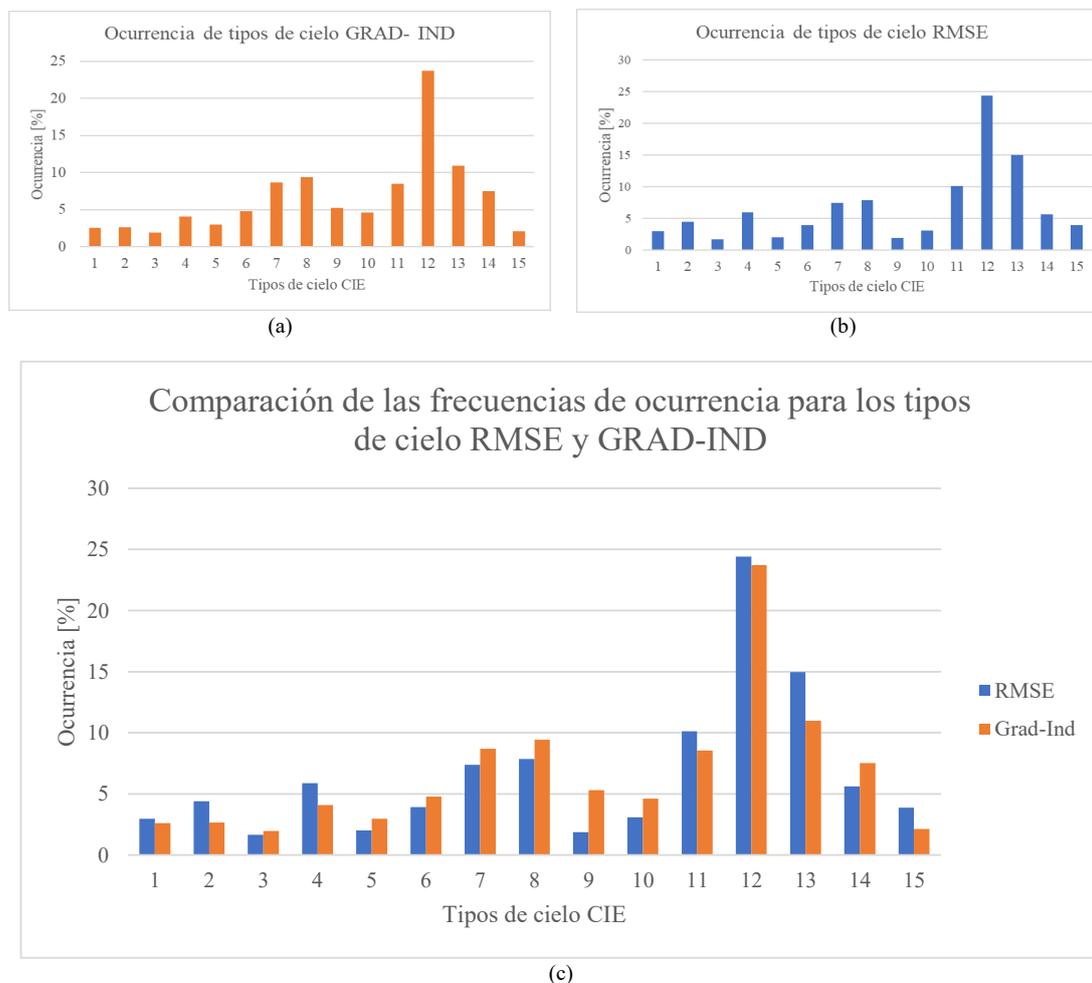
Las coincidencias de clasificación de los tipos de cielos obtenidos por el método de Grad-Ind y el método RMSE se observan en la Figura 14a, sin embargo, puede darse el caso que correspondan a resultados de clasificación cruzados, por este motivo, la Tabla 6 muestra la comparación de las frecuencias de clasificación de un procedimiento frente al otro, en ella salta a simple vista que la mayoría de los resultados se concentran alrededor de la diagonal, esto significa que no existe una diferencia significativa en la frecuencia de clasificación obtenida por ambos métodos y además, hay un gran número de coincidencias, es decir, que existe una gran cantidad de imágenes clasificadas como el mismo tipo de cielo por los dos procedimientos, una gran cantidad de imágenes son clasificadas como tipo de cielo 12, con un total de 447 imágenes para el procedimiento Grad-Ind y 460 para el método RMSE, otra frecuencia de clasificación notable es la del

**Tabla 3:** Frecuencia de clasificación de cielos para el procedimiento de comparación de las funciones gradación e indicatriz.

Tipos de cielo CIE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
GRAD-IND	49	50	37	77	56	90	164	178	100	87	161	447	207	142	40	1885
Ocurrencia [%]	2,6	2,7	2	4,1	3	4,8	8,7	9,4	5,3	4,6	8,5	24	11	7,5	2,1	100

**Tabla 4:** Frecuencia de clasificación de cielos para el procedimiento RMSE.

Tipos de cielo CIE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
RMSE	56	83	31	111	38	74	139	148	35	58	191	460	282	106	73	1885
Ocurrencia [%]	2,97	4,4	1,6	5,9	2	3,9	7,4	7,9	1,9	3,1	10	24	15	5,6	3,9	100



**Fig. 14:** (a) Frecuencia de clasificación de tipos de cielos obtenidos mediante el procedimiento RMSE; (b) Frecuencia de clasificación de tipos de cielos obtenidos mediante el procedimiento GRAD-IND; (c) Comparación de las frecuencias de clasificación entre los dos procedimientos.

tipo de cielo 13, con 207 casos para el método Grad-Ind frente a los 282 de casos del método RMSE. Por otra parte, si se observa cual es la frecuencia con menor número de casos, ambos procedimientos coinciden en el tipo de cielo 3, con 31 casos para el método RMSE y 37 casos para el procedimiento Grad-Ind.

Por otro lado la Tabla 7 recoge el número de coincidencias para los 15 tipos de cielos, se observa que 929 imágenes analizadas coinciden en la clasificación en ambos métodos, lo que representa aproximadamente el 50% del total de muestras estudiadas, siendo el tipo de cielo 12 con un 35,2% el que muestra un mayor número de coincidencias, mientras que los cielos de tipo 2 y 3 son los de porcentaje de ocurrencia mas bajo con un 1,9% y 1,2% respectivamente.

Si se compara la información ilustrada en la Figura 14c y los datos de la Tabla 6, las frecuencias de clasificación de ambos métodos son bastante parecidas, por lo que resulta difícil establecer la precisión de los métodos solamente observando las frecuencias de clasificación, por tal razón, es necesario el analisis del porcentaje de coincidencias para cada tipo de cielo, en la Tabla7 se evidencia que solo el 50% de las imágenes clasificadas coinciden, no obstante, al examinar la diferencia absoluta entre los resultados de clasificación de ambos procedimientos (ver Tabla 8 ) se aprecia que un 25% de las imágenes clasificadas difieren en  $\pm 1$  tipo y el 12% difieren  $\pm 2$  tipos, si consideramos esta información junto con los casos en los que la clasificación coincide (diferencia cero) aproximadamente el 87% de las imágenes son clasificadas con una

**Tabla 5:** Frecuencia de ocurrencia para los 3 conjuntos de tipos de cielos.

Tipos de cielos	RMSE	[%]	Grad-Ind	[%]
Cielos cubiertos [1-5]	319	16,92	269	14,27
Cielos Parcialmente cubiertos [6-10]	454	24,08	619	32,84
Cielos Claros [11-15]	1112	58,99	997	52,89
Total	1885	100	1885	100

**Tabla 6:** Comparación de las frecuencias de clasificación de los dos procedimientos.

RMSE	Grad-Ind															Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	<b>26</b>	16	2	10	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	56
2	11	<b>18</b>	0	10	0	1	8	35	0	0	0	0	0	0	0	83
3	3	1	<b>11</b>	9	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	31
4	9	12	16	<b>29</b>	2	7	23	13	0	0	0	0	0	0	0	111
5	0	0	3	3	<b>25</b>	6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	38
6	0	1	4	6	13	<b>28</b>	16	5	1	0	0	0	0	0	0	74
7	0	1	1	9	9	33	<b>44</b>	36	1	0	5	0	0	0	0	139
8	0	1	0	1	1	8	51	<b>73</b>	1	4	7	0	1	0	0	148
9	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>23</b>	6	0	1	1	2	0	35
10	0	0	0	0	0	1	6	5	10	<b>20</b>	9	7	0	0	0	58
11	0	0	0	0	3	4	11	8	9	50	<b>73</b>	25	7	1	0	191
12	0	0	0	0	0	0	0	0	44	3	19	<b>327</b>	22	45	0	460
13	0	0	0	0	0	0	0	2	4	3	47	64	<b>149</b>	12	1	282
14	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1	1	16	8	<b>59</b>	15	106
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	19	23	<b>24</b>	73
Total	49	50	37	77	56	90	164	178	100	87	161	447	207	142	40	1885

**Tabla 7:** Porcentajes de coincidencias para cada tipo de cielo.

Tipo de cielo CIE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
Concordancia	26	18	11	29	25	28	44	73	23	20	73	327	149	59	24	929
Ocurrencia [%]	2,8	1,9	1,2	3,1	2,7	3,0	4,7	7,9	2,5	2,2	7,9	35,2	16,0	6,4	2,6	100,0

**Tabla 8:** Distribución de diferencias de clasificación.

Diferencias	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total
Frecuencia	929	478	233	137	43	24	41	0	0	0	0	0	0	0	0	1885
Ocurrencias [%]	49	25	12	7,3	2,3	1,3	2,2	0	0	0	0	0	0	0	0	100

tolerancia máxima de  $\pm 2$  tipos de cielos.

En ambos casos, se observa que el mayor número de coincidencias se agrupa alrededor de la diagonal de la Tabla 6, además el porcentaje de coincidencias es muy alto (87%), si consideramos que los datos de la distribución angular de las luminancias se recoje por medio de los pixeles de imágenes HDR, se evidencia que ambos métodos arrojan resultados semejantes, sin embargo, se debería comparar los métodos de clasificación analizados con información proporcionada por el Sky Scanner. El procedimiento de clasificación Grad-Ind menciona la propuesta de Kobav *et al.* (2013) para la asignación de combinaciones de las funciones de gradación y funciones de indicatriz para los tipos de cielo estándar ISO/CIE. La propuesta inicial de estos autores sugiere una tabla de reducción única adecuado para todas las elevaciones solares, en este trabajo se ha evidenciado que la propuesta de Kobav *et al.* da resultados muy aproximados frente al método RMSE, sin embargo, para futuros trabajos sería importante comparar los resultados obtenidos con otros métodos de clasificación.

Sin lugar a dudas los enormes avances en el ámbito de las fotografía digital y la generación de imágenes HDR han logrado salvar las dificultades que tuvieron en su tiempo

McArthur y Hay, facilitando la correlación de los valores de los píxeles de las imágenes con los datos de radiación/luminancia de la bóveda celeste, lo que supone una opción en la obtención de los valores de la luminancia del cielo, sin tener que recurrir a equipos que por su complejidad son de difícil acceso por su costo.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con las frecuencias de clasificación, las dos metodologías arrojan resultados considerablemente parecidos para los 15 tipos de cielos; se ha verificado que los porcentajes de clasificación de ambos métodos son más parecidos para tipos de cielo cubierto y claro, no así para cielos parcialmente cubiertos, además, se ha evidenciado que la mayoría de imágenes analizadas corresponden al tipo de cielo 12, que según establece la CIE corresponde a uno de los tipos de cielos claros, lo que se puede considerar natural dado que el periodo de tiempo en el que las imágenes fueron capturadas corresponden a las estaciones de verano y otoño, esto también explica el bajo porcentaje de ocurrencia para los tipos de cielo cubiertos. Pese a que los dos procedimientos de clasificación están fundamentados en el estándar ISO

15469 CIE S 011/2003 los resultados presentan un porcentaje de coincidencia de aproximadamente el 50%, no obstante, el 37% de las imágenes que no presentan coincidencias en la clasificación difieren en máximo 2 tipos de cielos, lo que lleva a la conclusión de que, para la mayoría de los casos los resultados arrojados por ambos métodos son bastante aproximados.

## FINANCIAMIENTO

El presente trabajo fue realizado en la finca de prácticas de la Universidad Pública de Navarra con recursos propios del investigador.

## REFERENCIAS

- B.Muriel, M., C.Alarcon, D., L.Moratalla, T., y L.Coira.M. (2001). Computing the solar vector. *Sol. Energy*, 70(5), 431–441.
- Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T., y Nakamura, H. (2004, jan). Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. *Sol. Energy*, 77(2), 137–157. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04001070> doi: 10.1016/J.SOLENER.2004.04.016
- Igawa, N., Nakamura, H., y Matsuura, K. (1999). Sky luminance distribution model for simulation of daylight environment. *Proc. Build. Simul. 1999, Kyoto, Japan*, 2, 969–975.
- Kittler, R. (1994, dec). Some qualities of scattering functions defining sky radiance distributions. *Sol. Energy*, 53(6), 511–516. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X9490131K> doi: 10.1016/0038-092X(94)90131-K
- Kittler, R., y Darula Diplng, S. (1997, jun). Prevailing sky conditions: Identifying simple parameters for definition. *Int. J. Light. Res. Technol.*, 29(2), 63–68. Descargado de <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/14771535970290020601> doi: 10.1177/14771535970290020601
- Kobav, M. B., Bizjak, G., y Dumortier, D. (2013). Characterization of sky scanner measurements based on CIE and ISO standard CIE S 011/2003. *Light. Res. Technol.*, 45(4), 504–512. doi: 10.1177/1477153512458916
- McArthur, B. L. J., y Hay, J. E. (1981). *A technique for mapping the distribution of diffuse solar radiation over the sky hemisphere*. (Vol. 20). doi: Doi10.1175/1520-0450(1981)020<0421:Atfmdt>2.0.Co;2
- Miyamoto, K. (1964). Fish Eye Lens. *J. Opt. Soc. Am.*, 54(8), 1060. Descargado de <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-54-8-1060> doi: 10.1364/JOSA.54.001060
- MOON, y P. (1942). Illumination from a non-uniform sky. *Illum. Engng. (N. Y. )*, 37, 707–726. Descargado de <http://ci.nii.ac.jp/naid/10004232051/en/>
- Neve, S. D., Goossens, B., Luong, H., y Philips, W. (2009). An improved HDR image synthesis algorithm. En *2009 16th IEEE Int. Conf. Image Process.* (pp. 1545–1548). doi: 10.1109/ICIP.2009.5414542
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., y Stewart, R. (1990, jan). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Sol. Energy*, 44(5), 271–289. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X9090055H> doi: 10.1016/0038-092X(90)90055-H
- Perez, R., Seals, R., y Michalsky, J. (1993, mar). All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. *Sol. Energy*, 50(3), 235–245. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X9390017I> doi: 10.1016/0038-092X(93)90017-I
- Perraudeau, M. (1986). One year's measurement of luminous climate in Nantes. En *Proc. int. daylighting conf., long beach, ca.*
- Tregenza, P. R. (1999, sep). Standard skies for maritime climates. *Int. J. Light. Res. Technol.*, 31(3), 97–106. Descargado de <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/096032719903100304> doi: 10.1177/096032719903100304