

ESTUDIO DE LA NUBOSIDAD NOCTURNA EN GIRONA A PARTIR DE IMÁGENES EN EL VISIBLE (2016-2018)

Aarón ENRIQUEZ-ALONSO¹, Josep CALBÓ¹, Josep-Abel GONZÁLEZ¹

¹*Universitat de Girona, Departament de Física.*

aaron.enriquez@udg.edu, josep.calbo@udg.edu, jose.gonzalez@udg.edu

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evolución de la nubosidad nocturna en Girona durante dos años a partir de imágenes tomadas con la cámara de todo cielo SONA en el visible. Hay que tener en cuenta que durante la noche las diferentes fuentes de luz que iluminan las nubes y permiten distinguirlas en las imágenes tomadas por la cámara son la Luna (cuando está presente) y la luz artificial proveniente de la superficie. Por ello se implementa un método de análisis de imágenes mediante el establecimiento de criterios en intensidad y sobre la relación entre las componentes roja y azul (R/B) de los píxeles. Este método se valida, y permite discernir entre píxel nublado o despejado. En la segunda parte del trabajo, dicho método se aplica a las imágenes en visible tomadas por la cámara SONA, con una resolución temporal minutil, lo que genera aproximadamente un total de 400.000 imágenes desde Junio de 2016 a Mayo de 2018. Los resultados obtenidos muestran un máximo de nubosidad en Febrero y Septiembre/Octubre, mientras que la cobertura nubosa es menor para los meses de verano.

Palabras clave: nubosidad nocturna, procesamiento imágenes, Girona

ABSTRACT

In this work the evolution of the nocturnal cloudiness in Girona during two years is presented from the images taken with the all-sky camera SONA in the visible range. During the night, both the Moon (when it's present) and the artificial light coming from the ground act as sources of light that illuminate the clouds and allow to differentiate them in the images taken by the camera. An image analysis method is implemented by establishing criteria in intensity and R/B ratio of the pixels, to discern between cloudy and clear pixels. In the second part of the work, this method is applied to the visible images taken by SONA camera, with a temporal resolution of one minute, which generates approximately 400.000 images from June 2016 to May 2018. Results obtained show a maximum of cloud cover in February and in September/October, while cloud cover is lower for the summer's months.

Key words: night cloudiness, image processing, Girona

1. INTRODUCCIÓN

Las nubes son un importante regulador del clima y afectan de manera directa al balance de energía en la Tierra reflejando gran parte de la radiación proveniente del Sol (de onda corta), así como absorbiendo y reflejando la radiación procedente de la superficie terrestre (onda larga) (Wild et al. 2013; Zhou et al. 2016), por lo que las nubes juegan un papel clave en el balance de energía y el sistema climático. Sin embargo, existen incertidumbres sobre la climatología y las tendencias de las nubes (Hartmann et al. 2013; Enriquez-Alonso et al. 2017; Sanchez-Lorenzo et al. 2017), así como su respuesta a las actividades antropogénicas (Dufresne and Bony 2008; Flato et al. 2013).

Existen diferentes maneras de observar la nubosidad y obtener las series de datos. Las primeras series de nubosidad sistemáticas fueron obtenidas a partir de los registros de observadores humanos asociados a estaciones meteorológicas alrededor del mundo. Dichas series de datos se extienden más de un siglo para ciertas regiones y por lo general son las series de datos de nubosidad más largas. Una característica de estas series a tener en cuenta es que son datos muy localizados y concretos para una región. Por lo contrario, el principal hándicap es la subjetividad propia a estas observaciones, a pesar que son realizadas por personal entrenado. Además, el estudio de la nubosidad nocturna mediante observadores humanos es más difícil debido a la disponibilidad de observadores nocturnos y, dependiendo de las condiciones del cielo y el lugar, a la ausencia de luz suficiente para poder observar correctamente la nubosidad. Este hecho hace que las climatologías de la nubosidad, basadas en estas series, estén a menudo sesgadas a la nubosidad diurna debido a la gran escasez de datos nocturnos.

Otra manera de observar la nubosidad la proporcionan los satélites, los cuales ayudan a tener una visión a gran escala de la cobertura nubosa así como de su evolución, por lo que son ideales para un estudio a gran escala o global. Sin embargo, su baja resolución dificulta su uso a la hora de realizar estudios más locales. Además la serie de datos más larga es de apenas 35 años y la mayoría de las veces sus datos deben ser homogeneizados debido al cambio de sensores utilizados, además de que en algunas regiones del planeta presentan deficiencias vinculadas al ángulo de visión del satélite (Evan et al. 2007).

Por otra parte, un ceilómetro es un dispositivo que cada cierto tiempo emite y recibe un pulso láser, lo que permite medir la altura de la base de las nubes y su estructura vertical. La principal ventaja del ceilómetro es que se trata de un proceso automatizado y con una resolución temporal alta. Además permite medir la altura de la base de varias capas de nubosidad, dependiendo del espesor óptico de cada una de ellas. La principal desventaja del instrumento es que solo obtiene información de la altura de la base de la nube que pasa por el cénit de lugar, obviando la nubosidad, si es que existiese, colindante.

A diferencia del ceilómetro, las cámaras de todo cielo dan una visión del estado de todo el cielo gracias a la lente ojo de pez que llevan incorporadas. La información que se obtiene a partir de estos instrumentos es una imagen cada cierto lapso de tiempo, lo que permite estudiar y analizar la variación espacio-temporal de la nubosidad en un amplio campo de visión y con una alta resolución temporal. Existen multitud de estudios que analizan la nubosidad mediante imágenes diurnas, pero debido a la dificultad de analizar imágenes visibles durante la noche, el número de estudios en

este caso es escaso. Recientemente, se están proponiendo cámaras sensibles al infrarrojo con este motivo.

El principal objetivo de este trabajo es presentar un método y unos criterios para estimar la cobertura total de nubes de manera automática, a partir de las imágenes nocturnas en el visible, obtenidas mediante una cámara de todo cielo. La segunda parte del estudio consistirá en la aplicación de este método a dos años de imágenes nocturnas con una resolución temporal cada minuto para la ciudad de Girona.

2. DATOS Y MÉTODOS

La estación meteorológica y radiométrica del Grupo de Física Ambiental de la Universitat de Girona está situada en el tejado de la Escola Politècnica Superior ($41^{\circ}57'48''\text{N}$, $2^{\circ}49'52''\text{E}$, 110m) en la ciudad de Girona, situada a unos 100 km al norte de Barcelona y a unos 40 km al sur de los Pirineos. Dicha estación dispone de diversos instrumentos radiométricos (piranómetros, pirheliómetro, radiómetro multicanal con banda sombreadora rotatoria), así como de dos cámaras de “todo cielo” y un ceilómetro (Calbó et al. 2017).

Para la obtención de imágenes nocturnas se ha utilizado la cámara SONA, modelo 201DN de la compañía Sieltec Canarias S.L. La cámara está provista de una lente ojo de pez, con lo que se consigue un campo de visión de más de 180° . Nuestro estudio, que se ciñe a aquellas imágenes tomadas cuando el ángulo cenital solar es mayor que 105° , es decir, cuando el Sol se encuentra a más de 15° por debajo del horizonte (noche cerrada), el tiempo de exposición se ha fijado en 5000 ms. Las imágenes, que empezaron a adquirirse de forma regular en Junio de 2016, se guardan en formato .jpg y .png y tienen una resolución de 1320×1200 píxeles (1.5 Mpx.).

Durante la noche, las fuentes de luz que iluminan las nubes y permiten distinguirlas en las imágenes tomadas por la cámara son, por una parte, la Luna (cuando está presente), y por otra parte la luz artificial proveniente de la superficie (Figura 1). En efecto, debido a que la estación meteorológica de la UdG está situada en el extrarradio de la ciudad de Girona, a unos 2 km del centro, provoca que durante la noche las imágenes tomadas por la cámara se vean afectadas por la “contaminación lumínica” de la ciudad, iluminación que alcanza fundamentalmente a la zona de la imagen próxima a la ciudad (noroeste) y que disminuye de forma gradual su efecto en la dirección contraria. En todo caso, las nubes reflejarán más o menos luz proveniente de la superficie en primer lugar dependiendo de su altura, y en segundo lugar dependiendo de sus características ópticas (espesor óptico, diámetro y fase de las gotas,...).

El primer paso antes de comenzar a analizar las imágenes es la aplicación de máscaras con tal de clasificar solamente aquellos píxeles que correspondan a cielo. Una primera máscara cubre la Luna en caso de que ésta haga presencia en la imagen. Para situar la Luna correctamente en la imagen y así poder aplicarle la máscara, previamente es necesario determinar la posición de ésta en la imagen. Así, dadas las coordenadas astronómicas del astro, se debe conocer la transformación entre unas coordenadas en el cielo (altura angular, azimuth) y las coordenadas (x,y) de la imagen. Para ello, inicialmente se hace la aproximación de una proyección tal que a ángulos cenitales equiespaciados le correspondan distancias equidistantes al cénit.

Asumiendo esta proyección, si r_0 representa la distancia al centro de la imagen (en píxeles) de un punto situado en un ángulo cenital θ , la relación entre uno y otro dependerá de los parámetros semi-ángulo de visión de la cámara (θ_{max}), que en nuestro caso es de 90° , y el radio (R) de las imágenes. Por lo tanto r_0 será:

$$r_0 = \frac{\theta}{\theta_{max}} R \quad (1)$$

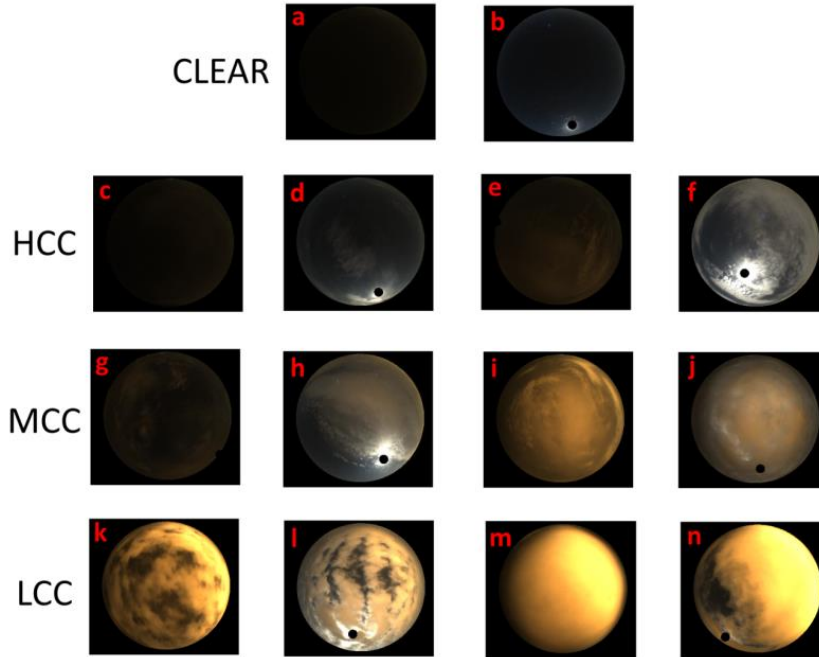


Figura 1. Diferentes imágenes con y sin Luna de los distintos estados del cielo nocturno. HCC, nubes altas; MCC, nubes medias; LCC, nubes bajas.

En un caso ideal la cámara no presentaría ninguna distorsión, pero en la realidad es de esperar que la cámara presente una distorsión radial intrínseca debida posiblemente a la lente de la cámara, o la cúpula que la protege. Por distorsión entendemos la desviación respecto a este comportamiento (proyección) ideal asumido en la Ec. (1). Por lo tanto, para posicionar correctamente un punto del cielo en la imagen (como puede ser un astro) tendremos que describirla. La distorsión óptica relativa (δ) se puede definir y cuantificar como la ratio existente entre la distancia, en las imágenes, entre un punto y el cenit (r), y la distancia r_0 obtenida suponiendo la proyección ideal (Ec. 1). Es decir:

$$\delta = \frac{r_0}{r} = \frac{\theta/\theta_{max}}{r/R} \quad (2)$$

Con tal de obtener una corrección para la distorsión que provoca la cámara SONA, se representó dicha distorsión relativa para diversas posiciones del Sol a lo largo de un

día, frente al ángulo cenital (θ) de éste. Luego se obtuvo la curva que relaciona la distorsión relativa con el ángulo cenital mediante un ajuste polinómico de orden 2:

$$\delta_{ajuste} = 2.4 \cdot 10^{-5}\theta^2 + 9.7 \cdot 10^{-3}\theta + 0.73 \quad (3)$$

Puesto que tanto r como la distorsión relativa dependen de θ , se obtiene lo que se había planteado: convertir θ en una distancia al cénit en la imagen proporcionada por la cámara SONA.

$$r = \frac{1}{\delta_{ajuste}} \frac{\theta}{\theta_{max}} R \quad (4)$$

Por lo tanto, dependiendo del valor del ángulo cenital teórico que se obtiene de las ecuaciones astronómicas adecuadas (Duffett-Smith et al. 2011), se procede a calcular primero la distancia r mediante la Ec. 4. A continuación, suponiendo el caso ideal de que la SONA está correctamente orientada respecto al norte, las coordenadas de la Luna sobre la imagen (x, y), dependen de la posición del cénit (x_c, y_c), de la distancia del astro al cénit calculada por la Eq. 4 (r) y del ángulo azimutal del astro (ϕ) y son:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} - r \begin{pmatrix} \sin\phi \\ \cos\phi \end{pmatrix} \quad (5)$$

En el caso de que la cámara SONA no esté orientada correctamente al norte, la posible rotación se ha de tener en cuenta a la hora de transformar las coordenadas astronómicas del astro a las coordenadas sobre la imagen.

Cuando se ha situado el astro en la imagen, el siguiente paso corresponde a aplicar las máscaras. Por una parte, está la máscara de la Luna, que depende del día y la hora de la imagen a estudiar y se aplica siempre y cuando la Luna aparezca en la imagen. Después de examinar multitud de imágenes donde la Luna hace presencia, se decide ocultar el astro con un círculo fijo de 40 píxeles, ya sea Luna llena o Luna creciente/menguante. Por otra parte, está la máscara del horizonte. Dicha máscara cubre los edificios y el bosque de alrededor de la estación y tiene una altura de 10° sobre el horizonte de la óptica de la cámara. Se trata de una máscara fija que no depende del tiempo de observación y que deja visible solamente aquellos píxeles que corresponden a cielo.

3. DISCRIMINACIÓN NUBES – CIELO Y RESULTADOS

Una vez aplicadas las máscaras, el siguiente paso consiste en automatizar la lectura de imágenes y su tratamiento, con el objetivo de distinguir qué píxeles de las imágenes se corresponden a cielo y cuáles a nube. En total, cumpliendo el requisito para noche cerrada (el Sol tiene que tener un ángulo cenital mayor de 105°), en nuestra base de datos hay en torno a 400000 imágenes. Para establecer los criterios, se examinan visualmente alrededor de 600 imágenes (la mayoría de ellas tomadas a las 00.00h UTC de cada día, Junio 2016 – Mayo 2018), a partir de lo cual se eligieron las variables y umbrales adecuados para dicha distinción. En las imágenes se dan diferentes situaciones: 1) cielo completamente nublado, 2) cielo con claros y nubes

(estos dos primeros casos con la base de las nubes a distintas alturas, y con nubes de diverso espesor óptico), 3) cielo completamente despejado. Además, los tres casos se dan con presencia o ausencia de Luna, es decir con esta fuente de luz más blanca o únicamente con la luz proveniente de la ciudad, que es más anaranjada.

Así, se procede a separar la imagen obtenida en los tres canales RGB. En otros artículos donde se estudia la nubosidad a partir de imágenes de cámara de todo cielo (Long et al. 2006; Calbó and Sabburg 2008; Heinle et al. 2010; Shields et al. 2013; Wacker et al. 2015; Aebi et al. 2017; Román et al. 2017) se utiliza la relación R/B (dividir la señal del canal rojo entre la del canal azul) como el principal parámetro para la diferenciación de píxel con o sin nube. Para el caso de imágenes nocturnas, si el píxel está en una zona sin nubes, el valor de la relación R/B estará en torno a 1 ya que los valores de los canales rojo y azul serán bajos y prácticamente iguales. Sin embargo, cuando el píxel está cubierto, el valor de la relación R/B dependerá de la capacidad de la nube en dispersar la luz proveniente de la Luna (R/B bajo) o bien de reflejar la luz anaranjada proveniente de la ciudad (R/B relativamente alto). Es decir, dependiendo de la altura y del espesor óptico de la nube, la relación R/B tendrá un valor mayor (nubes bajas con alto espesor óptico) o menor (nubes altas con bajo espesor óptico).

La intensidad del píxel I se define como el promedio normalizado de los tres canales (rojo, verde y azul), siendo 0 cuando el píxel es totalmente negro, y 1 cuando en los tres canales el píxel toma un valor de 255 (píxel saturado, totalmente blanco). Lógicamente, píxeles con intensidad muy baja, indicarán cielo sin nubes (y sin Luna). Cabe tener en cuenta que, debido a la situación donde se encuentra la cámara SONA, en los casos que existe suficiente nubosidad de tipo medio-bajo como para reflejar la luz artificial proveniente de la propia ciudad, se produce un gradiente de intensidad lumínica en la imagen que va de una mayor intensidad en la zona derecha a menor intensidad en la zona izquierda (por ejemplo, Fig. 1.m), a pesar de que la capa de nubes sea prácticamente horizontal y homogénea.

Debido a este gradiente de iluminación, se propone definir dos zonas donde aplicar distintos criterios y cuáles serán éstos. En la zona 1, se considera un píxel despejado si $[I \leq 0.3 \text{ y } RB \leq 1.2]$ o bien si $[I \leq 0.1 \text{ y } RB > 1.2]$. En la zona 2, se considera despejado si $[I \leq 0.3 \text{ y } RB \leq 1.2]$ o bien si $[I \leq 0.1 \text{ y } 1.2 < RB \leq 2.5]$. Cualquier otra combinación de valores de RB y I se considera que corresponde a un píxel nublado.

Teniendo en cuenta estos criterios (ver ejemplo del resultado en la Fig. 2), el cálculo de la cobertura total de nubes en una imagen se realiza contando los píxeles cubiertos (N_{cloudy}) y dividiendo por el total de píxeles de la imagen una vez aplicadas las máscaras (N):

$$TCC = \frac{N_{cloudy}}{N} \cdot 100 (\%TCC) \quad (7)$$

Entonces, se procede a analizar todas las imágenes desde Junio de 2016 hasta Mayo de 2018. En la Figura 3 se representa gráficamente la media mensual de la cobertura nubosa (nocturna) a lo largo de los 2 años de estudio, y se observa como existen 4 máximos relativos de nubosidad correspondientes a los meses de septiembre/octubre

y de febrero. Por otra parte el mínimo de nubosidad, tal y como era de esperar para un clima mediterráneo, ocurre en verano (tanto en 2016 como en 2017).

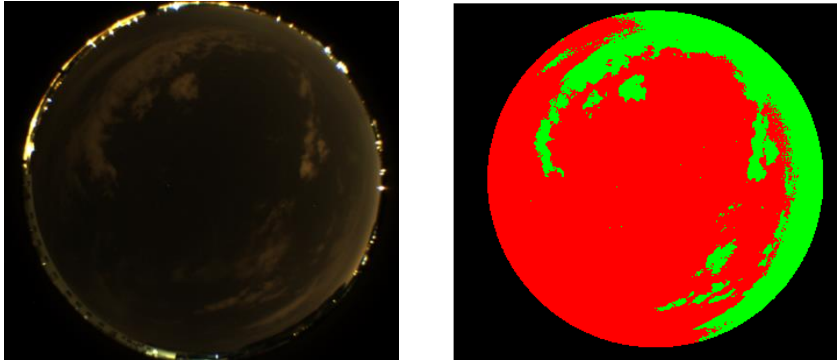


Figura 2. Imagen visible del estado del cielo el 9 de Junio de 2016 a las 00.00h UT (izquierda) y la identificación de píxeles nublados (verde) y con cielo despejado (rojo) de dicha imagen con una regla, identificación correcta (derecha).

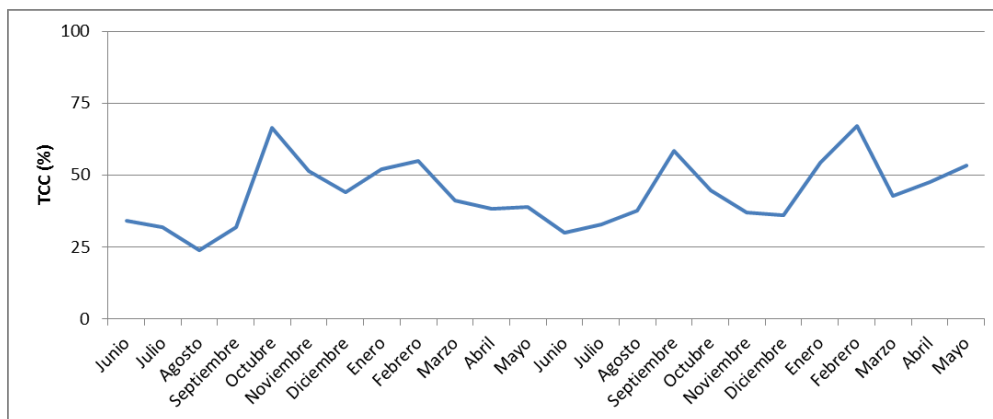


Figura 3. Evolución de la nubosidad nocturna a nivel mensual desde Junio de 2016 hasta Mayo de 2018.

En la tabla 1 se muestran los valores de la nubosidad nocturna para las diferentes estaciones del periodo de estudio. Dicha tabla refleja lo observado en la Fig. 3, es decir, los máximos de nubosidad en los meses de invierno (DJF) y otoño (SON), y el mínimo en los meses de verano (JJA). Estos resultados están en concordancia con lo observado por Calbó y Sanchez-Lorenzo (2009) a partir de tres bases de datos (ISCCP, CRU y ERA-40) para la Península Ibérica desde 1983 hasta 2002 (Tabla 1). Igualmente, en la climatología de Calbó et al. (2008) a partir de observaciones visuales se muestra también la misma evolución estacional para el periodo 1971-2000 (Tabla 1). Es obvio que nuestras observaciones dan una nubosidad menor que los estudios previos, lo que puede ser debido al comportamiento particular de los 2 años analizados (que no es un período representativo climáticamente). También es posible que el

método presentado pueda tener una tendencia a infravalorar la nubosidad. Por último, y quizás lo más destacable de este estudio, es que se trata de nubosidad nocturna, bastante desconocida hasta ahora y que podría tener un comportamiento distinto a la diurna o a la del día completo que se analizó en los estudios previos.

	Presente estudio				Calbó y Sanchez-Lorenzo (2009)	Calbó et al. (2008)
	2016	2017	2018	Promedio		
DJF	-	50.3	52.6	51.4	60	50
MAM	-	39.5	47.9	43.7	60	56
JJA	30.0	33.4	-	31.7	45	43
SON	49.9	46.8	-	48.3	55	53

Tabla 1. Valores estacionales de la nubosidad nocturna (%) para el periodo de estudio (Verano 2016 – Primavera 2018), y valores climáticos de la nubosidad obtenidos en estudios previos.

En la Fig. 4 (izquierda) se muestra el número de imágenes por rangos de nubosidad equivalentes a las octas, habitualmente usadas en las observaciones visuales. Tal y como era de esperar, presenta una distribución en forma de U, lo que indica una frecuencia alta en cielos prácticamente despejados y cubiertos, y una frecuencia baja en cielos con nubes dispersas. No obstante, el máximo para cielos despejados no se encuentra en las 0 octas, sino en 1 octa, lo que probablemente apunta a alguna limitación del método de identificación de píxeles despejados y nubosos, que debe tender, en el caso de cielos muy despejados, a dar como nube algunos píxeles que en realidad no se corresponden a nubes reales. Es posible que se deba a algún reflejo de la Luna en la cúpula de cristal que cubre el objetivo de la cámara, pero en cualquier caso es una cuestión que será investigada en el futuro.

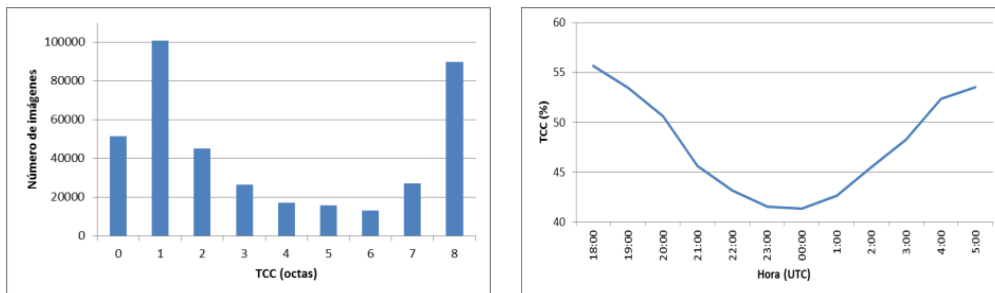


Figura 4. (Izq.) Número de imágenes por rangos de nubosidad. (Der.) Nubosidad total media observada por horas.

Por último, en la Fig. 4 (derecha) se muestra la nubosidad total media en todo el período según la hora de la noche, y se observa como la distribución ofrece un mínimo a la medianoche y unos máximos de nubosidad tanto al inicio como al final de la noche. Este es un comportamiento interesante que requerirá ser investigado con mayor

detalle. Por ejemplo, se ha de tener en cuenta que no todas las noches del año tienen la misma duración, por lo que las horas extremas están sesgadas a los meses de invierno.

4. CONCLUSIONES

En el trabajo se ha presentado un método para la obtención de la cobertura nubosa nocturna a partir de imágenes en el rango visible adquiridas mediante una cámara de todo cielo situada en la ciudad de Girona. El método puede aplicarse a diferentes ubicaciones y condiciones del cielo. Hay que notar que el criterio basado en la relación R/B es de carácter más general, mientras que el criterio escogido para la intensidad variaría en función de la posición de la cámara respecto a fuentes de luz artificial. Es por ello que a pesar de que lo presentado en este estudio es particular para la cámara situada en la Escuela Politécnica de la Universitat de Girona, debería ser extrapolable a otras ubicaciones previo estudio de las condiciones del nuevo emplazamiento.

En la segunda parte del trabajo, una vez establecido y validado el método, se automatiza la lectura de las imágenes nocturnas tomadas durante 24 meses. Esto permite de manera sencilla y eficaz obtener una evolución de la nubosidad nocturna a partir de imágenes en el visible y analizar su comportamiento, que no puede considerarse climático por la limitación temporal de la serie. Aún así, se obtiene el típico comportamiento estacional (con mínimo veraniego) y la típica distribución con máximos en cielos despejados y totalmente cubiertos. La evolución a lo largo de la noche, que muestra un mínimo a medianoche, deberá investigarse con más atención.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto NUBESOL (CGL2014-55976-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

REFERENCIAS

- Aebi C, Gröbner J, Kämpfer N, Vuilleumier L (2017) Cloud radiative effect , cloud fraction and cloud type at two stations in Switzerland using hemispherical sky cameras. *Atmos Meas Tech* 10:4587–4600. doi: 10.5194/amt-10-4587-2017
- Calbó J, González JA, Sanchez-Lorenzo A (2017) Building global and diffuse solar radiation series and assessing decadal trends in Girona (NE Iberian Peninsula). *Theor Appl Climatol* 129:1003–1015. doi: 10.1007/s00704-016-1829-3
- Calbó J, Sabburg J (2008) Feature extraction from Whole-sky ground-based images for cloud-type recognition. *J Atmos Ocean Technol* 25:3–14. doi: 10.1175/2007JTECHA959.1
- Calbó J, Sanchez-Lorenzo A (2009) Cloudiness climatology in the Iberian Peninsula from three global gridded datasets (ISCCP, CRU TS 2.1, ERA-40). *Theor Appl Climatol* 96:105–115. doi: 10.1007/s00704-008-0039-z

- Calbó J, Sánchez-Lorenzo A, Martín-Vide J (2008) Aspectos climatológicos y evolución temporal de la nubosidad en la Península Ibérica (1961-2004), Serie A, n. Asociación Española de Climatología
- Duffett-Smith P, Zwart J, Duffett-Smith P (2011) Practical astronomy with your calculator or spreadsheet. Cambridge University Press
- Dufresne J-L, Bony S (2008) An Assessment of the Primary Sources of Spread of Global Warming Estimates from Coupled Atmosphere–Ocean Models. *J Clim* 21:5135–5144. doi: 10.1175/2008JCLI2239.1
- Enriquez-Alonso A, Calbó J, Sanchez-Lorenzo A, Tan E (2017) Discrepancies in the Climatology and Trends of Cloud Cover in Global and Regional Climate Models for the Mediterranean Region. *J Geophys Res Atmos*. doi: 10.1002/2017JD027147
- Evan AT, Heidinger AK, Vimont DJ (2007) Arguments against a physical long-term trend in global ISCCP cloud amounts. *Geophys Res Lett* 34:L04701. doi: 10.1029/2006GL028083
- Flato G, Marotzke J, Abiodun B, et al (2013) Evaluation of Climate Models. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 741–866
- Hartmann DL, Klein Tank AMG, Rusticucci M, et al (2013) Observations: Atmosphere and Surface. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 159–254
- Heinle A, Macke A, Srivastava A (2010) Automatic cloud classification of whole sky images. *Atmos Meas Tech* 3:557–567.
- Long CN, Sabburg JM, Calbó J, Pagès D (2006) Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images. *J Atmos Ocean Technol* 23:633–652. doi: 10.1175/JTECH1875.1
- Román R, Cazorla A, Toledano C, et al (2017) Cloud cover detection combining high dynamic range sky images and ceilometer measurements. *Atmos Res* 196:224–236. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.06.006
- Sanchez-Lorenzo A, Enriquez-Alonso A, Calbó J, et al (2017) Fewer clouds in the Mediterranean: Consistency of observations and climate simulations. *Sci Rep*. doi: 10.1038/srep41475
- Shields JE, Karr ME, Johnson RW, Burden AR (2013) Day/night whole sky imagers for 24-h cloud and sky assessment: history and overview. *Appl Opt* 52:1605–1616. doi: 10.1364/AO.52.001605
- Wacker S, Gröbner J, Zysset C, et al (2015) Cloud observations in Switzerland using hemispherical sky cameras. *J Geophys Res* 120:695–707. doi: 10.1002/2014JD022643
- Wild M, Folini D, Schär C, et al (2013) The global energy balance from a surface perspective. *Clim Dyn* 40:3107–3134. doi: 10.1007/s00382-012-1569-8

Zhou C, Zelinka MD, Klein SA (2016) Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy budget. *Nat Geosci* 9:871–874. doi: 10.1038/ngeo2828