

Herrero del Barrio, C.; Román Diez, R.; Herrero-Anta, S.; González-Fernández, D.; Carracedo, R.; González, R.; Longarela, B.; Gatón, J.; Mateos, D.; Calle, A.; Toledano, C.; Cachorro, V.; de Frutos, Á. Obtención de mapas de altura de las nubes mediante una red de cámaras de todo cielo

Obtención de mapas de altura de las nubes mediante una red de cámaras de todo cielo

Herrero del Barrio, Celia^{1,2} **Román Diez, Roberto**^{1,2} **Herrero-Anta, Sara**^{1,2} **González-Fernández, Daniel**^{1,2} **Carracedo, Rogelio**^{1,2} **González, Ramiro**^{1,2} **Longarela, Bruno**^{1,2} **Gatón, Javier**^{1,2} **Mateos, David**^{1,2} **Calle, Abel**^{1,2} **Toledano, Carlos**^{1,2} **Cachorro, Victoria Eugénia**^{1,2} **de Frutos, Ángel**^{1,2}

¹ Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España;

² Laboratory for Disruptive Interdisciplinary Science de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España

ORCID: Herrero del Barrio 0009-0001-9508-3886 Román Diez 0000-0003-4889-1781 Herrero-Anta 0000-0003-4246-1836 González-Fernández 0000-0002-3302-8080 Carracedo 0000-0001-6966-8867 González 0000-0003-0017-5591 Longarela 0009-0005-7323-462X Gatón 0000-0002-1229-155X Mateos 0000-0001-5540-4721 Calle 0000-0003-4161-7798 Toledano 0000-0002-6890-6648 Cachorro 0000-0002-4627-9444 de Frutos 0000-0001-5748-5078

Correspondencia: celia@goa.uva.es robertor@goa.uva.es sara@goa.uva.es daniel@goa.uva.es rogelio@goa.uva.es ramiro@goa.uva.es bruno@goa.uva.es gaton@goa.uva.es mateos@goa.uva.es abel.calle@uva.es toledano@goa.uva.es chiqui@goa.uva.es angel@goa.uva.es

RESUMEN

Este estudio presenta una metodología para la detección y cálculo de la altura de las nubes utilizando una red de 20 cámaras de todo cielo distribuidas por la ciudad de Valladolid (España) y sus alrededores. Todas estas cámaras son idénticas (modelo OMEA-3C-TF), y son operadas y calibradas geoméricamente dentro de la infraestructura GOA-SCAN del Grupo de Óptica Atmosférica (GOA-UVA). La metodología propuesta combina el preprocesamiento de imágenes, la segmentación de píxeles de nubes, la identificación de píxeles coincidentes y la reconstrucción estereoscópica para obtener mapas de altura de las nubes. El sistema proporciona observaciones continuas cada cinco minutos durante el día y cada dos minutos durante la noche, lo que permite monitorizar la estructura espacial de las nubes y su evolución a corto plazo. Para cada instante, cada cámara se empareja con todas las demás cámaras de la red, lo que produce múltiples estimaciones independientes de la altura de las nubes. Estas estimaciones se filtran utilizando restricciones geométricas, métricas de calidad de correlación y criterios de plausibilidad física. El uso de múltiples distancias de cámara permite la sensibilidad a diferentes capas de nubes y garantiza una cobertura espacialmente coherente del área urbana y sus alrededores.

Palabras clave: Nubes, Cámaras de todo cielo, Estereoscopia

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 19 marzo 2026

Obtención de mapas de altura de las nubes mediante una red de cámaras de todo cielo

Herrero del Barrio, Celia ^(1,2), Román Diez, Roberto ^(1,2), Herrero-Anta, Sara ^(1,2), González-Fernández, Daniel ^(1,2), Carracedo, Rogelio ^(1,2), González, Ramiro ^(1,2), Longarela, Bruno ^(1,2), Gatón, Javier ^(1,2), Mateos, David ^(1,2), Calle, Abel ^(1,2), Toledano, Carlos ^(1,2), Cachorro, Victoria Eugénia ^(1,2), de Frutos, Ángel ^(1,2)

⁽¹⁾ Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, España.

⁽²⁾ Laboratory for Disruptive Interdisciplinary Science de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, España

 0009-0001-9508-3886, celia@goa.uva.es ;  0000-0003-4889-1781, robertor@goa.uva.es
 0000-0003-4246-1836, sara@goa.uva.es ;  0000-0002-3302-8080, daniel@goa.uva.es
 0000-0001-6966-8867, rogelio@goa.uva.es ;  0000-0003-0017-5591, ramiro@goa.uva.es
 0009-0005-7323-462X, bruno@goa.uva.es ;  0000-0002-1229-155X, gaton@goa.uva.es
 0000-0001-5540-4721, mateos@goa.uva.es ;  0000-0003-4161-7798, abel.calle@uva.es
 0000-0002-6890-6648, toledano@goa.uva.es ;  0000-0002-4627-9444, chiqui@goa.uva.es
 0000-0001-5748-5078, angel@goa.uva.es

Resumen: Este estudio presenta una metodología para la detección y cálculo de la altura de las nubes utilizando una red de 20 cámaras de todo cielo distribuidas por la ciudad de Valladolid (España) y sus alrededores. Todas estas cámaras son idénticas (model o OMEA-3C-TF), y son operadas y calibradas geoméricamente dentro de la infraestructura GOA-SCAN del Grupo de Óptica Atmosférica (GOA-UVa). La metodología propuesta combina el preprocesamiento de imágenes, la segmentación de píxeles de nubes, la identificación de píxeles coincidentes y la reconstrucción estereoscópica para obtener mapas de altura de las nubes. El sistema proporciona observaciones continuas cada cinco minutos durante el día y cada dos minutos durante la noche, lo que permite monitorizar la estructura espacial de las nubes y su evolución a corto plazo. Para cada instante, cada cámara se empareja con todas las demás cámaras de la red, lo que produce múltiples estimaciones independientes de la altura de las nubes. Estas estimaciones se filtran utilizando restricciones geométricas, métricas de calidad de correlación y criterios de plausibilidad física. El uso de múltiples distancias de cámara permite la sensibilidad a diferentes capas de nubes y garantiza una cobertura espacialmente coherente del área urbana y sus alrededores.

Palabras clave: Nubes, Cámaras de todo cielo, Estereoscopia

Cloud-height mapping from all-sky camera network

Abstract: *This study presents a general framework for cloud detection and cloud-height retrieval using a network of 20 all-sky cameras distributed across the city of Valladolid (Spain) and its surrounding areas. All instruments are OMEA-3C-TF all-sky cameras operated and geometrically calibrated within the GOA-SCAN infrastructure of the Group of Atmospheric Optics. The proposed methodology combines image preprocessing, cloud-pixel segmentation, identification of matching cloud pixels, and stereoscopic reconstruction to derive instantaneous cloud-height fields. The system provides continuous observations every five minutes during daytime and every 2 minutes at night, allowing the monitoring of cloud spatial structure and short-term evolution. For each acquisition time, every camera is paired with all other cameras in the network, producing multiple independent cloud-height. These estimates are filtered using geometric constraints, correlation quality metrics, and physical plausibility criteria. The use of multiple camera distances enables sensitivity to different cloud layers and ensures spatially consistent coverage of the urban area and its surroundings.*

Keywords: *Clouds, All-sky Cameras, Stereoscopy*

1. INTRODUCCIÓN

Las nubes desempeñan un papel fundamental en el balance energético de la Tierra al reflejar y absorber la radiación solar y térmica. Su capacidad para regular la energía en el sistema Tierra-atmósfera modula tanto la dinámica atmosférica a gran escala como los procesos regionales. Sin embargo, a pesar de su importancia, las retroalimentaciones entre nubes y atmósfera siguen siendo una de las mayores fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos actuales (Stephens *et al.*, 2005).

Para comprender este impacto radiativo, es esencial determinar la estructura vertical de las nubes, específicamente la altura de la base y del tope (normalmente expresados en inglés Cloud Base Height, CBH y Cloud Top Height, CTH). Estas variables también sirven como restricciones físicas para la clasificación de nubes. Además, el monitoreo espacial preciso de la CBH en tiempo real ha resultado ser muy útil para la predicción en tiempo real del recurso solar, clave en la producción de energías renovables.

Actualmente, existen diversas técnicas de teledetección para medir estas alturas, pero presentan limitaciones importantes. Los ceilómetros y lidars ofrecen alta resolución temporal, pero carecen de resolución espacial al medir solo en el cenit. Por otro lado, los satélites proporcionan cobertura global, pero sus resoluciones temporal y espacial suelen ser insuficientes para aplicaciones regionales o en tiempo real. Además, en muchos casos no pueden estimar la medida de la altura base de las nubes, solo la de la capa más alta.

Una alternativa son las cámaras de todo cielo (all-sky cameras). Estos dispositivos poseen un amplio campo de visión y alta resolución a bajo coste, además de ser más fáciles de manejar, sin partes móviles y pueden trabajar de forma automática. El uso de cámaras para identificar la cubierta nubosa o propiedades como el factor de modificación de la radiación solar por las nubes ya ha sido probado en trabajos previos (González-Fernández *et al.*, 2024). También el empleo de técnicas estereoscópicas utilizando pares de cámaras para triangular la posición de las nubes y obtener su altura (Beekmans *et al.*, 2016).

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar y validar una metodología refinada para generar mapas de altura de nubes que sea automática, reproducible, escalable y computacionalmente eficiente. Con esto se quiere demostrar que una red de cámaras desplegada por todo Valladolid puede superar las limitaciones de otros instrumentos y proporcionar una reconstrucción del campo nuboso.

2. INSTRUMENTACIÓN

2.1. Red PRESENTE

La red de medidas PRESENTE, situada en Valladolid (España), cuenta actualmente con 20 estaciones de medida desplegadas en edificios públicos. Está integrada dentro de la red GOA-SCAN, manejada por el Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa). Todas las cámaras instaladas se calibran geoméricamente utilizando el software ORION

(Antuña-Sánchez *et al.*, 2022), que utiliza las posiciones conocidas de las estrellas. Esto permite conocer con precisión para cada píxel sus coordenadas de cenit y azimut (Román *et al.*, 2025).

2.2. Cámaras de todo cielo

El instrumento empleado de cámara de todo cielo es el modelo OMEA-3C-TF, una versión modificada del modelo OMEA-3C de la casa comercial *Alcor Systems*. Utiliza un sensor CMOS SONY IMX178 RGB con una lente ojo de pez, protegidos por una cúpula de vidrio BK7 en una carcasa resistente a la intemperie. Incorpora un filtro tribanda en lugar de uno infrarrojo. Cada cámara está gestionada por un ordenador externo con el software GOA OMEA-Capture (Román *et al.*, 2025), que automatiza la configuración de captura y el envío de datos. Las imágenes se toman cada 5 minutos de día y cada 2 minutos de noche. El instrumento captura secuencias multi-exposición en formato RAW para generar imágenes de Alto Rango Dinámico (HDR). Los tiempos de exposición se ajustan según el ángulo cenital solar y también diferenciando en el modo nocturno si hay presencia de luna o no (Román *et al.*, 2025).

3. METODOLOGÍA

El proceso comienza con el emparejamiento de todas las imágenes simultáneas de las cámaras de la red PRESENTE para un instante de tiempo dado. Para cada pareja, las imágenes hemisféricas originales se proyectan sobre un plano horizontal común y se rotan para alinear sus filas (imágenes rectificadas). Esto permite realizar una correlación fila a fila entre los pares de imágenes con bajo coste computacional. Se almacenan las matrices de correlación entre los píxeles de una imagen con los de la otra y la posición de los píxeles que mejor correlacionan. Este emparejamiento inicial se realiza solo con cámaras con suficiente solapamiento de su campo de visión para aumentar la eficiencia del algoritmo, evitando cálculos innecesarios.

Una vez establecidas las correspondencias de píxeles, se utiliza la geometría del sistema y los ángulos de azimut y cenit de cada cámara para calcular la altitud mediante relaciones trigonométricas. Para asegurar la precisión, se realiza un análisis de sensibilidad desplazando la posición del píxel; si la diferencia entre alturas resultante supera el kilómetro, la estimación se descarta. Además, se aplican filtros de plausibilidad física que eliminan valores fuera del rango de 0 a 15 km o aquellos provenientes de ángulos azimutales extremos. Finalmente se conserva el valor de la mediana de las alturas de todos los emparejamientos entre imágenes y se revierte la rotación inicial para alinear los datos con el sistema de referencia norte-sur.

Para refinar los resultados, se aplica un filtro de mediana que elimina valores atípicos. Posteriormente se determinan las capas de nubes dominantes mediante un histograma de alturas, reteniendo solo los píxeles con valores de altura pertenecientes a los rangos de alturas más poblados.

Finalmente, las estimaciones de altura se georreferencian y se integran en una rejilla geográfica regular con una resolución de 0.0005° . Para garantizar la

fiabilidad del mapa final, solo se conservan las celdas que reciben información de al menos dos cámaras distintas y contienen cuatro o más puntos de altura. De esta forma se generan mapas de alturas máximas y mínimas junto con otros parámetros estadísticos, proporcionando una caracterización detallada de la estructura vertical y la variabilidad espacial del campo de nubes.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de la red PRESENTE para la reconstrucción tridimensional del campo nuboso. Cada cámara de la red permite obtener una estimación local de la altura de las nubes basada en las múltiples combinaciones con el resto. La Figura 1 ilustra cómo diferentes cámaras capturan el mismo campo nuboso, obteniendo muy buena resolución de la forma de las nubes. Esto demuestra la capacidad de este algoritmo también como segmentador e identificador de nubes en las imágenes. Aunque la red PRESENTE cuenta con 20 estaciones, la disponibilidad operativa puede variar debido a factores externos como paros en el suministro eléctrico o tareas de mantenimiento. En particular, para los resultados mostrados en la Figura 1, se utilizaron 15 cámaras, descartando aquellas que aún no estaban instaladas o que sufrieron cortes técnicos en ese instante.

El uso de diversas distancias entre cámaras permite al algoritmo ser sensible a diferentes capas de nubes simultáneamente. Con pares de cámaras alejados se aprecian las capas más altas y los pares más cercanos permiten más en detalle las nubes más bajas. Como se observa en la Figura 2, el sistema identifica variaciones espaciales en la altura, incluso en situaciones de nubosidad fragmentada.

Para comprobar la solidez de los resultados obtenidos, estos se han comparado con el producto de clasificación de escenas de Sentinel-2 (SCL, resolución de 60 m, Drusch *et al.*, 2012). Dicho producto identifica cuatro clases relacionadas con las nubes (nubes con alta probabilidad, media probabilidad, cirros y cielo despejado) y seis clases para la superficie (sombras, vegetación, suelo desnudo o desierto, agua y nieve).

El método propuesto con las cámaras logra generar mapas regionales de la altura de la base de las nubes con una resolución de aproximadamente 50 m. La comparación punto a punto con el producto de clasificación de Sentinel-2 (Fig. 3) muestra un alto grado de coherencia espacial. El sistema basado en cámaras no solo coincide con la detección satelital (zonas verdes), sino que es capaz de detectar estructuras nubosas que el satélite podría clasificar de forma ambigua debido al bajo contraste de las nubes más finas.

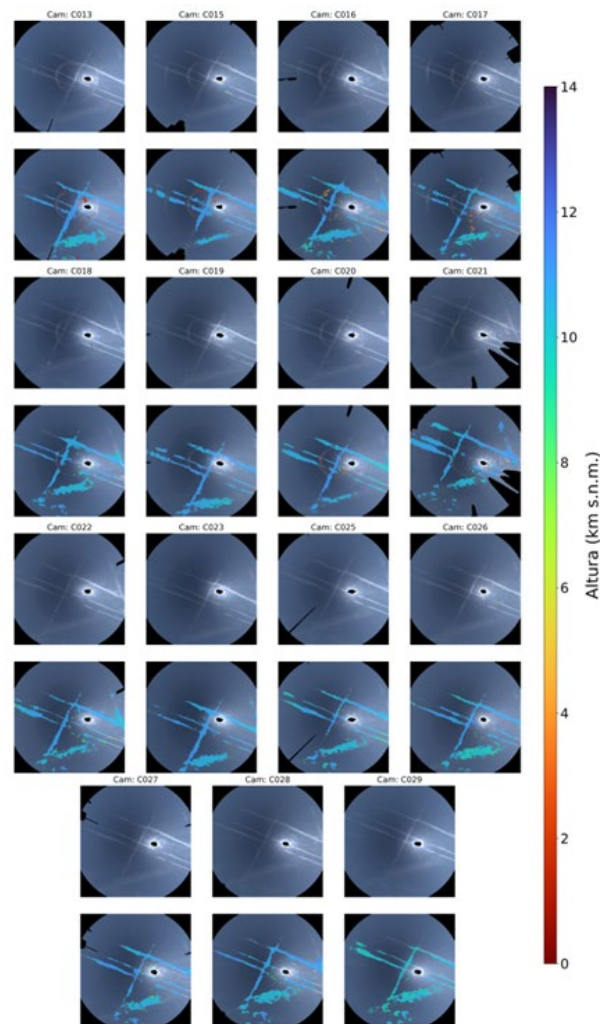


Figura 1. Imagen del cielo sin (arriba) y con (abajo) la altura de las nubes obtenida con todas las cámaras de la red PRESENTE para el 7 de julio de 2025 a las 15:50 UTC.

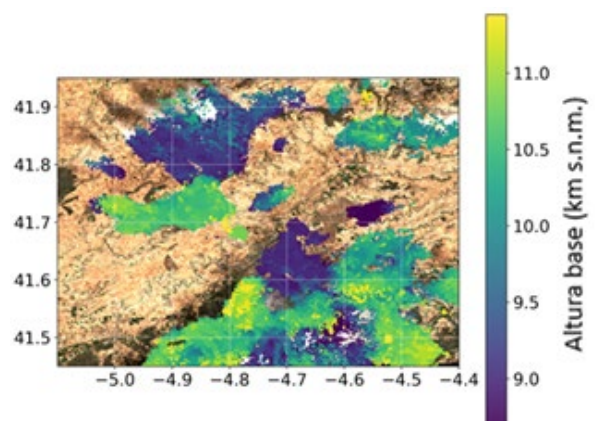


Figura 2. Mapa de nubes obtenido el 30 de agosto de 2025 a las 11:20 UTC sobre Valladolid mediante el método propuesto basado en la red de cámaras PRESENTE. El mapa de colores representa la altura de la base de las nubes. Los ejes representan las coordenadas geográficas en el sistema WGS84. La imagen de fondo corresponde al producto de color real de Sentinel-2.

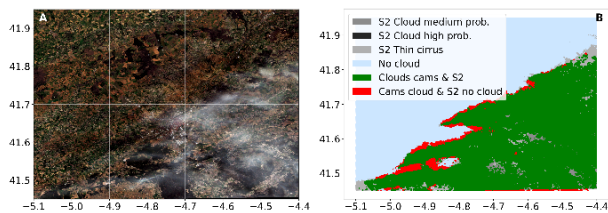


Figura 3. A la derecha la comparación del mapa de nubes obtenido el 24 de febrero de 2025 a las 11:20 UTC sobre Valladolid mediante el método propuesto basado en la red de cámaras y el producto de clasificación de Sentinel-2. A la izquierda la imagen en color real de Sentinel-2 del mismo instante. Los ejes representan las coordenadas geográficas en el sistema WGS84

5. CONCLUSIONES

El método propuesto resuelve la falta de resolución espacial de otros instrumentos de superficie y la baja frecuencia temporal de los satélites. Se ha logrado implementar un flujo de trabajo computacionalmente eficiente que facilita el monitoreo en tiempo real, ofreciendo mapas de altura de nubes con una frecuencia de hasta 2 minutos. La aplicación de restricciones geométricas y filtros estadísticos garantiza la calidad de los mapas generados. La capacidad de obtener la estructura vertical y espacial de las nubes de forma continua representa una herramienta de alto valor tanto para la mejora de modelos climáticos regionales, como para la validación/calibración de productos satelitales.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), bajo la subvención n.º PID2024-157697OB-I00. Esta investigación forma parte del proyecto TED2021-131211B-I00375, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR, y se basa en el trabajo de la Acción COST CA21119 HARMONIA.

Se agradece de igual modo el apoyo financiero de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y de los Fondos FEDER (Referencia: CLU-2023-1-05). Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto EUBURN-RISK (INTERREG-SUDOE; S2/2.4/F0327). Los autores agradecen el respaldo del Ministerio de Ciencia e Innovación de España a ACTRIS ERIC y a las Acciones de Intercambio de Personal Marie Skłodowska-Curie mediante el proyecto GRASP-SYNERGY (subvención n.º 101131631).

7. REFERENCIAS

- Antuña-Sánchez, JC, Román, R, Bosch, JL, Toledano, C, Mateos, D., González, R., Cachorro, V., de Frutos, A. (2022). ORION software tool for the geometrical calibration of all-sky cameras. *PLOS ONE*, 17(3), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265959>
- Beekmans, C., Schneider, J., Läbe, T., Lennefer, M., Stachniss, C. and Simmer, C. (2016). Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye

cameras. *Atmospheric Chemistry and Physics*, (16). doi:10.5194/acp-16-14231-2016, 2016.

- Drusch, M., Del Bello, U., Carrier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., and Bargellini, P. (2012) Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment*, (120), <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

Opportunities for Science, 2012.

- González-Fernández, D., Román, R., Mateos, D., Herrero del Barrio, C., Cachorro, V. E., Copes, G., Sánchez, R., García, R. D., Doppler, L., Herrero-Anta, S., Antuña-Sánchez, J. C., Barreto, J., González, R., Gatón, J., Calle, A., Toledano, C., and de Frutos, (2024) Retrieval of Solar Shortwave Irradiance from All-Sky Camera Images, *Remote Sensing*, (16), <https://doi.org/10.3390/rs16203821>, 2024.

- Román, R., González-Fernández, D., Antuña Sánchez, J. C., Herrero del Barrio, C., Herrero-Anta, S., Barreto, A., Cachorro, V. E., Doppler, L., González, R., Ritter, C., Mateos, D., Kouremeti, N., Copes, G., Calle, A., Granados-Muñoz, M. J., Toledano, C., and de Frutos, A. M. (2025) Star photometry with all-sky cameras to retrieve aerosol optical depth at night-time, *Atmospheric Measurement Techniques*, (18) <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-667>, 2025.

- Stephens, G. L. (2005), Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review, *Journal of Climate*, (18), <https://doi.org/10.1175/JCLI-3243.1>, 2005.