



# Uso de tecnología lidar en la detección de tejados energéticamente eficientes en áreas urbanas



## USE OF LIDAR TECHNOLOGY FOR DETECTING ENERGY EFFICIENT ROOFS IN URBAN AREAS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7691> | Recibido: 12/06/2015 • Aceptado: 22/09/2015

Jacinto Santamaría-Peña<sup>1</sup>, Felix Sanz-Adán<sup>2</sup>, Alberto Martínez-Rubio<sup>3</sup>, Manuel Ángel Valbuena-Rabadán<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, University of La Rioja. [jacinto.santamaria@unirioja.es](mailto:jacinto.santamaria@unirioja.es)

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of La Rioja

<sup>3</sup> ARESOL-Renewable Energies Group, Engineering Department

<sup>4</sup> Department of Education - Basque Government, I.E.S. Murguía

### ABSTRACT

• There are many roofs in urban areas that are so different in terms of sunlight incidence. Slope and orientation are decisive factors in solar energy technologies, and they can be optimized by installing solar modules fixed to those roofs that are well oriented.

In Spain, locating the most efficient roofs can be automatically carried out with LIDAR techniques using data provided by the Project PNOA 2008-2012. The flight covers almost all the national territory and has an average density of 0.5 points/m<sup>2</sup>.

This article aims to describe a quick and accurate methodology to identify which roofs in urban areas have suitable orientation and tilt values. A density of 0.5 points/m<sup>2</sup> could be firstly considered small, but applying very simple post-processing it is enough for the aim of this work. It is used a Digital Elevation Modelling software representing a good solution for discriminating the roof sheets of an urban area that have greater irradiance incidence.

The detection of these roofs can be a good tool for promoting implementation of solar panels with minimal investment and maximum efficiency.

• **Keywords:** urban lidar, building roofs, energy efficiency, solar energy.

### RESUMEN

En áreas urbanas, existen muchos tejados que son muy diferentes en términos de incidencia de los rayos solares. Su pendiente y orientación son factores decisivos en las tecnologías relacionadas con la energía solar y ellos pueden ser optimizados instalando paneles solares fijados a los tejados que estén bien orientados.

En España, la localización de los tejados más eficientes puede realizarse automáticamente por medio de la tecnología LIDAR, usando los datos suministrados por el Plan PNOA 2008-2012. Los vuelos cubren la práctica totalidad del territorio nacional y tienen una densidad media de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>.

Este artículo pretende describir una metodología rápida y precisa para identificar los tejados en áreas urbanas que tienen valores de pendiente y orientación adecuados. La densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup> puede parecer pequeña, pero aplicando un post-proceso muy simple, es suficiente para los objetivos de este trabajo. Se utiliza software de modelización digital de elevaciones, siendo una buena solución para discriminar los faldones de áreas urbanas que tienen mayor incidencia de radiación.

La detección de estos tejados puede ser una buena herramienta para promocionar el uso de paneles solares con mínima inversión y máxima eficiencia.

**Palabras clave:** LIDAR urbano, Tejados en edificios, Eficiencia energética, Energía solar.

### 1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía en España viene creciendo desde los años 70 hasta la actualidad [1]. España ocupa el segundo lugar mundial (después de Alemania) en potencia instalada. La posición relativa de los paneles fotovoltaicos puede provocar cantidades variables de sombreado entre ellos, lo que puede reducir la energía total producida por el conjunto de paneles fotovoltaicos en fechas y horas determinadas, además de los problemas en cada uno de los propios paneles [2].

Por ello, la detección de tejados con mayor eficiencia energética en áreas urbanas puede ser muy interesante para planificar inversiones orientadas a la utilización de la tecnología solar fotovoltaica. Para aumentar la producción de energía, la radiación solar que impacta en los tejados necesita ser maximizada [3]. Para alcanzar este propósito, los principales parámetros a ser considerados en los tejados son la pendiente

y la orientación. Seleccionar faldones individuales bien orientados y con buena inclinación es un proceso que puede ser muy lento y con dificultades, si sólo se utilizan herramientas tradicionales.

La irrupción y generalización de los vuelos LIDAR proporcionan un barrido de puntos 3D de todo el territorio que geoposiciona todos los elementos que existen sobre el suelo. En España, el Plan PNOA para la obtención de ortofotografía digital incluye también la obtención de puntos LIDAR con una densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup> y cubre la práctica totalidad del territorio nacional. La clasificación de estos puntos permite discriminar básicamente entre puntos suelo, puntos vegetación y puntos edificación. Estos últimos son los que conforman las cubiertas de los edificios, que quedan definidas por nubes de puntos 3D y que son los que nos interesa analizar.

El análisis de los puntos que definen las cubiertas puede hacerse básicamente mediante dos técnicas: rasterización o modelización tridimensional vectorial. La primera ofrece unos resultados menos precisos, pero consume menos recursos; la segunda, es más fiel a la realidad, pero exige mayor potencia de cálculo.

Hay valiosos estudios que analizan la radiación sobre los tejados por medio de tecnología LIDAR:

- Lukac [4,5]. El potencial solar de un tejado se determina a través de un método que combina la topografía urbana obtenida de los datos LIDAR con las medidas piranométricas de la radiación solar difusa y global. Ellos también tienen en cuenta el sombreado producido por la vegetación.
- Jakubiec [6]. Su método emplea modelos celestes detallados basados en medidas de datos climáticos. Tiene en consideración las reflexiones procedentes del entorno urbano e incluye un modelo horario de temperatura en tejados para predecir la radiación urbana y transformar esta radiación en rendimiento energético fotovoltaico.
- Brito [7] desarrolla un procedimiento para estimar el potencial fotovoltaico de una zona urbana usando datos LIDAR con la extensión Análisis Solar de ArcGIS.
- Martínez-Rubio [8] propone un método para determinar, con gran precisión, la orientación más adecuada para localizar los sistemas fotovoltaicos que optimicen el uso de la irradiación solar disponible. El método puede ser extrapolado a todos los tipos de tejados en edificios, así como a todas las ángulos de orientación y pendiente.

Este trabajo pretende aplicar el método de análisis de modelado tridimensional a un área urbana en la que coexisten principalmente tejados inclinados, pero también cubiertas pla-

nas. Nuestro principal objetivo es automatizar la detección y evaluación de superficies y áreas que estén bien posicionadas y tengan una buena inclinación, para maximizar el rendimiento fotovoltaico instalando módulos sobre ellas. Todo esto debería realizarse en el marco de la (BIPV) integración fotovoltaica en edificios, para alcanzar soluciones técnicas, económicas y estéticas óptimas [3].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El *Centro Nacional de Información Geográfica en España*, proporciona gratuitamente los datos en formato LIZ (formato comprimido de ficheros LAS). El formato de fichero LAS fue creado por la ASPRS (*Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos*). Esta información será usada en esta publicación como nube de puntos 3D de entrada.

### DATOS LIDAR

Los ficheros LAS son ficheros digitales con información altimétrica de la nube de puntos LiDAR, distribuidos en hojas de 2x2 km de extensión. Los puntos han sido capturados mediante vuelos con sensor LiDAR con una densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup> y posteriormente clasificados de manera automática y se les ha asignado un color RGB obtenido a partir de ortofotos del *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)*. El sistema geodésico de referencia es el oficial en España, ETRS89. [Sistema de proyección UTM, Zona 30N y alturas ortométricas]

En la Fig. 1, puede observarse la clasificación de los puntos LIDAR que definen el suelo en color rosa y los puntos que definen las cubiertas en color rojo.

En la fig. 2 se presentan los puntos de cubierta con la asignación de color RGB asociada a partir del color del pixel de la ortofotografía digital de la imagen obtenida en el vuelo. En dicha imagen se identifican plenamente las cubiertas de los tejados e incluso se visualizan los faldones y se intuyen los posibles materiales.

A efectos prácticos, lo único que nos interesa es la posición X,Y,Z de cada uno de los puntos de cubierta. Pero el color puede ser un elemento a tener en cuenta si se quiere clasificar las cubiertas en función de sus materiales o si se quiere discriminar algunas zonas que aparecen como cubierta y no lo son.

Igualmente nos puede interesar filtrar algunos puntos por su altura para discriminar zonas de terrazas o pórticos, de menor interés para los objetivos que nos proponemos. Nos interesan faldones altos, con buena insolación y con escasa posibilidades de recibir sombreado procedente de los edificios colindantes.

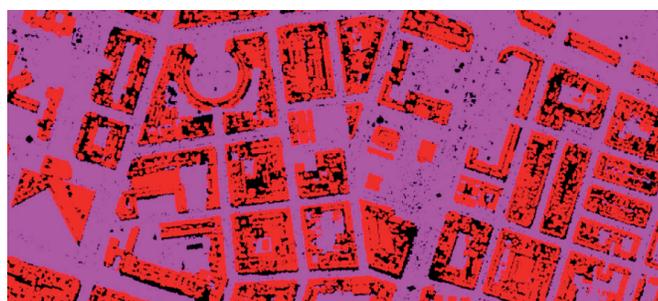


Fig. 1: Puntos-edificios (rojo) sobre Puntos-Terreno (rosa)



Fig. 2: Puntos-edificios con color RGB

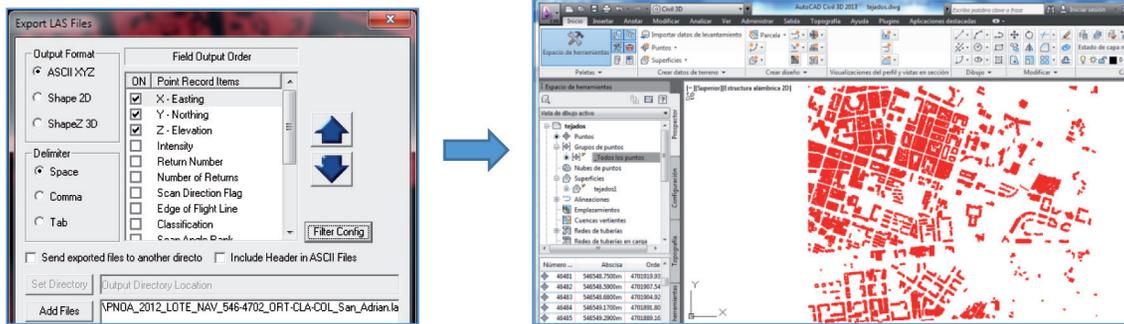


Fig. 3: Exportación de nube de puntos LIDAR a fichero ASCII e importación en AUTOCAD® CIVIL 3D

El fichero LAS original contiene 2.650.748 puntos, lo que representa una densidad media de 0,66 puntos/m<sup>2</sup>. De ellos, 309.244 puntos (~12 %) han sido clasificados como puntos-edificio y dichos puntos han sido exportados a un fichero ASCII para su posterior modelización utilizando *AUTOCAD® CIVIL 3D* (Fig. 3).

**MÉTODO**

La nube original de puntos LIDAR de las cubiertas, se carga como un grupo de puntos en *AUTOCAD CIVIL 3D*. Los puntos están generalmente agrupados en manzanas más o menos complejas y nuestro objetivo primario es localizar de manera automática los contornos de dichas manzanas, que se corresponderán con los contornos de tejados.

El primer paso será generar una superficie que contenga la totalidad de los puntos y aplicaremos sobre ella una triangulación (*triangulación de Delaunay*) formándose una red irregular de triángulos (596.361 en nuestro estudio). Previamente deberemos limitar la longitud máxima de los lados de los triángulos, de forma que no se unan puntos de una manzana con puntos de manzanas colindantes. En nuestro caso, ha dado buen resultado limitar dicha longitud a 5 m. Esto supone considerar que zonas espaciales libres de puntos-cubierta de unos 5 metros de amplitud no formarán parte del modelo digital generado. Visualizando los contornos de los recintos generados en esta triangulación estaremos definiendo los perímetros exteriores de los tejados de la zona estudiada y los perímetros de los patios interiores. La superficie tridimensional de tejados detectada en nuestra zona de estudio es de 946.450 m<sup>2</sup> y su superficie en planta es de 664.655 m<sup>2</sup>.

Como puede observarse en la Fig. 4, no sólo son definidos los contornos de los edificios, sino también los contornos de

patios interiores. La superficie generada abarca completamente lo que podemos denominar cubierta en sentido estricto, o sea, faldones inclinados o cubiertas planas [10].

La conversión de las cubiertas en un Modelo Digital permite visualizarlas de muy diversas formas [11] y posibilita la identificación a simple vista de faldones bien conformados para los objetivos de este estudio. Así podemos observar directamente los triángulos que componen el modelo; también podemos visualizar el modelo mediante curvas de nivel con mínima equidistancia (ver Fig. 5 - Fig. 8).

En segundo lugar, es necesario diferenciar las zonas de tejados que presentan una buena orientación e inclinación. La pendiente y orientación óptimas dependen de la latitud. La zona estudiada se localiza en latitudes medias del Hemisferio Norte [Latitud: 42°.46 ; Longitud: -2°.43]. Nosotros buscaremos faldones con rangos de inclinación apropiados para estas latitudes (entre 25% y 125%). En lo referente a la orientación, nosotros buscaremos faldones orientados en un rango de 30° a cada lado de la dirección Sur (ver Fig. 9). La orientación y pendiente óptimas serían diferentes en otros países, pero el método para su localización sería el mismo.

El análisis se hizo en dos fases, usando la información proporcionada por la triangulación del modelo de tejados.

- a) En una primera fase, clasificamos el modelo en función de la orientación, y lo hemos dividido en tres clases (ver Tab. 1):

- 1 (rojo): zonas orientadas entre el Norte y 30° SE, es decir, zonas de cubierta que miran al Este-Noreste. Son zonas de poca eficiencia energética, con pocas horas de sol y muy afectadas por sombreados.

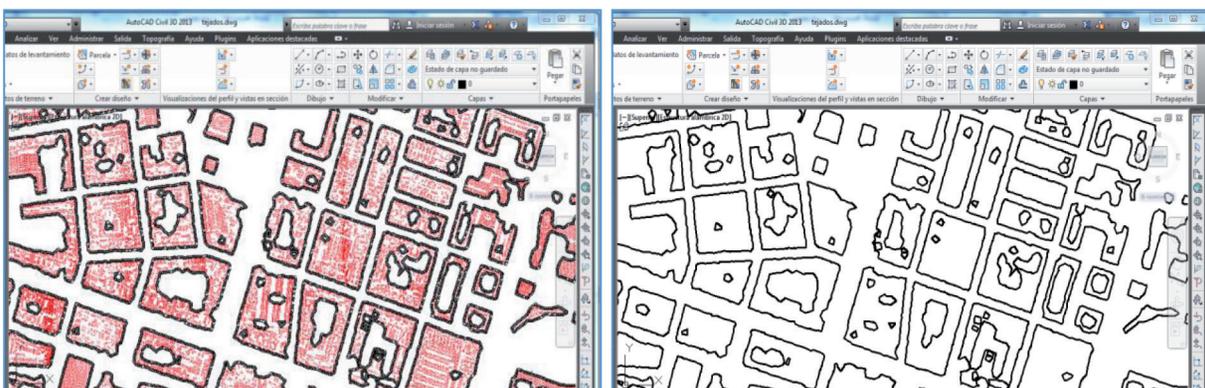


Fig. 4: Triangulación del modelo y definición de contornos de los tejados

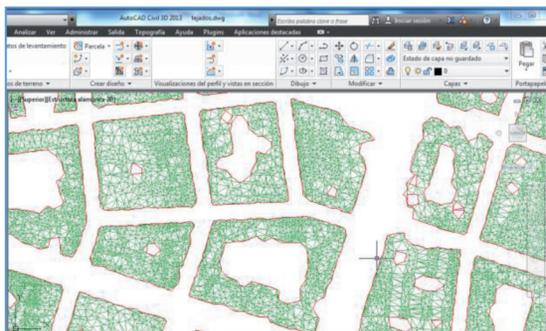


Fig. 5: Modelo de tejados representado por triangulación

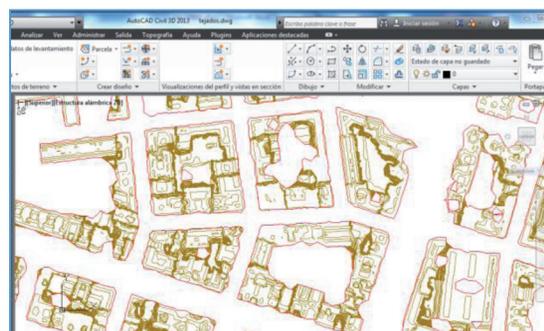


Fig. 6: Modelo de tejados representado por curvas de nivel

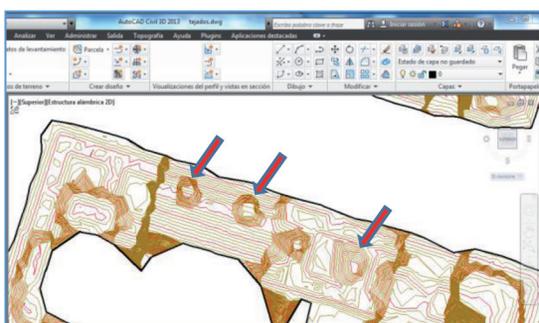


Fig. 7: Tejados afectados por chimeneas y patios

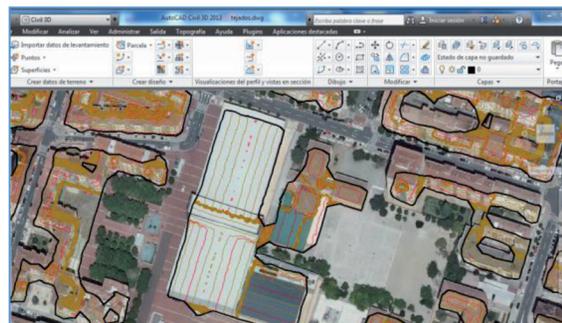


Fig. 8: Tejados con poca pendiente

- 2 (verde): zonas orientadas entre los 30° SE y los 30°SW. Estas son las más interesantes para nuestro estudio, ya que tienen una alta eficiencia energética por su elevada exposición al sol. Son las zonas de cubierta orientadas al Sur.
- 3 (azul): zonas orientadas entre los 30° SW y el Norte, es decir, zonas de cubierta que miran al Oeste-Noroeste. Son también zonas de poca eficiencia energética, con pocas horas de sol y muy afectadas por sombreados.

El resultado es un plano de cubiertas de toda la zona estudiada, en el que se diferencian los faldones en función de su orientación. Y podemos identificar claramente sobre él,

DIRECTIONS TABLE				
Number	Minimum Direction	Maximum Direction	Color	Area 2D
1	NO° 00'00''E	S30° 00'00''E	Red	280225
2	S30° 00'00''E	S30° 00'00''W	Green	130006
3	S30° 00'00''W	NO° 00'00''E	Blue	254425

Tabla 1: Clases de orientación

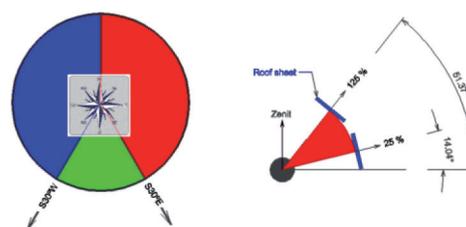


Fig. 9: Rangos de orientación y pendiente

aquellos faldones de gran superficie que presentan una buena orientación y con posibilidades de tener una alta eficiencia energética (ver Fig. 10).

- b) En una segunda fase, debemos discriminar aquellas zonas del modelo que presentan una adecuada pendiente. Como el modelo está definido por múltiples triángulos y de cada uno de ellos podemos obtener su pendiente, vamos a utilizar este parámetro para seleccionar los planos cuya pendiente esté entre el 25 % y el 125 %, que corresponden a planos de inclinación aproximada

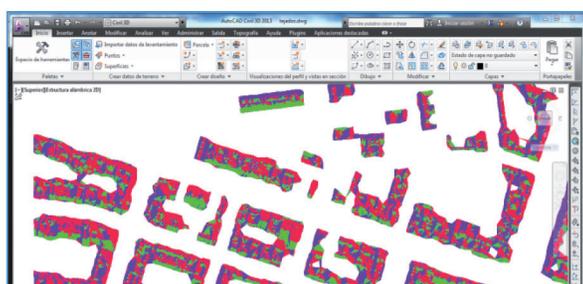
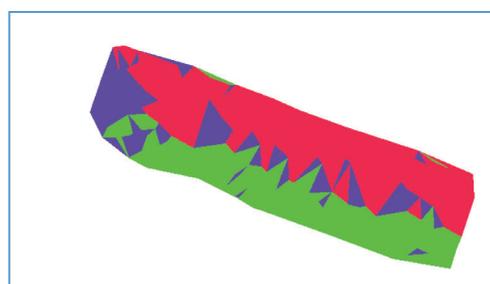


Fig. 10: Tipos de tejados según orientación. Detalle de la clasificación de triángulos



de 15° a 50°. El resultado lo visualizamos como triángulos clasificados en dos categorías (ver Tabla 2 y Figura 11):

SLOPES TABLE				
Clase	Minimum Slope	Maximum Slope	Color	Area (2D)
1	0 %	25 %		325273 m <sup>2</sup>
2	25 %	125 %		266649 m <sup>2</sup>
3	125 %	10000 %		72733 m <sup>2</sup>

Tabla 2: Clases de pendiente

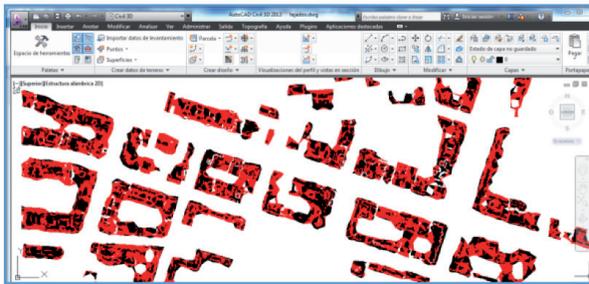


Fig. 11: Clasificación del modelo según pendientes

- 1 (negro): zonas de cubierta con inclinación desde 0% hasta 25 %. Es decir, incluye cubiertas planas y cubiertas de muy baja inclinación, y por tanto poco adecuadas por su mala disposición y eficiencia energética.
- 2 (rojo): zonas con pendiente del 25 % al 125 %, que son las más interesantes en nuestro estudio, por tener una inclinación adecuada y mayor eficiencia energética.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 RESULTADOS

La combinación de ambos tipos de análisis (por orientaciones y por pendientes), permite localizar en el modelo de cubiertas original de toda la zona en estudio (4 Km<sup>2</sup>), aquellas superficies que presentan una buena disposición y eficiencia energética, tanto por su adecuada orientación como por su apropiada inclinación. El resultado muestra zonas rojas (bien orientadas), cubiertas por triángulos verdes (con buena pendiente), que son los faldones que tienen mejor eficiencia energética y sobre los que podría ser interesante la implantación directa de paneles solares (ver Fig. 12).

La cuantificación de los faldones en el área estudiada es la que se refleja en tabla 3 y tabla 4:

TABLA DE ORIENTACIONES				
Clase	Orientación mínima	Orientación máxima	Color	Area (2D)
2	S30°00'00"E	S30°00'00"W		130,006 m <sup>2</sup>

Tabla 3: Superficie total de tejados con buena orientación

TABLA DE PENDIENTES				
Clase	Pendiente mínima	Pendiente máxima	Color	Area (2D)
2	25 %	125 %		266,649 m <sup>2</sup>

Tabla 4: Superficie total de tejados con buena pendiente

La disposición de los paneles solares con la misma inclinación que el de cubierta, permite una mayor integración arquitectónica (sin modificar la volumetría del edificio), un menor coste de implantación (estructura superpuesta a la cu-



Fig. 12: Resultado de la clasificación combinada por orientaciones y pendientes (diferentes escalas)

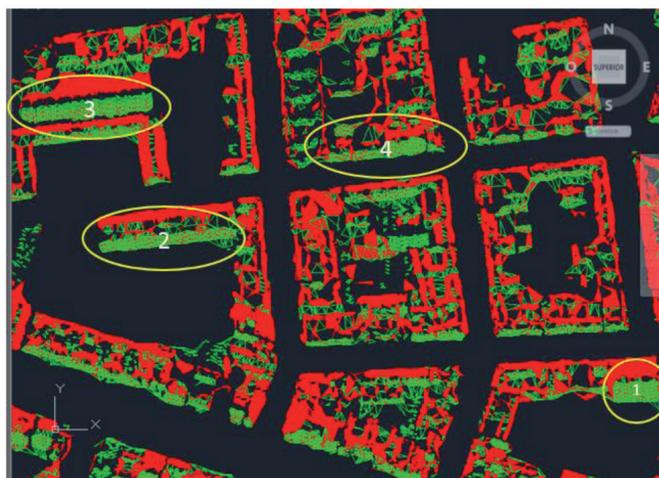


Fig. 13: Identificación de faldones útiles

bierta), un mayor aislamiento energético (nueva envolvente) y un mayor aprovechamiento de la superficie (no hay que dejar separación entre filas de paneles al no producirse sombreado mutuo entre paneles).

### 3.1 DISCUSIÓN

En el desarrollo de este estudio se han detectado básicamente tres problemas:

- En primer lugar, la nube de puntos LIDAR con resolución 0,5 puntos/m<sup>2</sup>, aun siendo una densidad baja, requiere en su transformación a *Modelo Digital de Elevaciones* (MDE) de una alta capacidad de cálculo. Su conversión en superficie mediante una red irregular de triángulos sobre los que ejecutar análisis de orientaciones y pendientes, dificulta el proceso y requiere de potentes equipos que ejecuten los algoritmos de cálculo necesarios. La ventaja es que utilizan la posición de los puntos inalterada, tal como fueron tomados por el escáner.
- En la localización de los faldones más eficientes energéticamente, hemos encontrado un importante inconveniente en dos elementos constructivos típicos de los tejados urbanos, y cuyo efecto es una distorsión en el modelo digital generado (ver Fig. 7), como son:
  - las chimeneas y antenas. Los puntos LIDAR que rebotan sobre estos elementos, distorsionan el modelo y pueden convertir un faldón inicialmente muy apto en un elemento segmentado y poco adecuado. Además existe un efecto real de sombreado de chimeneas y antenas sobre el faldón que reducen su potencial energético. Para evitar este efecto, estamos estudiando la implementación de un algoritmo de filtrado previo de aquellos puntos cuya altura exceda de un determinado valor respecto de la media de los puntos cercanos.
  - los pequeños patios interiores. Las pequeñas zonas de patio en los tejados, o bien no son detectadas (por ser de dimensiones inferiores a la longitud máxima de los triángulos del modelo) y el modelo las considera como cubierta o bien los pulsos LIDAR las atraviesan y rebotan en las fachadas interiores, obtenien-

Identificación de faldones sobre el modelo (ver Fig. 13):

- 1.- Tejado de 250 m<sup>2</sup> (10m x 25m).
- 2.- Tejado de 450 m<sup>2</sup> (75m x 6m).
- 3.- Tejado de 600 m<sup>2</sup> (75m x 8m).
- 4.- Tres faldones de:
  - a) 150 m<sup>2</sup> (30m x 5m)
  - b) 90 m<sup>2</sup> (15m x 6m)
  - c) 200 m<sup>2</sup> (20m x 10m)

do puntos de menor altura ortométrica. Los modelos de cubierta pueden verse así deformados.

- La definición geométrica de los contornos de los edificios presenta ciertas irregularidades, ya que el perímetro de las distintas superficies encontradas se adapta a los lados reales de los triángulos extremos de la triangulación y su forma se ve muy afectada por el valor adoptado para la longitud máxima de los lados de dicha triangulación. Para reducir estas irregularidades, estamos estudiando la aplicación de un algoritmo de generalización de contornos para adaptarlos a la realidad, ya que estos contornos pueden ser luego utilizados para otros trabajos como la reconstrucción tridimensional de los edificios [12,13].

## 4. CONCLUSIONES

En un entorno urbano, la exposición al sol de los tejados es muy diferente, siendo condicionada básicamente por su orientación y por su pendiente. Por ello, la eficiencia energética de los paneles solares directamente implantados sobre tejados es muy variable.

La modelización de cubiertas con programas típicos de la modelización de terrenos, es una herramienta útil para la detección rápida y precisa de aleros con una orientación y una pendiente óptimas. Partiendo de la nube de puntos LIDAR original, en unos pocos pasos, se consigue localizar y cuantificar dichos aleros.

En la zona urbana estudiada (4 Km<sup>2</sup>), en la que un 15% de superficie está cubierta por tejados, nosotros hemos encontrado que el 20% de ellos muestran una buena orientación y un 40% buena pendiente. La combinación de ambos factores ha permitido localizar con precisión los tejados más eficientes, en una superficie total de 45.254 m<sup>2</sup>. Ellos representan cerca del 7% del área total de tejados de la zona estudiada.

La metodología propuesta para la detección de faldones de cubiertas eficientes energéticamente, es de aplicación directa para:

- Integrar mejor la tecnología fotovoltaica en los edificios (*Building Integrates Photovoltaic* - BIPV). [3]

- Conocer el recurso solar fotovoltaico de la zona estudiada y las propiedades destacadas de eficiencia energética de un edificio (eficiencia energética activa). [3, 14]
- Estimar la producción anual de las partes de cubierta rentables de cada edificio. [15]

En último término, conocer con exactitud la ubicación de dichas cubiertas permite a la Administración una buena planificación y apoyo de actuaciones, focalizando las inversiones.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por INGEGRAF (Asociación de Profesores de Ingeniería Gráfica) en España. También, nos gustaría agradecer la disposición de materiales originales (datos LIDAR) facilitados por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Gobierno español.

### LISTA DE ABREVIATURAS

LIDAR	(Light Detection and Ranging): tecnología sensora remota que mide distancias iluminando un objeto con un laser y anlizando la luz reflejada.
PNOA	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea en España.
PV	Fotovoltaica: método de conversión de energía solar en electricidad de corriente continua.
BIPV	(Building-integrated photovoltaics) Tecnología Fotovoltaica integrada en los edificios.
ETRS89	(European Terrestrial Reference System 1989). Sistema de Referencia Terrestre Europeo de 1989.
DEM	(Digital Elevation Model) Modelo digital de elevaciones
CNIG	Centro Nacional de Información Geográfica.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Montoya, F. G., Aguilera, M. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Renewable energy production in Spain: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 509-531.
- [2] Castellano, N. N., Parra, J. A. G., Valls-Guirado, J., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). Optimal displacement of photovoltaic array's rows using a novel shading model. *Applied Energy*, 144, 1-9.
- [3] Mulcué-Nieto, L. F., & Mora-López, L. (2015). Methodology to establish the permitted maximum losses due to shading and orientation in photovoltaic applications in buildings. *Applied Energy*, 137, 37-45.
- [4] Lukač, N., Žlaus, D., Seme, S., Žalik, B., & Štumberger, G. (2013). Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data. *Applied Energy*, 102, 803-812.
- [5] Lukač, N., & Žalik, B. (2013). GPU-based roofs' solar potential estimation using LiDAR data. *Computers & Geosciences*, 52, 34-41.
- [6] Jakubiec, J. A., & Reinhart, C. F. (2013). A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. *Solar Energy*, 93, 127-143.
- [7] Brito, M. C., Gomes, N., Santos, T., & Tenedório, J. A. (2012). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86(1), 283-288.
- [8] Martínez-Rubio, A., Sanz-Adán, F., & Santamaría, J. (2015). Optimal design of photovoltaic energy collectors with mutual shading for pre-existing building roofs. *Renewable Energy*, 78, 666-678.
- [9] Awrangjeb, M., Zhang, C., & Fraser, C. S. (2013). Automatic extraction of building roofs using LIDAR data and multispectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 1-18.
- [10] Gooding, J., Crook, R., & Tomlin, A. S. (2015). Modelling of roof geometries from low-resolution LiDAR data for city-scale solar energy applications using a neighbouring buildings method. *Applied Energy*, 148, 93-104.
- [11] Dal Poz, A. P., & Fazan, A. J. (2014, October). Three-dimensional building roof boundary extraction using high-resolution aerial image and LiDAR data. In *SPIE Remote Sensing* (pp. 92440A-92440A). International Society for Optics and Photonics.
- [12] Henn, A., Gröger, G., Stroh, V., & Plümer, L. (2013). Model driven reconstruction of roofs from sparse LIDAR point clouds. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 76, 17-29.
- [13] Cheng, L., Tong, L., Chen, Y., Zhang, W., Shan, J., Liu, Y., & Li, M. (2013). Integration of LiDAR data and optical multi-view images for 3D reconstruction of building roofs. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(4), 493-502.
- [14] Redweik, P., Catita, C., & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97, 332-341.
- [15] Mulcué-Nieto, L. F., & Mora-López, L. (2014). A new model to predict the energy generated by a photovoltaic system connected to the grid in low latitude countries. *Solar Energy*, 107, 423-442.