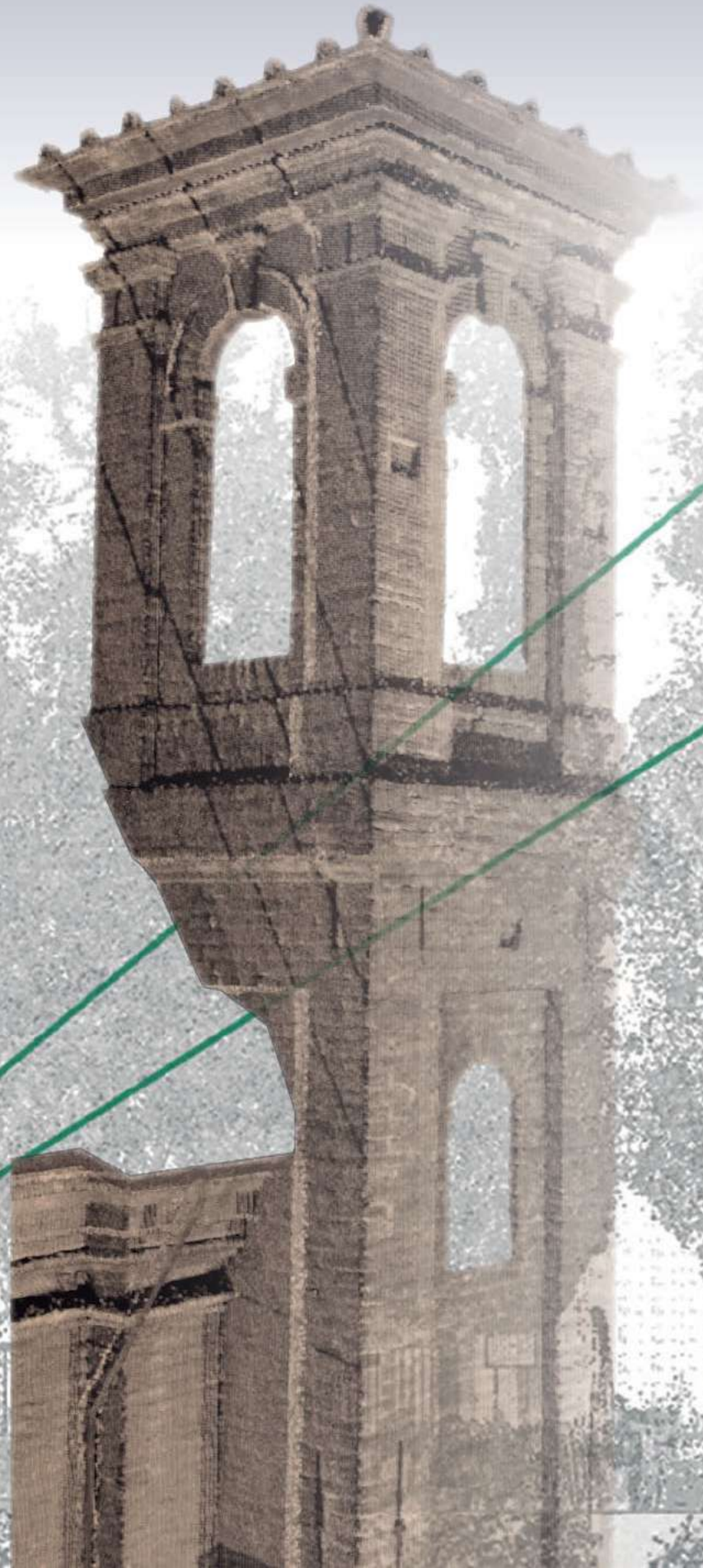


LIMITACIONES EN EL LEVANTAMIENTO DIGITAL DE BIENES PATRIMONIALES CON TIPOLOGÍA DE TORRE

LIMITATIONS IN THE DIGITAL SURVEY OF HERITAGE ASSETS WITH TOWER TYPOLOGY

*Susana Molina Sánchez,
Francisco Juan Vidal,
Luca Cipriani,
José Luis Denia Ríos*

doi: 10.4995/ega.2021.14749





Las técnicas de levantamiento digital terrestres como la fotogrametría (SfM) y el láser escáner 3D (TLS) poseen ciertas limitaciones en función de las herramientas utilizadas y de la geometría, condiciones de iluminación y distancia del elemento con el que se trabaja. Por ello, el objetivo de este estudio es describir un método para el correcto levantamiento digital de elementos altos (con tipología de torre) cuando se trabaja con dichas restricciones, así como verificar la pertinencia de su utilidad. Dicha

En ocasiones, las técnicas de levantamiento terrestre mediante fotogrametría (SfM) y láser escáner (TLS) presentan ciertas limitaciones relacionadas principalmente con la funcionalidad de las herramientas utilizadas en la adquisición y procesamiento de los datos. En concreto, cuando dichas técnicas se aplican a elementos altos (con tipología de torre) existe esa problemática, en la que el nivel de detalle, tamaño y tipo de geometría y/o emplazamiento del bien plantean dificultades en su levantamiento digital. Además, cabe señalar que un mismo objeto tomado a diferentes distancias ofrece una densidad de datos variable en función de la altura, por lo que un primer problema es la falta de homogeneidad de los datos adquiridos, que se refleja en la necesidad de modelar dicho objeto teniendo en cuenta esto (y, en algunos casos, la dificultad añadida de los planos en escorzo).

Hasta ahora para este tipo de elementos que requieren una toma de datos a mayores distancias o cuya

metodología se aplica a dos torres campanario situadas en Ravenna (Italia) permitiendo realizar una serie de ensayos y razonamientos sobre la precisión geométrica y la calidad de la textura obtenida en los modelos finales.

PALABRAS CLAVE: FOTOGRAMETRÍA, LÁSER ESCÁNER, TORRE, LIMITACIONES

Digital terrestrial survey techniques such as photogrammetry (SfM) and 3D laser scanning have certain limitations. These depend on the tools used, geometry, lighting

accesibilidad está más limitada, se han realizado estudios diversos con metodologías integradas: UAVs (fotogrametría aérea) con TLS 7, 8, 9, teleobjetivos con fotogrametría esférica o imágenes panorámicas 2, 5, ... Por este motivo, el objetivo de este estudio es el análisis de los condicionantes en el levantamiento digital de elementos altos (con tipología de torre) mediante fotogrametría y 3D laser escáner terrestres, en exteriores. Asimismo, se pretende dar salida a las limitaciones derivadas de las herramientas utilizadas para la toma de datos y post producción cuando se trabaja con dichas restricciones.

Por último, hay que añadir la imposibilidad de utilizar un dron, puesto que se trabaja en el centro histórico de la ciudad.

Análisis de las experiencias

Se trata de ensayos fundamentales en el desarrollo de la investigación por constituir la base metodológica aplicable a las torres mudéja-

conditions and distance from the element which is being surveyed. Therefore, the aim of this study is to describe a method for the correct digital survey of high elements (with tower typology) when working with such restrictions, as well as to verify the relevance of its usefulness. This methodology is applied to two bell towers located in Ravenna (Italy) allowing a series of tests and reasoning on geometric accuracy and quality of the texture obtained in final models.

KEYWORDS: PHOTOGRAMMETRY, LASER SCANNER, BELL TOWER, LIMITATIONS

Occasionally, terrestrial survey techniques such as photogrammetry (SfM) and laser scanning (TLS) have certain limitations, mainly related to functionality of the tools used for data acquisition and processing. In particular, there are some problems when these techniques are applied to high elements (with tower typology), in which level of detail, size and type of geometry and/or location of the asset present some difficulties in their digital survey. In addition, it should be noted that the same object surveyed at different distances offers a variable density of data depending on the height. Therefore, a first problem is the lack of homogeneity of data acquired, which is reflected in the need to model the asset considering this (and, in some cases, the added difficulty of foreshortened planes).

So far, several studies have been carried out with integrated methodologies for this type of elements that require data acquisition at greater distances or whose accessibility is more limited. Examples include combination of UAVs (aerial photogrammetry) with TLS 7, 8, 9, telephoto lenses with spherical photogrammetry or panoramic images 2, 5 ... For this reason, the aim of this study is to analyse the constraints on digital survey of high elements (with tower typology), using photogrammetry and 3D terrestrial laser scanner, outdoors. It also aims to provide a



solution to limitations derived from the tools used for data acquisition and post-production when working with these restrictions. Finally, as on-site work is carried out in the historic city centre, use of a drone (UAV) is not permitted.

Analysis of experiments

These are fundamental tests in the development of this research, as they constitute the methodological basis applicable to Mudejar towers in Aragon, which are object of study. Knowing a priori limitations of these elements, the aim is to develop an efficient digital survey methodology in all its phases (data acquisition, post-production and results). All that allows us to obtain an accurate historical-constructive reading of hyper-realistic models textured in high definition. This is demonstrated by means of digital surveys of two bell towers in Ravenna (Italy): one of 10th century Basilica of San Francesco (built in brick and with ceramic decoration) and the other of 18th century church of San Carlino (austere and smaller).

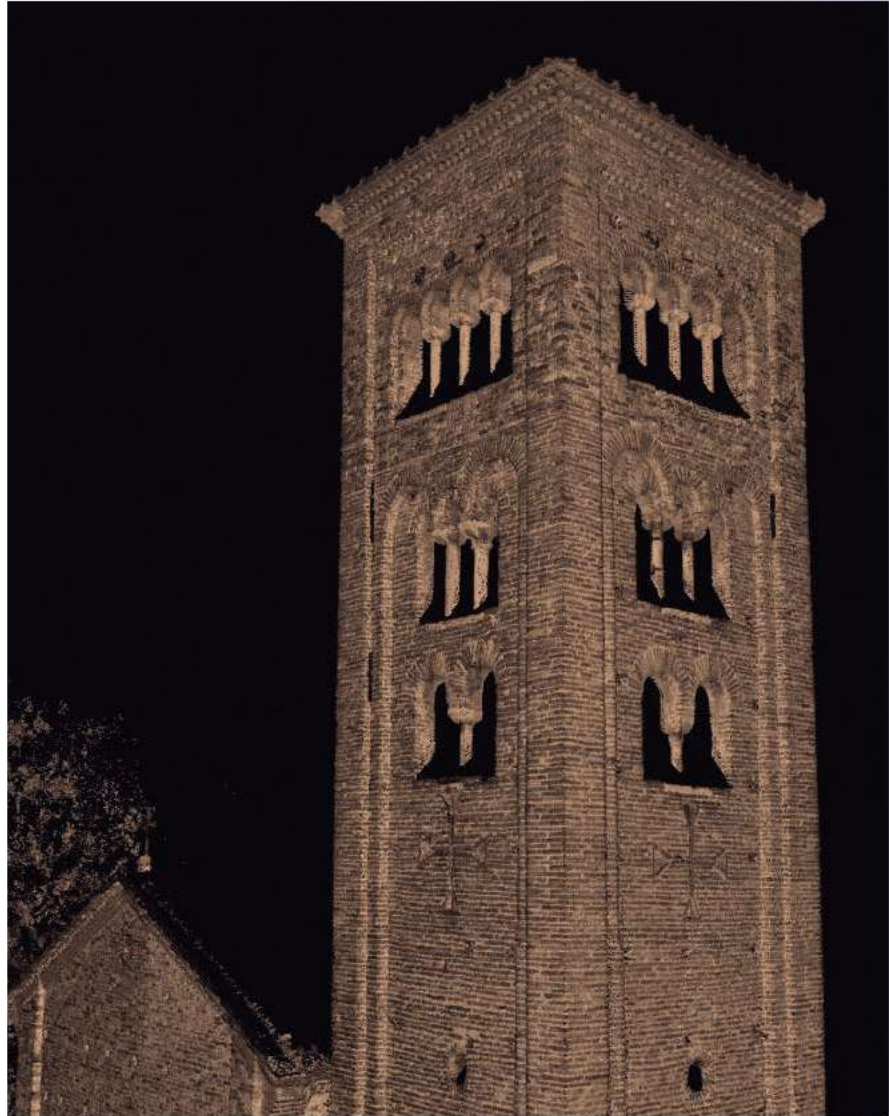
Experiment A_Photogrammetry (SFM)

Terrestrial photogrammetry is a technique that has numerous advantages, due to its accessibility in terms of cost and production of textured, precise and detailed three-dimensional models. However, there are some limitations, which are mainly dependent on the close environment and environmental conditions in data acquisition. These restrictions in turn interfere with the functionality of data processing software.

ON-SITE WORK

Different lenses used play an essential role to carry out the work with these towers: 18.0-55.0 mm f/3.5-5.6 and 70.0-300.0 mm f/4.0-5.6 (belonging to Nikon D5200 and D600 cameras, respectively).

Based on certain conditions such as height and location of these assets as well as level of detail required for resulting digital models, it is convenient to take data from different distances, elevations (taking advantage of nearby situation of other supporting elements) and to use different focal lengths.



1

res aragonesas, que son objeto de estudio. Conociendo a priori las limitaciones que presentan estos elementos, el objetivo es desarrollar una metodología de levantamiento digital eficaz en todas sus fases (toma de datos, postproducción y resultados), que permita obtener una lectura precisa a nivel histórico-constructivo de los modelos hiperrealistas texturizados en alta definición. Todo ello, se pone de manifiesto mediante los levantamientos de dos torres campanario en Ravenna (Italia): la de la Basílica de San Francesco del siglo X (construida en ladrillo y con decoración cerámica) y la de la iglesia de San Carlino del siglo XVIII (austera, de menor dimensión).

Experiencia A_Fotogrametría (SFM)

La fotogrametría terrestre es una técnica que tiene numerosas ventajas, por su accesibilidad a nivel de coste y la producción de modelos tridimensionales texturizados, fiables y detallados. Sin embargo, en ocasiones aparecen ciertas limitaciones, dependientes principalmente del entorno y las condiciones ambientales en la toma de datos, las cuales interfieren, a su vez, en la funcionalidad del software de procesamiento de los mismos.

TRABAJO IN SITU

Para llevar a cabo el trabajo con las torres juegan un papel esencial los



1. Nube de puntos de San Francesco
2. Adquisición de datos: Fotogrametría en zonas sombreadas y puntos de estaciones de escaneo

1. Point cloud of San Francesco
2. Data acquisition: Photogrammetry in shaded areas and laser scanning stations

distintos objetivos utilizados: 18.0-55.0 mm f/3.5-5.6 y 70.0-300.0 mm f/4.0-5.6 (pertenecientes a las cámaras Nikon D5200 y D600, respectivamente).

Teniendo en cuenta la altura y emplazamiento de estos bienes, así como el nivel de detalle requerido para el modelo digital resultante, es conveniente realizar la toma de datos desde diferentes distancias, niveles (aprovechando la situación cercana de otros elementos de apoyo) y utilizando distintas longitudes focales.

Para la torre de San Carlino, se trabaja principalmente con la distancia (que varía entre 3 y 30m) y los objetivos, por su reducida altura (15 m) y por la inexistencia

de elementos de apoyo a distintas cotas. Así mismo, se realizan lotes de imágenes utilizando diferentes longitudes focales: 35, 55, 175 y 185mm.

Por otro lado, en San Francesco se fotografía la torre desde diferentes posiciones (distancias entre 5 y 65-70 metros en función de su entorno) pero, además, se hace a distintos niveles: a cota de calle y desde dos terrazas (a 5.5m y 9m de altura). Adicionalmente, las longitudes focales empleadas son 24 y 46mm con el objetivo menor y 70, 100, 170, 200 y 260mm con el teleobjetivo.

Todas estas pautas metodológicas optimizan el trabajo de campo y son muy útiles de cara al poste-

For San Carlino tower, it has worked mainly with the distance (which varies between 3 and 30m) and the lenses, due to its reduced height (15m) and the lack of support elements at different levels. In addition, sets of pictures are taken using different focal lengths: 35, 55, 175 and 185mm.

On the other hand, in San Francesco, bell tower is photographed from different positions (distances between 5 and 65-70 metres depending on its surroundings), but also at different elevations: at street level and from two terraces (5.5 and 9 metres in height). For this purpose, focal lengths used are 24 and 46mm with the smaller lens and 70, 100, 170, 200 and 260mm with the telephoto lens.

All these methodological guidelines optimise fieldwork and are very useful for further data processing, especially in San Francesco because of its larger size (30 metres high) and its remarkable level of detail.





POST-PRODUCTION

The adequacy of method applied in situ is clearly reflected during data processing. In this study, Agisoft Photoscan, which is a low-cost software (also under student licence) specialised in photogrammetry, is used. This program is able to reconstruct a 3D geometry of the asset from 2D images of it, by means of Structure from Motion (SfM) and Multi View Stereo (MVS) algorithms.

Workflow of such an application is very methodical and intuitive; however, its functionality is limited in high elements due to:

- The unavoidable presence of a large area of celestial vault in the frames.
- In most cases, camera sensor plane is not parallel to photographed plane. That is, there is a predominance of low-angle shots or foreshortened planes.
- Areas of the asset far away from camera position (top of towers) make it difficult to define details correctly.
- Poor convergence between images due to the distance.

Therefore, models and/or singularities obtained by working within these limits are compared below, taking into account two aspects:

A) Position and distance from the element

This analysis is carried out keeping the same type of lens (in this case, 18.0-55.0 mm).

– Tower of San Carlino

By analysing the overall geometry of this tower as a function of distance, polygonal mesh obtained with images at a greater distance (east and west façades) is more regular than that generated with photos at the closest position (south façade). It is noted that:

- The greater the distance, the greater the parallelism between camera sensor plane and that of the façade photographed. Therefore, tower geometry is more accurate, at least in planes in front of the camera (west). That is to say, those located foreshortened, or practically perpendicular to camera projection plane (such as south and east façades, respectively) will still generate irregularities.

3. Malla poligonal de la torre de San Carlino. Irregularidades destacadas en fachadas S y E por la presencia de planos en escorzo

3. Polygonal mesh of San Carlino tower. Irregularities on the S and E façades due to presence of foreshortened planes

rior procesamiento de los datos, especialmente en San Francesco por tener mayor envergadura (30 metros) y su notable nivel de detalle.

POST PRODUCCIÓN

La adecuación del método aplicado in situ se refleja claramente durante el procesamiento de los datos recogidos. En este estudio, se utiliza *Agisoft Photoscan*, software *low-cost* (también con licencia estudiante) especializado en fotogrametría, que es capaz de reconstruir la geometría 3D del elemento a partir de imágenes 2D de éste, mediante *Structure from Motion* (SfM) y algoritmos *Multi View Stereo* (MVS).

El flujo de trabajo de dicha aplicación es muy metódico e intuitivo, no obstante, su funcionalidad está limitada en elementos altos debido a:

- La inevitable presencia de una amplia área de bóveda celeste en los fotogramas.
- El plano de la cámara en la mayoría de ocasiones no es paralelo al plano fotografiado, predominando por ello, la toma en contrapicado o planos en escorzo.
- Las zonas del elemento muy alejadas de la posición de la cámara (parte superior de las torres) dificultan la correcta definición de detalles.
- La escasa convergencia entre imágenes debida al distanciamiento.

Por todo ello, a continuación, se comparan los modelos y/o singularidades obtenidas trabajando dentro de estos límites, teniendo en cuenta dos aspectos:

A. Posición y distancia respecto al elemento

El análisis se realiza manteniendo el mismo tipo de objetivo (en este caso, de 18.0-55.0 mm).

– Torre de San Carlino

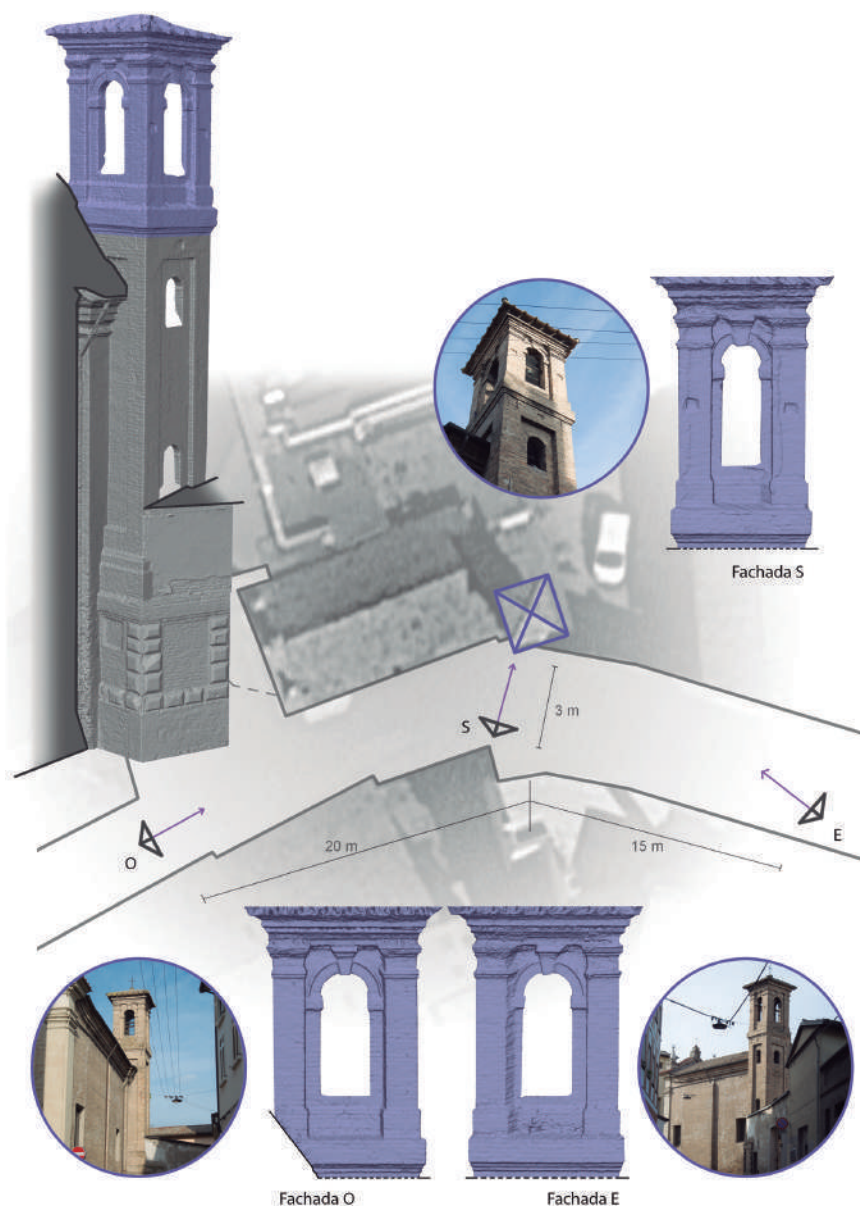
Si analizamos la geometría conjunta de la torre en función de la distancia, la malla poligonal que se obtiene con las imágenes a mayor distancia (fachadas este y oeste) presenta mayor regularidad que aquella generada con las fotos en la posición más cercana (fachada sur). Se observa que:

- A mayor distancia mayor paralelismo existe entre el plano de la cámara y el de la fachada fotografiada. Por tanto, la geometría de la torre es más acertada, al menos en los planos frontales a la cámara (oeste). Es decir, los situados en escorzo, o prácticamente perpendiculares al plano de proyección de la cámara (como las fachadas sur y este, respectivamente) seguirán generando irregularidades.
- A menor distancia predomina el efecto contrapicado, lo que genera irregularidades más acentuadas en la malla poligonal.

Adicionalmente, haciendo referencia a la definición de la torre por partes: la superior o más alejada respecto a la posición de la cámara, tiene una menor definición a nivel de textura y mayor irregularidad en la malla en comparación al resto del cuerpo de la torre. En este caso, si aumenta la distancia disminuye la definición puesto que en dicha zona superior se suman la oblicuidad y la lejanía respecto del plano de la cámara. Por esta razón, la parte baja es más precisa al encontrarse en un plano más paralelo al de la cámara y más cercano.

– Torre de San Francesco

De forma similar al caso anterior, se obtienen modelos más regulares y definidos a nivel formal siempre



3

y cuando se den conjuntamente dos circunstancias: paralelismo entre los planos de elemento y cámara (evitando contrapicado y escorzo), y disminución de la distancia al objeto.

Además, esta torre, por su mayor altura, ofrece más dificultades en la definición de la textura. De hecho, analizando la malla poligonal por franjas en altura, nuevamente se aprecian deformaciones en las partes altas (y, por tanto, alejadas) y en zonas en escorzo respecto a la posición de la cámara.

Afortunadamente, la adquisición fotográfica a distintas cotas (a 5.5 y 9 m) mejora la definición, por ejemplo, de zonas intermedias del

cuerpo de la torre, puesto que la aproximación en altura disminuye la oblicuidad en la toma.

Por tanto, para esta torre las fotografías tomadas a distancias medias (desde la plaza y terrazas) ayudan al software a generar un buen modelo tridimensional a nivel geométrico de conjunto y más preciso que las imágenes obtenidas demasiado cerca (contrapicado) o muy alejadas, donde se pierde detalle en la textura a nivel general y se gana irregularidad en la malla.

B. Distancias focales (D_F)

En ambos casos, se aprecia el mismo comportamiento con el uso

- At shorter distances, low-angle shot effect predominates, which generates more accentuated irregularities in polygonal mesh.

Additionally, referring to the tower definition by parts: upper or more distant part with respect to camera position has less definition at texture level and greater irregularity in polygonal mesh compared to rest of the tower structure. In this case, if distance increases, definition decreases because of obliquity and distance to camera sensor plane that this upper section presents. For this reason, lower part is more accurate as it is in a plane parallel to camera sensor plane and closer to it.

– Tower of San Francesco

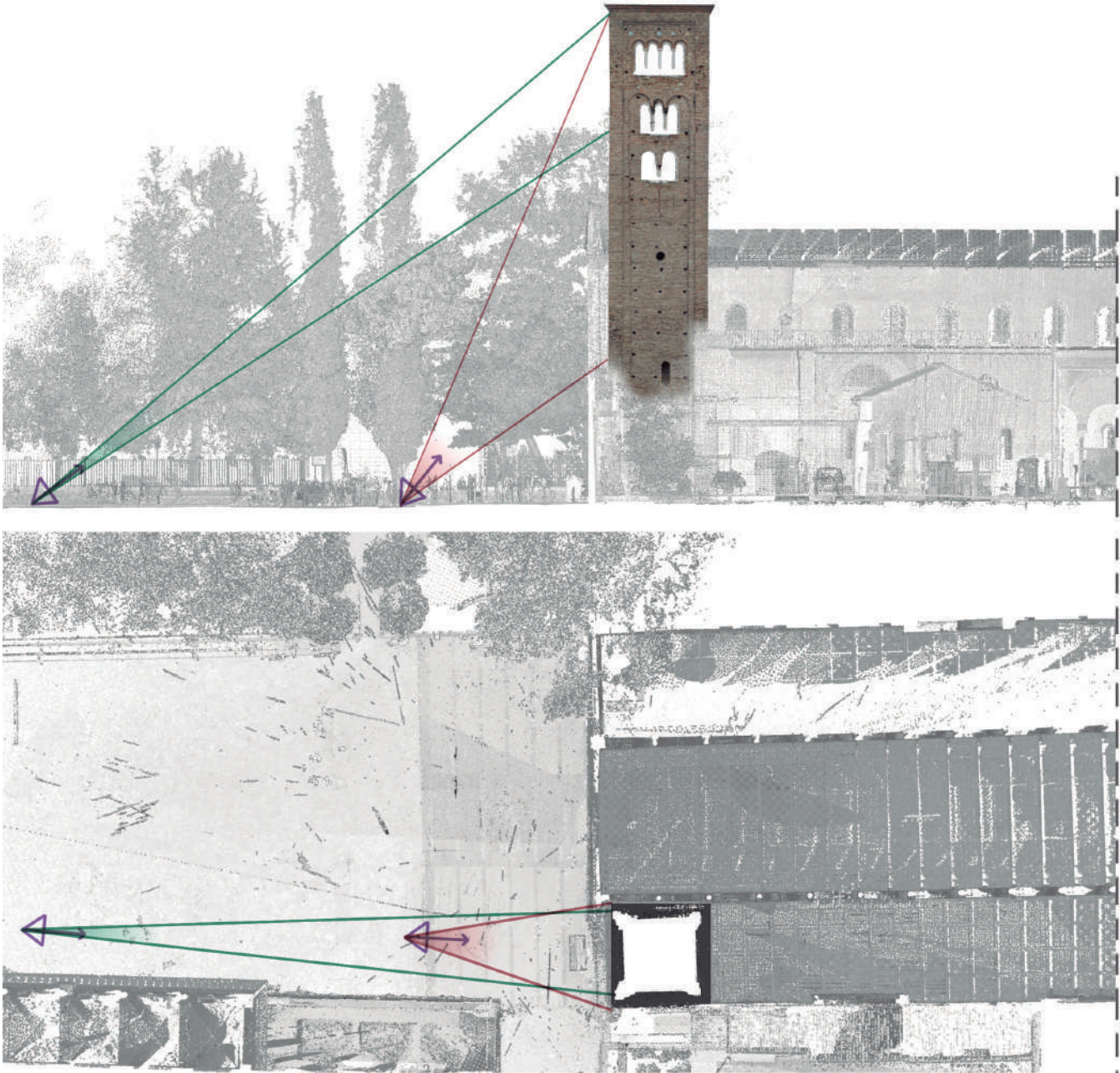
In a similar way to previous case, more regular and geometrically defined models are obtained as long as two circumstances occur together: parallelism between the element and camera sensor planes (avoiding low-angle shot effect and foreshortening), and a reduction in the distance to asset. In addition, this tower offers more difficulties in defining the texture due to its greater height. In fact, analysing polygonal mesh by height bands, there are some deformations in upper part (and therefore, far away) and in foreshortened planes with respect to camera position.

Fortunately, photographic acquisition at different elevations (at 5.5 and 9 m) improves definition of intermediate sections of the tower structure, since height approach to this part reduces obliquity in the shot. Therefore, for this tower, photographs taken at medium distances (from the square and terraces levels) help software to generate an accurate three-dimensional model at geometric level. However, pictures taken too close up (low-angle shot) or too far away, produce a loss of detail in the texture at a general level and increase irregularity in the polygonal mesh.

B) Focal Lengths (FL)

In both cases, use of different lenses results in the same behaviour, with three clear effects:

- First, shorter focal lengths (18.0-55.0 mm) produce polygonal and textured models with an acceptable definition and quite geometrically accurate on the whole.



4

- Secondly, exclusive use of long FLs (70.0-300.0 mm) does not produce comprehensible three-dimensional models. Software has difficulties in the alignment of images that only include parts of the tower and not the totality.
- Finally, if images with different FLs are combined, accurate 3D models with very good definition are obtained. In this situation, software works with photos that show complete (or most) tower structure, and details by parts, so it understands and calculates position and orientation of each image without difficulty. The understanding of total geometry (provided by short

de distintos objetivos, observando tres efectos claros:

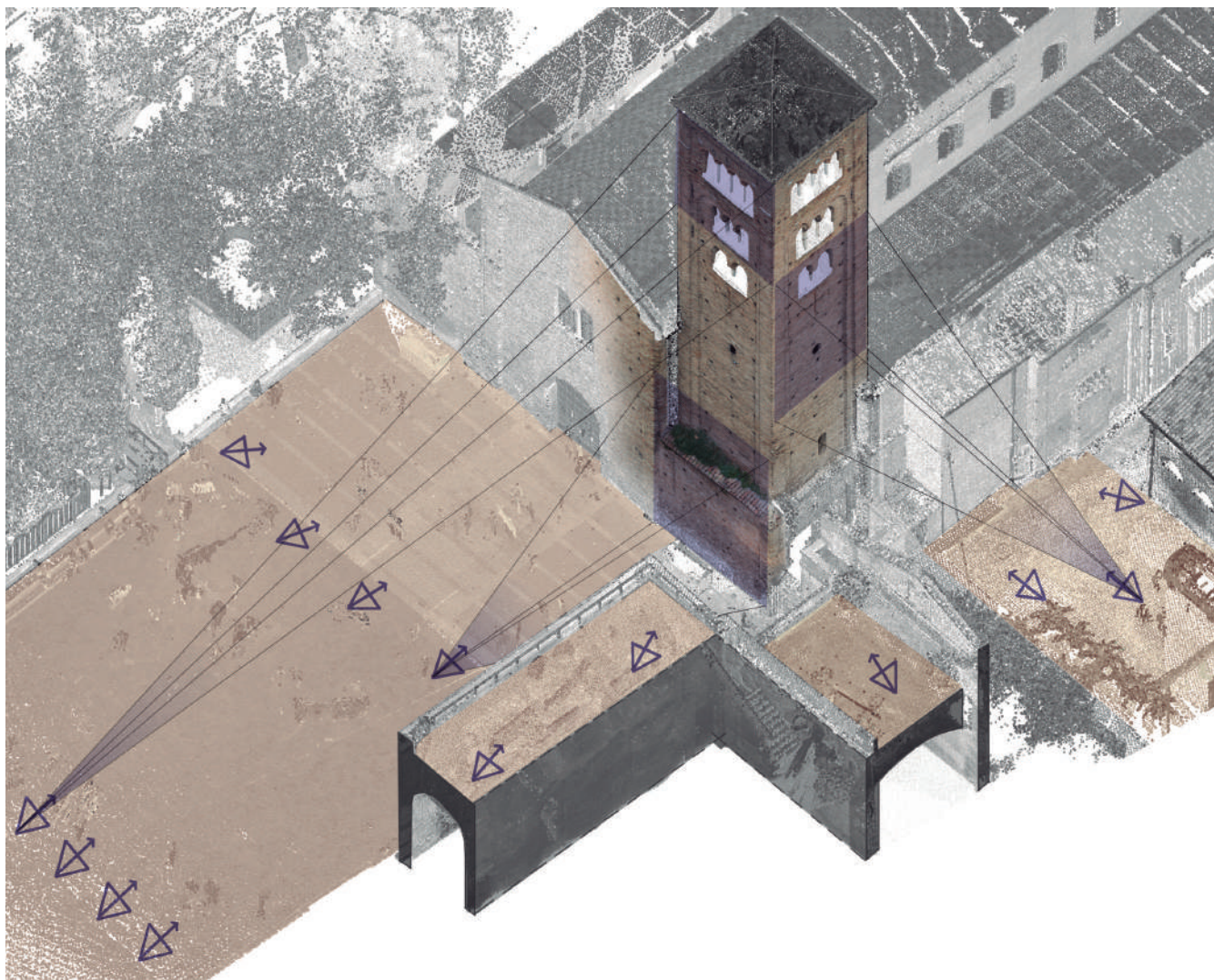
- En primer lugar, las distancias focales menores (18.0-55.0 mm) producen modelos poligonales y texturizados de definición aceptable y bastante precisos a nivel geométrico en conjunto.
- En segundo lugar, el uso exclusivo de D_F altas (70.0-300.0 mm) no genera modelos tridimensionales coherentes. El software tiene dificultades para realizar el alineamiento de imágenes que

sólo incluyen partes de la torre y no el conjunto.

- Por último, si se combinan imágenes con diferentes D_F , sí que se obtienen modelos 3D precisos y con muy buena definición. En esta situación, el software trabaja con fotos que muestran la totalidad de las torres (o su mayor parte), y detalles por zonas, por lo que comprende y calcula sin dificultad la posición y orientación de cada imagen. Se consigue, por tanto, el entendimien-

4 y 5. Convergencia de los rayos de proyección en las tomas fotográficas en función del uso de distintas longitudes focales

4 and 5. Convergence of projection rays in the shots as a function of the use of different focal lengths



5

to de la geometría del conjunto (aportado por las distancias focales bajas) y del nivel de detalle y definición material en las partes (dado por el teleobjetivo).

Teniendo en cuenta los fundamentos de fotogrametría digital en los que se basan los algoritmos del software, los problemas de alineamiento se dan a medida que disminuye la convergencia de los rayos de proyección (D_F altas). Como se observa en las figuras superiores, el ángulo que forman dichos rayos es

menor cuando la D_F es alta (mayor distancia). En esta situación, el cálculo de los centros de proyección (posición de la cámara) así como de los puntos homólogos no es preciso, al no darse una intersección clara por la pérdida de convergencia. Por ello, para optimizar el alineamiento es conveniente combinar las tomas más cercanas al elemento (con menor D_F y mayor convergencia) con las del teleobjetivo desde posiciones más alejadas (donde los ejes de proyección son casi paralelos) 1, 4.

focal lengths) in addition to level of detail and material definition in the parts (given by the telephoto lens) is therefore achieved.

Taking into account the principles of digital photogrammetry on which software algorithms are based, alignment problems occur as the convergence of projection rays decreases (high FL). As can be seen in figures above, the angle formed by these rays is smaller when FL is high (greater distance). In this situation, calculation of projection centres (camera position) as well as homologous points is not precise, as there is no clear intersection due to



6

the loss of convergence. Therefore, to optimise the alignment, it is suitable to combine shots closer to the element (with lower FL and greater convergence) with those of telephoto lens from more distant positions (where projection axes are almost parallel) 1, 4.

After analysing function and limitations of software for these towers, it is important not to forget the added importance of ensuring overlaps between images (quality is better than quantity of photos without appropriate overlaps). In addition, scaling the model by means of control points with coordinates helps to optimise the alignment, and in turn improves accuracy, together with the combination of focal lengths. All that is essential for ortho-imaging and real-scale models 3.

GEOMETRIC ACCURACY

The mean 3D deviations at the control points (obtained according to the aspects previously studied) are listed below. On the one hand, starting from position and

Una vez analizado el funcionamiento y limitaciones del software para las torres trabajadas, no hay que olvidar la importancia añadida de garantizar los solapes entre imágenes (más vale calidad que cantidad de fotos sin adecuados solapes). Además, en general, escalar el modelo mediante puntos de control con coordenadas ayuda a optimizar el alineamiento, y, a su vez, mejora la precisión, junto con la combinación de longitudes focales. Esto es fundamental para la obtención de orto-imágenes y modelos ya dimensionados 3.

PRECISIÓN GEOMÉTRICA

A continuación, se enumeran los errores medios obtenidos en función de los aspectos analizados anteriormente.

Por un lado, partiendo de la posición y distancia al elemento (manteniendo la longitud focal fija), se verifica lo siguiente:

- Los cuerpos inferiores de ambas torres, cuyos planos de fachada son prácticamente paralelos al plano de la cámara y cuya distancia al punto de toma es menor, presentan errores en la geometría más reducidos.
- En las partes superiores de ambos elementos, donde aumenta la distancia con respecto al punto de toma de las fotografías y aparecen los efectos de contrapicado y/o planos en escorzo, los errores son mayores.
- Cuando se construye el modelo conjunto de la torre (en toda su altura), los errores son menores a los obtenidos para las partes



6. Definición de la textura en la parte alta de la torre de San Francisco en función del uso de diferentes distancias focales. En la ampliación superior (más nítida) se utilizan D_F de 46, 200 y 260 mm, mientras que en la inferior sólo 46 mm (más desenfocada)

6. Texture definition in the upper part of San Francisco tower as a function of the use of different focal lengths. In the upper zoom in (better-defined image), FL of 46, 200 and 260 mm are used, while in the lower one only 46 mm (picture more unfocused)

altas y prácticamente iguales o ligeramente superiores a los de los cuerpos inferiores (Tabla 1).

Por otra parte, en referencia al uso de distintas distancias focales (D_F), se corrobora que:

- a) Para longitudes focales pequeñas (imágenes tomadas con el objetivo de 18-55 mm), se reduce el error geométrico, no superando el centímetro.
- b) Para D_F mayores (a partir de 100 mm en este caso), las desviaciones están por encima del centímetro.
- c) Sin embargo, cuando se obtienen los modelos por combinación de diferentes D_F , el error vuelve a ser menor o igual a un centímetro (Tabla 2).

Experiencia B_Escáner láser 3D (TLS)

El escáner láser terrestre (TLS) tiene la ventaja de capturar la geometría del elemento escaneado con una excelente precisión dimensional

produciendo una nube de puntos y, posteriormente con ayuda de software específico, un modelo virtual que es una réplica exacta del objeto real. No obstante, en ocasiones existen restricciones dependientes mayoritariamente de las características técnicas del aparato utilizado en la toma de datos (alcance, nivel de precisión, densidades de escaneo). Las funciones del software empleado, con las dimensiones de estas torres, no han sido un obstáculo para la creación del modelo.

Esta técnica de levantamiento es, comparada con la fotogrametría digital, mucho más dependiente del instrumento y mucho menos de las condiciones ambientales; aunque la variación de la distancia también afecta considerablemente a la densidad de los datos adquiridos.

TRABAJO IN SITU

Para la campaña de mediciones, el instrumento empleado es el escáner láser LEICA SCANSTATION C5

distance to the asset (keeping a fixed focal length), it is verified that:

- a) Lower parts of both towers, whose façade planes are practically parallel to camera sensor plane and whose distance to shooting point is smaller, show minor errors in the geometry.
- b) In the upper parts of both elements, where the distance from camera position increases and low-angle shot effects or foreshortened planes appear, errors are greater.
- c) When the 3D model is built (in its full height), errors are smaller than those obtained for the upper parts, and practically equal or slightly higher than those of the lower sections (Table 1).

On the other hand, in terms of the use of different focal lengths (FL), it is proved that:

- a) For short focal lengths (images taken with 18-55 mm lens), the geometric error is reduced, not exceeding one centimetre.
- b) For long focal lengths (from 100 mm in this case), the deviations are above one centimetre.
- c) However, when models are obtained by combining different FLs, the error is again less than or equal to one centimetre (Table 2).

	PARTE BAJA / LOWER PART	PARTE ALTA / UPPER PART	CONJUNTO / TOTALITY
SAN CARLINO (35-55mm)	0.008 m	0.015 m	0.01 m
SAN FRANCESCO (24-46mm)	0.007 m	0.016 m	0.008 m

Tabla 1 / Table 1

SAN CARLINO		SAN FRANCESCO	
35-55 mm	0.01 m	24-46 mm	0.008 m
175 mm	0.011 m	46 mm	0.01 m
185 mm	0.012 m	100-170 mm	0.02 m
35-55-175-185 mm	0.01 m	200-260 mm	0.04 m
		46-200-260 mm	0.01 m

Tabla 2 / Table 2



Experiment B_3D Laser Scanner (TLS)

Terrestrial laser scanner (TLS) has the advantage of capturing the geometry of surveyed element with excellent dimensional accuracy by producing a point cloud. Subsequently, with help of specific software, it generates a virtual model that is an exact reproduction of real object. However, there are some restrictions that depend mainly on technical characteristics of the device used for data acquisition (maximum range, 3D point accuracy, scanning densities, etc.). The functions of software, with the dimensions of these towers, have not been an impediment to point cloud reconstruction.

This survey technique is, compared to digital photogrammetry, much more dependent on the device and much less influenced by environmental conditions; although distance variation also affects the density of acquired data considerably.

ON-SITE WORK

For surveying campaign, the device used is LEICA SCANSTATION C5 laser scanner with a maximum range of 35m, a horizontal field of view of 360° and vertical of 270°. This means that it processes the dimensions of all elements contained in a sphere of 35m radius except for volumetric portion occupied by scanner itself and its tripod (the coordinate system origin or sphere centre is the scanner "head" itself). Therefore, each scanning station has a specific reference system at the position where it is placed. Furthermore, it is a time-of-flight scanner or pulse measurement, i.e., it measures the "bounce" time of laser at each point of the surveyed object. So, the more perpendicular the item surface is respect to laser ray, the more accurate the measurement will be. Once this tool has been presented, three basic conditioning aspects appear during data acquisition:

A) Distance of laser scanner from the element and device range

When scanning a tower, it is important to take into account its height, device range and location, in order to plan different scanning stations.

For San Carlino tower, six scanning stations have been set up at different distances

7. Nube con una alta densidad de puntos de escaneo. Torre de San Carlino

con un alcance máximo de 35m y un campo de visión horizontal de 360° y vertical de 270°. Esto significa que procesa las dimensiones de todos los elementos contenidos en una esfera de 35m de radio exceptuando la porción volumétrica ocupada por el propio instrumento y el trípode (siendo el origen del sistema de coordenadas o centro de dicha esfera la propia "cabeza" del escáner). Por tanto, cada estación de escaneo tiene un determinado sistema de referencia en la posición donde se sitúa.

Además, se trata de un escáner de tiempo de vuelo o medición por pulsos, es decir, mide el tiempo de "rebote" del láser en cada punto del objeto escaneado. Por lo que cuanto más perpendicular sea la superficie del elemento respecto al rayo láser, más precisa será la medida.

Una vez presentada la herramienta, durante la adquisición de datos aparecen tres aspectos condicionantes básicos:

A) Distancia del escáner respecto al elemento y alcance del aparato

A la hora de escanear una torre es importante tener en cuenta su altura, el alcance del instrumento y el emplazamiento, para programar las estaciones de escaneo.

Para la de San Carlino, se han realizado 6 estaciones de escaneo a diferentes distancias (variando entre 5 y 20 metros) permitiendo la medición completa de la torre (a excepción de la fachada norte, no accesible).

En la de San Francesco, cuya altura está casi en el límite del alcance del aparato, han aparecido ciertas dificultades en la medición, sobre todo de la parte superior del campanario. Se han llevado a cabo un total de 9 escaneos exteriores a

7. Point cloud with high density of scanning points. San Carlino tower

diferentes cotas (calle y terrazas a 5.5 y 9 m). Las estaciones ubicadas en las terrazas optimizan el levantamiento al acercar el instrumento, acortando el alcance necesario.

Sin embargo, algunos escaneos desde la calle no producen datos en puntos muy alejados (parte alta) al superarse el alcance máximo del escáner. Además, las posiciones muy cercanas a la torre (5-6m) en relación a su altura (30m) suponen una oblicuidad excesiva del rayo láser respecto a la fachada con la consecuente pérdida o inexactitud de los datos en determinados puntos (al producirse un rebote erróneo puesto que el rayo es prácticamente paralelo a la fachada).

No obstante, estas deficiencias en la toma de datos, se resuelven con el uso de distintas densidades de escaneo en esta situación concreta.

B) Tiempos y densidades de escaneo

Otra virtud de dicho escáner es la previsualización de la nube de puntos escaneada en cada estación, que permite tomar decisiones in situ según convenga.

Esto unido a la posibilidad de realizar escaneos de áreas personalizadas (seleccionables en la previsualización) y a la elección de diferentes resoluciones, permite obtener una mayor densidad de puntos en la parte superior del campanario, y así conseguir la mayor precisión posible.

Concretamente en la torre de San Francesco, para cubrir toda la parte alta, se han realizado 6 escaneos personalizados desde distintas posiciones. Mientras que para San Carlino, un único escaneo detallado ha sido suficiente.

En cuanto al tiempo de escaneo, este aparato tiene una velocidad



de medición de 25000 puntos por segundo y cuatro niveles de resolución (o densidad de puntos): altísima, alta, media y baja. La mayor parte de escaneos a resolución media tardan entre 6-8min dependiendo de la cantidad de información a procesar. Sin embargo, dicho tiempo aumenta con resoluciones altas y altísimas empleadas en áreas personalizadas (40 minutos). Por tanto, los tiempos de escaneo para elementos de estas dimensiones son condicionantes por las limitaciones derivadas del tiempo de trabajo disponible.

C) Accesibilidad y manejabilidad

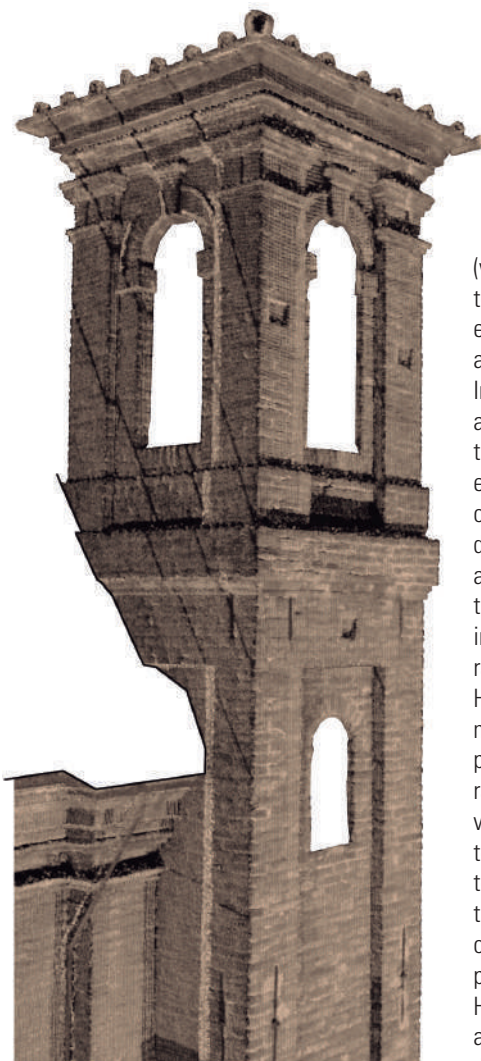
Al tratarse de un instrumento pesado, cuya estabilidad y nivelación son claves para su correcto funcionamiento, el trabajo en superficies con desnivel o inestables, en ocasiones, produce errores o incluso bloquea el escáner.

Por esta razón, las zonas altas ocultas al rayo láser desde la cota de calle son inaccesibles e inseguras para posicionar directamente el escáner. La solución está en el apoyo en terrazas accesibles colindantes.

POST PRODUCCIÓN

Los programas utilizados para la gestión de las nubes de puntos, así como para la edición de modelos poligonales, en general disponen de un amplio número de opciones de optimización de los productos obtenidos y no han presentado problemas en este estudio.

En cualquier caso, la única traba sería el tiempo necesario en los procesos de registro de los escaneos y de importación y exportación de modelos, que se extiende al tratarse de nubes con una densidad elevada de puntos.



7

PRECISIÓN GEOMÉTRICA

Una vez realizado el proceso de registro de las nubes de puntos obtenidas *in situ*, a partir de las sucesivas combinaciones de *Cloud Constraints*, se obtiene un error absoluto medio de 0 mm para ambas torres.

- Para San Carlino se ejecutan 14 combinaciones (12 de las cuales tienen un error de 0 mm y las otras 2 de 1 mm).
- Para la torre de San Francesco, se calculan un total de 159 combinaciones (7 de ellas con un error de 2 mm, 43 de 1 mm y 109 de 0 mm).

En virtud de todo ello, dadas las especificaciones técnicas del escáner láser empleado, así como los parámetros condicionantes duran-

(varying between 5 and 20 metres), allowing total measurement of the tower (with exception of the north façade, which is not accessible).

In San Francesco tower, whose height is almost at the limit of maximum range, there are certain difficulties in the survey, especially at the top of bell tower. A total of nine exterior scans were carried out at different heights (street and terrace levels, at 5.5 and 9 m). Scanning stations located on the terraces optimise survey by bringing the instrument closer, shortening the necessary range.

However, some scans from street level do not produce data at very distant surface points (upper part) as the scanner maximum range is exceeded. In addition, positions very close to the tower (5-6m) in relation to its height (30m) mean that laser beam is too oblique with respect to the façade. In this situation, there is a loss or inaccuracy of data at certain points (as laser ray is practically parallel to the façade). However, these deficiencies in data acquisition are resolved by the use of different scanning densities in this particular situation.

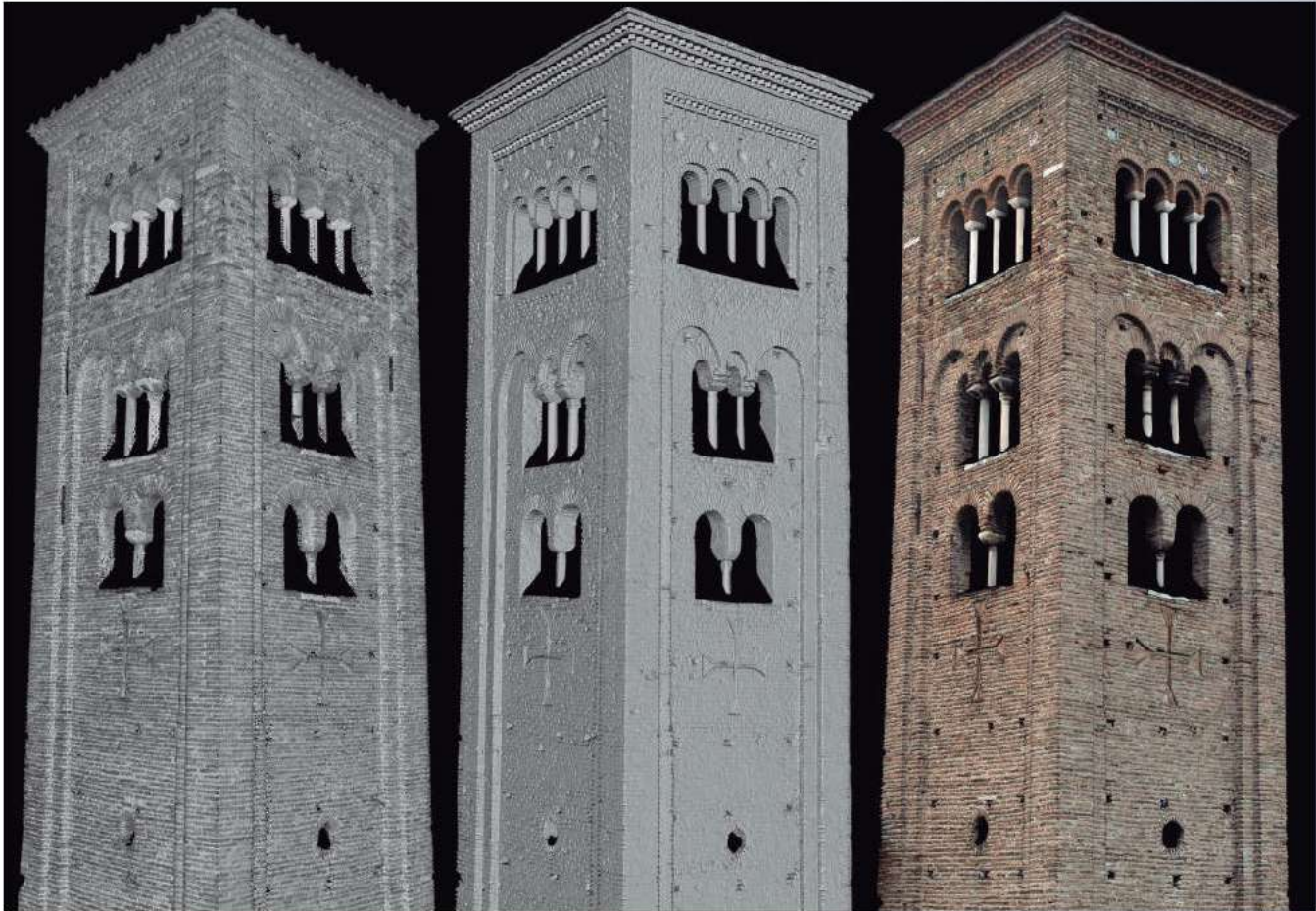
B) Scanning densities and times

Another virtue of this laser scanner is preview of the scanned point cloud at each station, allowing decisions to be made *in situ* as appropriate.

All that, together with possibility of scanning customised areas (selectable in the preview) and choice of different resolutions, makes it possible to obtain a higher density of points in the upper part of bell tower. In this way, the highest possible accuracy is achieved.

Especially, in San Francesco tower, in order to cover the entire upper part, six customised scans were taken from different positions. While for San Carlino, a single detailed scan was sufficient.

In terms of scanning time, this device has a measurement speed of 25000 points per second and four levels of resolution (or point density): very high, high, medium and low. Most scans at medium resolution take between 6-8 minutes, depending on the amount of information to be processed. However, this time increases when high and very high resolutions



8

are used in custom areas (40 minutes). Therefore, scanning times for elements of these dimensions are constrained by the limitations of the available working time.

C) Accessibility and manageability

As it is a heavy instrument, its stability and levelling are essential to its correct operation. Therefore, working on unlevelled or unstable surfaces sometimes causes errors or even blocks the scanner. For this reason, high parts hidden from the laser ray from street level are inaccessible and unsafe for direct scanner positioning. The support on adjacent accessible terraces can solve that difficulty.

POST PRODUCTION

Software used for point cloud management and polygonal model editing generally have a large number of options for optimising the results obtained and have not presented any problems in this study.

In any case, the only handicap would be time required in scans registration processes and importing-exporting models, which is extended when dealing with point clouds with a high density of points.

te la adquisición de datos in situ, se puede verificar la alta precisión de dicha técnica de levantamiento para las alturas de 15 y 30m correspondientes a las torres analizadas.

Conclusiones

Una vez descritas ambas experiencias, se puede concretar que, a pesar de las limitaciones expuestas para estas torres, se han obtenido unos modelos tridimensionales texturizados con la precisión y definición adecuadas a su fin. Todo ello, con los recursos disponibles para dicho trabajo en particular. Además, se puede verificar la pertinencia de esta metodología de levantamiento para elementos altos.

En resumen, se pueden señalar las siguientes consideraciones:

- En la parte fotogramétrica, dos grandes problemas en elementos altos son la verticalidad del mo-

delo y el control del error métrico en las partes alejadas de los centros de toma de datos.

- En referencia al escáner láser, la mayoría de limitaciones se podrían resolver con instrumentos más potentes. Sin embargo, trabajando con las densidades de escaneo comentadas, se obtienen resultados suficientemente homogéneos.
- La integración entre dichas técnicas es imprescindible en estos casos para producir lo mejor de cada una: la precisión métrica del escáner láser y la calidad de la textura de la fotogrametría.
- Es evidente que los resultados se podrían complementar y optimizar con apoyo de fotogrametría aérea (especialmente, en aquellas zonas donde las técnicas terrestres no son factibles) y un levantamiento topográfico para el control métrico de los resultados. ■



8. Nube, malla y modelo texturizado de la torre de San Francesco

8. Point cloud, mesh and textured model of San Francesco tower

Referencias

- 1 / DE LUCA, L., 2011. *La fotomodellazione architettonica*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- 2 / FANGI, G., 2010. Multiscale multiresolution spherical photogrammetry with long focal lenses for architectural surveys. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 228-233. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/208.pdf>
- 3 / GAIANI, M., 2015. *I portici di Bologna. Architettura, modelli 3D e ricerche tecnologiche*. Bologna: Bononia University Press.
- 4 / GUIDI, G., RUSSO, M., BERARDIN, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. Milano: Mac Graw Hill Education.
- 5 / KAUKANEN, H., HEISKA, N., KURKELA, M., 2010. Long focal length imaging for photogrammetric reconstruction. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-5/W1 https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W1/pdf/kauhanen_etal.pdf
- 6 / LUHMANN, T., et al., 2019. Combination of terrestrial laser scanning, UAV and close-range photogrammetry for 3D reconstruction of complex churches in Georgia. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W11, pp. 753-761 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019>
- 7 / MARKIEWICZ, J., ZAWIESKA, D., PODLASIAK, P., 2017. Comparing multi-source photogrammetric data during the examination of verticality in a monumental tower. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W3, pp. 475-480. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-475-2017>
- 8 / MORANDI, S., TREMARI, M., 2019. Virtual past. Interactive presentation of late roman towers (archaeological museum, Milan Italy). *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W11, pp. 887-893. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-887-2019>
- 9 / PATIAS, P., et al., 2013. 3D mapping of cultural heritage: special problems and best practices in extreme case-studies. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II-5/W1, pp. 223-228. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-223-2013>

GEOMETRIC ACCURACY

Once the registration process of point clouds obtained in situ has been carried out, by means of successive combinations of Cloud Constraints, the mean absolute error obtained for both towers is 0 mm.

- For San Carlino, 14 combinations are run (12 of which have an error of 0 mm and the other 2 of 1 mm).
- For San Francesco tower, a total of 159 combinations are calculated (7 with an error of 2 mm, 43 of 1 mm and 109 of 0 mm).

By virtue of the above, given technical specifications of laser scanner used, as well as determining parameters during data acquisition in situ, high accuracy of this survey technique can be verified for the heights of 15 and 30m corresponding to towers analysed.

Conclusions

After describing both experiments, it can be concluded that, in spite of the limitations exposed for these towers, three-dimensional textured models have been obtained with an appropriate accuracy and definition to their purpose. All this, with the resources available for this particular work. In addition, relevance of this survey methodology for high elements can be verified.

In summary, the following considerations can be noted:

- On the photogrammetric side, two major problems in high elements are verticality of the model and metric error control in the parts far away from the data acquisition centres.
- With reference to laser scanner, most of the limitations could be solved with more powerful devices. However, working with scanning densities previously mentioned, sufficiently homogeneous results are achieved.
- Integration between these techniques is essential in these cases in order to produce the better of each one: metric precision of laser scanner and texture quality of digital photogrammetry.
- It is evident that results could be complemented and optimised with the support of aerial photogrammetry

(especially in those areas where terrestrial techniques are not feasible) and a topographic survey for metric control of the results. ■

References

- 1 / DE LUCA, L., 2011. *La fotomodellazione architettonica*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- 2 / FANGI, G., 2010. Multiscale multiresolution spherical photogrammetry with long focal lenses for architectural surveys. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 228-233. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/208.pdf>
- 3 / GAIANI, M., 2015. *I portici di Bologna. Architettura, modelli 3D e ricerche tecnologiche*. Bologna: Bononia University Press.
- 4 / GUIDI, G., RUSSO, M., BERARDIN, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. Milano: Mac Graw Hill Education.
- 5 / KAUKANEN, H., HEISKA, N., KURKELA, M., 2010. Long focal length imaging for photogrammetric reconstruction. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-5/W1 https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W1/pdf/kauhanen_etal.pdf
- 6 / LUHMANN, T., et al., 2019. Combination of terrestrial laser scanning, UAV and close-range photogrammetry for 3D reconstruction of complex churches in Georgia. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W11, pp. 753-761 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019>
- 7 / MARKIEWICZ, J., ZAWIESKA, D., PODLASIAK, P., 2017. Comparing multi-source photogrammetric data during the examination of verticality in a monumental tower. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W3, pp. 475-480. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-475-2017>
- 8 / MORANDI, S., TREMARI, M., 2019. Virtual past. Interactive presentation of late roman towers (archaeological museum, Milan Italy). *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W11, pp. 887-893. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-887-2019>
- 9 / PATIAS, P., et al., 2013. 3D mapping of cultural heritage: special problems and best practices in extreme case-studies. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II-5/W1, pp. 223-228. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-223-2013>