



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

Dipartimento di Ingegneria Civile

Dottorato di Ricerca

in

Rischio e sostenibilità

nei sistemi dell'ingegneria civile, edile ed ambientale

XXX Ciclo (2014-2017)

VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA EL

LEVANTAMIENTO Y MONITOREO DE ÁREAS

ARQUEOLÓGICAS

(UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR SURVEY AND

MONITORING IN ARCHAEOLOGICAL AREA)

Marco Limongiello

Il Tutor

Prof. Salvatore Barba

I Coordinatori

Prof. Fernando Fraternali

Prof. Ciro Faella

Il Cotutor

Prof. essa Margherita Fiani

I Valutatori

Prof. Fernando Berenguer Sempere

Prof. Diego González Aguilera

Marco Limongiello

Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas

A i miei amici: Asia, Flender, Kandra, Kimmy, Laika, Natz, Stella, Toky e
ai prossimi che verranno

ÍNDICE

ÍNDICE	1
ÍNDICE DE LAS FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	11
SIGLAS	13
RESUMEN	15
ESTADO DEL ARTE	21
OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	25
1 MARCO NORMATIVO Y PROYECCIONES FUTURAS	29
1.1 LOS SISTEMAS A PILOTAJE REMOTO	29
1.2 LA EXPANSIÓN DE LOS DRONES	33
1.3 EL REGLAMENTO ITALIANO ENAC	36
1.4 NOTAS SOBRE EL REGLAMENTO ENAC	38
1.4.1 APLICABILIDAD DEL REGLAMENTO	38
1.4.2 OPERACIONES CRÍTICAS Y NO CRÍTICAS	39
1.4.3 OPERACIONES EN VLOS, EVLOS Y BVLOS	42
1.5 LA NORMATIVA FAA	44
1.6 VANT PARA LA FOTOGRAMETRÍA	46
2 LOS RECIENTES DESARROLLOS DEL PARADIGMA FOTOGRAMÉTRICO	49
2.1 BREVE HISTORIA DE LA FOTOGRAMETRÍA	49
2.2 FUNDAMENTOS GEOMÉTRICOS	51
2.3 PERSPECTIVA CENTRAL EN EL ESPACIO	51
2.4 ABERRACIONES ÓPTICAS RADIALES Y TANGENCIALES	53
2.5 ORIENTACIÓN INTERIOR (O INTERNA)	55
2.6 ORIENTACIÓN EXTERIOR (EXTERNA)	58
2.7 GEOMETRÍA EPIPOLAR	59
2.8 IMÁGENES DIGITALES	60

2.9	STRUCTURE FROM MOTION	63
2.10	SIFT (SCALE INVARIANT FEATURE TRANSFORM)	65
2.11	BUNDLE ADJUSTMENT	71
2.12	DENSE IMAGE MATCHING	73
2.13	SOFTWARE SFM EXPERIMENTADOS	76
3	VALIDACIÓN DE DATOS PROVENIENTES DE ACTION CAMERA PARA FINES FOTOGRAMÉTRICOS: EL CASO DE ESTUDIO DE VILLA DI GIULIA FELICE	81
3.3	PROCESAMIENTO DE DATOS	85
3.4	COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS GENERADOS	89
3.5	CONCLUSIONES	94
4	FOTOGRAMETRÍA CON VANT CON ADQUISICIÓN EN MODALIDAD MANUAL: EL CASO DE ESTUDIO DE “VIA DI NOCERA” (EXCAVACIONES ARQUEOLÓGICAS DE POMPEYA)	97
4.1	RESUMEN	97
4.2	INTRODUCCIÓN	98
4.3	MARCO HISTÓRICO DE VIA DI NOCERA	99
4.4	LA INSTRUMENTACIÓN PARA EL LEVANTAMIENTO	100
4.5	LA ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS DATOS	104
4.6	CONSIDERACIONES FINALES	112
5	GEOREFERENCIACIÓN DE LOS DATOS FOTOGRAMÉTRICOS CON VANT POR MEDIO DE DATOS DE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE: EL ANFITEATRO ROMANO DE POMPEYA	113
5.1	INTRODUCCIÓN	113
5.2	ANÁLISIS TÉCNICO ESTRUCTURAL: EL ANFITEATRO ROMANO DE POMPEYA	114
5.3	ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS DATOS	115
5.4	CONSIDERACIONES FINALES	125
6	INTEGRACIÓN DE DATOS FOTOGRAMÉTRICOS DE VANT Y TLS PARA LA MAPIFICACIÓN DETALLADA. EL CASO DE ESTUDIO DEL TEMPLO DI NETTUNO (PAESTUM)	127

6.1	INTRODUCCIÓN	127
6.2	ENCUADRAMIENTO HISTÓRICO DEL TEMPLO DI NETTUNO	128
6.3	ADQUISICIÓN DE LOS DATOS FOTOGRAMÉTRICOS	129
6.4	ELABORACIÓN DE DATOS	130
6.5	PRODUCTOS GRÁFICOS	136
6.6	CONCLUSIONES	138
7	INFLUENCIA DE LOS GCP EN LAS ADQUISICIONES AEROFOTOGRAMÉTRICAS: EL CASO DE ESTUDIO DEL ANFITEATRO DE AVELLA	141
7.1	INTRODUCCIÓN	141
7.2	EL MARCO DEL ANFITEATRO DE AVELLA	142
7.3	CAMPAÑA DE LEVANTAMIENTO	143
7.4	ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE DATOS FOTOGRAMÉTRICOS CON HEXACOPTERO	145
7.5	ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE DATOS CON MEDIOS 'LIGEROS'	150
7.6	COMPARACIÓN DE LOS MODELOS 3D RESTITUIDOS	157
7.7	CONCLUSIONES	162
8	SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO EN PRESENCIA DE LÍMITES REGLAMENTARIOS	165
8.1	INTRODUCCIÓN	165
8.2	ORTOFOTO DE FACHADAS ARQUITECTÓNICAS CON EL SISTEMA "3D EYE"	166
8.3	PORTAL DE LA IGLESIA DE SANT'ELIGIO	168
8.4	ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	168
8.5	LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO DESDE MEDIOS EXENTOS DE NORMATIVAS: EL BEECOPTER	175
8.6	ELABORACIÓN DE DATOS SACADOS CON EL BEECOPTER	176
8.7	COMPARACIÓN ENTRE NUBES DE PUNTOS	179
8.8	CONCLUSIONES	181

9	CONCLUSIONES	185
	REFERENCIAS	197
	PUBLICACIONES	203
	NOTAS	205

ÍNDICE DE LAS FIGURAS

Figura 1: Campo de aplicaciones del tele-levantamiento con drones (fuente: Remondino F., Nex F)

Figura 2: Precisión de los métodos de medición con relación a las dimensiones (Eisenbeiß H)

Figura 3: Multicoptero DJI Phantom 4 (dx) y ala fija Lehmann LA500 (sx)

Figura 4: Sensores instalables sobre VANT: cámara mirrorless Sony Alpha 6500 (sx), cámara multiespectral Parrot Secuoya (centro), láser escáner Riegl VUX 1 (dx)

Figura 5: Estudios de sectores de ABI research (sx) y BI Intelligence (dx), Mayo 2014.

Figura 6: Roadmap del Reglamento italiano ENAC - Medios aéreos con pilotaje remoto (fuente Dronezine)

Figura 7: Espacio aéreo italiano (sx) y CTR de Roma (dx) (Fuente: Enac)

Figura 8: Espacio aéreo permitido para un VANT y para un aeromodelo (fuente Dronezine)

Figura 9: Construcción geométrica en un sistema óptico ideal (fuente: Kraus)

Figura 10: Definición del centro de perspectiva ficticio $O'm$ (fonte: Kraus)

Figura 11: Efecto distorsionador a cojín o almohada (sx) y barril (dx)

Figura 12: Representación de la geometría epipolar (fuente: Visión Computacional)

Figura 13: Sensor CCD (sx) e CMOS (dx)

Figura 14: Información radiométrica en una imagen (8 bit)

Figura 15: Filtrado gaussiano con σ creciente

Figura 16: Diferencias de Gauss

Figura 17: Los extremos locales de la DoG

Figura 18: Descriptor de dimensiones 4x4, construido a un set de 16x16 muestras de la imagen

Figura 19: Imágenes de medio VANT del anfiteatro de Avella, con extracción de los Keypoint, Tie point y el sucesivo matching

Figura 20: Esquema de intersección de rayos homólogos

Figura 21: Dimensiones de una Gopro Hero 3 Black

Figura 22: Planta Villa di Giulia Felice y el muro perimetral investigado (en rojo)

Figura 23: Corredor y muro perimetral levantado de Villa Giulia Felice (a sx)

Figura 24: Puntos de control medidos con estación total (GCP)

Figure 25: Ortofoto y vista desde el alto producida en Agisoft PhotoScan

Figure 26: Ortofoto y vista desde el alto producida en Pix4Dmapper

Figure 27: Ortofoto y vista desde el alto producida en 3DF Zephyr Aerial

Figura 28: La comparación entre las nubes de puntos fotogramétricas de Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper (sx) y el gráfico de dispersión correspondiente con la distribución de Weibull (dx). El gráfico tiene sobre el eje x los valores de desviación (m) y sobre el eje y el número correspondiente de puntos confrontado de los dos modelos

Figura 29: La comparación entre las nubes de puntos fotogramétricas de Agisoft PhotoScan y 3DF Zephyr Aerial (sx) y el gráfico de dispersión correspondiente con la distribución de Weibull (dx). El gráfico tiene sobre el eje x los valores de desviación (m) y sobre el eje y el número correspondiente de puntos confrontado de los dos modelos

Figura 30: La comparación entre las nubes de puntos fotogramétricas de Pix4DMapper y 3DF Zephyr Aerial (sx) y el gráfico de dispersión correspondiente con la distribución de Weibull (dx). El gráfico tiene sobre el eje x los valores de desviación (m) y sobre el eje y el número correspondiente de puntos confrontado de los dos modelos

Figura 31: Ortofoto y vista desde el alto de imágenes filtradas en Pix4Dmapper

Figura 32: Planimetría de Via di Nocera (Pompeya)

Figura 33: El hexacoptero y una fase de toma de los fotogramas

Figura 34: Características de la Estación Total Leica TCR 705 (www.leica-geosystems.it)

Figura 35: ‘Juego’ topográfico y ejemplo de las tarjetas fotogramétricas utilizadas

Figura 36: Distribución y configuración espacial de las tomas fotogramétricas

Figura 37: Histograma de los errores de reproyección para cada punto del Sparse Cloud

Figura 38: Flow-chart

Figura 39: Ortofoto de Via di Nocera (Pompeya)

Figura 40: Detalle del ortofoto producido con el recurso aplicativo open source

Figura 41: Visualización de la Dense Cloud en Agisoft PhotoScan

Figura 42: Plan Arena nivel, Anfiteatro de Pompeya

Figura 43: Distribución de los errores de reproyección de la Sparse Cloud.

Figura 44: Plano de vuelo para la adquisición nadiral.

Figura 45: Distribución de los GCP en la *ima cavea*.

Figura 46: Comparación de nubes de puntos antes y después de ICP solo en la *ima cavea*.

Figura 47: Comparación “cloud to cloud” de la ima cavea antes (sx) y después ICP (dx).

Figura 48: Comparación entre nubes de puntos antes y después ICP solo en una *cuña*.

Figura 49: Comparación “cloud to cloud” de la cuña antes (sx) y después ICP (dx).

Figura 50: Vista prospectiva del la nube de puntos fotogramétricos

Figura 51: Integración de los datos TLS (galería) con datos de VANT (externo)

Figura 52: Vista perspectiva de la nube de puntos producida con aerofotogrametría

Figura 53: Vista perspectiva de la nube de puntos producida con laser scanner

Figura 54: Vista perspectiva de la unión de la nube de puntos TLS y aerofotogrametría

Figura 55: Plano de vuelo para adquisiciones nadirales

Figura 56: Distribución de los errores de reproyección para un único punto de la Sparse Cloud

Figura 57: Disposición espacial de las “Cameras Position”

Figura 58: Distribución espacial de los GCP

Figura 59: Representación de la modalidad de adquisición

Figura 60: Ubicaciones de las estaciones para el levantamiento TLS

Figura 61: Ortofoto del lado Sur (arriba) y Norte (abajo) del Tempio di Nettuno

Figura 62: Tramos interceptados a la estima del volumen para la realización de una pasarela

Figura 63: DEM de nube TLS para la representación de las depresiones

Figura 64: El Anfiteatro romano de Avella

Figura 65: Distribución espacial de los GCP, mediciones y materializaciones

Figura 66: Distribución de los errores de reproyección, modalidad Estático-Rápida

Figura 67: Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre Tarjetas

Figura 68: Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre puntos naturales

Figura 69: Plano de vuelo para la adquisición en nadiral

Figura 70: Toma fotogramétrica por el hexacoptero

Figura 71: Vista perspectiva de la Dense Cloud.

Figura 72: Distribución de los errores de reproyección, modalidad Estático-Rápida

Figura 73: Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre puntos naturales

Figura 74: Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre tarjetas

Figura 75: Adquisiciones fotogramétricas y videogramétricas desde un medio 'ligero'

Figura 76: Comparación entre las nubes producidas por el hexacoptero y el medio ligero: nRTK (sx) Estático (centro), tarjetas (dx)

Figura 77: Comparación de las nubes producidas con el hexacoptero: Tarjetas vs Estático, Tarjetas vs nRTK, nRTK vs Estático

Figura 78: Comparación de las nubes producidas con el Phantom 3 Professional: Tarjetas vs Estático, Tarjetas vs nRTK, nRTK vs Estático

Figura 79: Comparación entre las nubes producidas en modo de video y la nube fotogramétrica con hexacoptero con tarjetas fotogramétricas: vuelo nadir (sx), vuelo 360° (dx)

Figura 80: Ortofoto restituida con medio 'ligero': fotogramétrico, vídeo en nadir y vídeo 360°

Figura 81: Cámara fotográfica estabilizada a través del gimbal con dos ejes

Figura 82: Plan de adquisición del portal de la Iglesia de Sant'Eligio

Figura 83: Imágenes tomadas desde un poste telescópico

Figura 85: Rendimiento del IPC entre la nube TLS y la nube fotogramétrica desde un poste telescópico

Figura 86: Ortofoto del portal de la Iglesia de Sant'Eligio, obtenido mediante la integración de TLS y datos fotogramétricos del sistema 3D Eye

Figura 87: Beecopter: vistas

Figura 88: Distribución de los GCP en la carretera

Figura 89: Detalle de la nube densa de puntos

Figura 90: Distribución de los errores de reproyección por punto único de la nube dispersa

Figura 91: Ortofoto y DEM

Figura 92: Superposición TLS vs aerofotogrametría

Figura 93: Comparación "nube a nube" entre TLS y nubes de puntos aerofotogramétricas

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los APR según la UVS International

Tabla 2: Workflow en el software usado

Tabla 3: Confronto output del software usado

Tabla 4: Errores en los GCP en el software usado

Tabla 5: Coeficientes de correlación de Pearson y p-value

Tabla 6: Descartes de los GCP a través de pre-filtración de imágenes en Adobe Photoshop

Tabla 7: Cálculo de los errores de reproyección (ortofoto de aplicaciones open-source)

Tabla 8: Cálculo de los errores de reproyección (en Agisoft PhotoScan)

Tabla 9: Residuo de los GCP medidos de la nube TLS.

Tabla 10: Errores de los GCP (P2, P3, P4, P6; P8, P9, P11) y Check Point (P1, P5, P7, P10)

Tabla 11: Número de puntos de la nube esparcida y densa generada con las diversas configuraciones de GCP

Tabla 12: Errores de los GCP en la adquisición de los dos medios, en modalidad nRTK en las tarjetas

Tabla 13: Errores de los GCP en la adquisición de los dos medios, en modalidad estático - rápido

Tabla 14: Errores de los GCP en la adquisición de los dos medios, en modalidad nRTK en los puntos naturales

Tabla 15: Errores de los GCP en la adquisición del video

Tabla 16: Matriz sinóptica de las desviaciones entre las nubes de puntos producidas

Tabla 17: Recapitulación de los parámetros estimados en las diversas configuraciones

Tabla 18: Errores de los GCP

Tabla 19: Cálculo de los Errores mediante GCP

Tabla 20: Resumen de los parámetros analizados en los varios casos de estudio

SIGLAS

3D – Three Dimensions

APR – Aeromobili a pilotaggio remoto

BLOS - Beyond Line Of Sight

DEM – Digital Elevation Model

DSM – Digital Surface Model

DTM – Digital Terrain Model

ELOS Extended Visual Line Of Sight

FAA – Federation Aviation America

FOV - Field of View

GCP – Ground Control Points

GNSS – Global Navigation Satellite System

GSD – Ground Sampling Distance

ICP – Iterative closest point

IMU – Inertial Measurement Unit

LIDAR – Light Detection and Ranging

NIR – Near InfraRed

NIR – Near InfraRed, Green and Blue

RANSAC – Random Sample Consensus

RGB – Red, Green and Blue

RMS – Root Mean Square

RTK – Real Time Kinematics

VANT – Sistemi a pilotaggio remoto

SIFT – Scale Invariant Feature Transform

SURF – Speeded Up Robust Feature

TIR – Thermal InfraRed

TLS – Terrestrial Laser Scanner

VANT – Vehículo aéreo no tripulado

UAS – Unmanned Aerial System

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

VLOS – Visual Line Of Sight

WGS84 – World Geodetic System 1984

RESUMEN

En la última década, el desarrollo de la fotogrametría desde medios aerotripulados ha tenido un notable incremento en las aplicaciones de levantamiento arquitectónico y en el monitoreo del ambiente, logrando integrar (en ocasiones hasta sustituir) las clásicas técnicas de la Geomática y a la vez introducir nuevas posibilidades para los sistemas remotos respecto a la técnica fotogramétrica aérea tradicional. La utilización de algoritmos provenientes de la Computer Vision, sobre todo de la disciplina de la Artificial Vision, permite la extracción de juegos de imágenes y nubes de puntos de elevadísima densidad y calidad métrica, generalmente más utilizadas en los sectores de nuestro interés (arquitectónico y ambiental). Las motivaciones del rápido aumento de tales sistemas son atribuidas a la calidad de los resultados métricos e infográficos obtenidos, a la rapidez en la fase de adquisición y a los productos obtenibles en pos-procesamiento, así como a la facilidad de divulgación de los datos 3D. La difusión del nuevo proceso fotogramétrico surgió a la par de la innovación tecnológica de los sensores pasivos, debido al ingreso en el mercado de cámaras fotográficas comerciales en grado de obtener imágenes de óptima calidad métrica y de alta resolución. El trabajo desarrollado durante el curso de doctorado, basándonos en numerosas experiencias algunas realizadas al interno del Laboratorio Modelo de la Universidad de Salerno, haciendo foco en el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la fotogrametría aérea de rango cercano (en ocasiones definida como de proximidad), utilizando y analizando diversas configuraciones del sistema, o sea diversas tipologías de sensores pasivos y diversos vehículos aéreos que estaban instalados en este. Se desarrollaron diversas aplicaciones en función del caso práctico de estudio, cada una con sus propias características morfológicas y grados de detalles diferentes, en dependencia de la elaboración métrica final requerida.

La búsqueda ha estado focalizada en el análisis de las diferencias que un levantamiento aerofotogramétrico puede tener con respecto al clásico levantamiento topográfico, por medio de estaciones totales, GPS (Global Positioning System) o TLS (Terrestrial Laser Scanner), instrumentaciones dotadas de sensibilidad seguramente más elevadas del sistema aerotransportado, y por tanto dotados de menores imprecisiones. En las diversas aplicaciones, utilizando mediciones topográficas provenientes de sistemas diversos y

apoyándonos de los denominados GCP (Ground Control Point), se calcularon las diferencias métricas entre el modelo fotogramétrico georreferenciado y el apoyo topográfico, valorando la potencialidad métrica del sistema en las diversas configuraciones.

Además, mediante un script, se midieron los errores de reproyección para cada punto de la nube generado por todo el proceso fotogramétrico; a partir del análisis estadístico del error de reproyección en los diversos casos de estudios, se evaluaron las modalidades para que el levantamiento aerofotogramétrico tenga las mínimas desviaciones.

Los casos de estudios elaborados recaen esencialmente en el ámbito arqueológico, el cual tiene contacto directo con las diversas *Sovrintendenze*, se analizaron los posibles resultados por una primera informatización del levantamiento. El conjunto de resultados obtenidos y mostrados a las diversas *Sovrintendenze*, representa el punto de partida para la conservación y la protección del bien arqueológico, del cual poder obtener información para diversos ámbitos de interés (valoración de la degradación, cálculo de sedimentación y/o deformaciones, etc). El confronto con la clásica topografía es necesario para un confronto métrico del modelo 3D, del cual surgen todos los resultados (ortofoto, secciones, curvas de nivel, etc.).

ABSTRACT

In the last year, the development of photogrammetry by airborne vehicles has had a significant increase in the applications of architectural surveying and environmental monitoring, integrating (sometimes even to replace) the classic techniques of Geomatic and introducing new possibilities in the Remote Sensing compared to traditional aerial photogrammetric technique. The use of Computer Vision algorithms, above all from the Artificial Vision discipline, allowed the extraction from image sets, clouds of very high density points and metric quality, increasingly used in the sectors of our interest (architectural and environmental). The rapid success of these systems is attributable to the quality of the metric and infographics results produced, to the speed of the acquisition phase and to products that can be realized in post-processing in addition to the ease disclosure of the 3D data. The diffusion of the new photogrammetric process has occurred hand in hand with the passive sensor technology innovation, due to the emergence of commercial cameras on the market able to acquire images of excellent metric and high-resolution quality.

The work developed during the PhD course, based on the many experiences carried out in the Model Laboratory of the University of Salerno, focused on the use of UAV for the aerial photogrammetry, using and analyzing different system configurations, ie different types of passive sensors and different air carriers on which these have been installed. The applications carried out occupied several application cases, with morphological characteristics and different degree of detail, depending on the final required metric data.

The research focused on the analysis of the deviation that an aerofotogrammetric survey can produce with respect to the classic topographic surveys, by total station, GPS (Global Positioning System) or TLS (Terrestrial Laser Scanner), instruments with significantly higher sensitivity than the airborne system, and therefore affected by minor uncertainties. In the various applications, using topographic measurements from different systems and using the so-called GCP (Ground Control Point), the metric deviations between the geo-referenced photogrammetric model and the topographic support were calculated, evaluating the system's metric potential in different configurations.

Moreover, by a script, the reprojection errors were measured for each point of the cloud generated by the entire photogrammetric process; from statistical analysis of the reprojection error in the various case studies, the modalities for which the aerofotogrammetric survey has the smallest deviations have been evaluated.

The elaborated case studies come essentially within the archaeological field, in which, in close contact with the various Sovraintendenze, the possible elaborations to be returned for an initial computerization of the survey were analyzed. The set of works produced and delivered to the various Sovraintendenze, represents the starting point for the conservation and preservation of the archaeological heritage, from which to obtain information for different areas of interest (degradation assessment, calculation of subsidence and / or deformations, etc...). The comparison with the classical topography is necessary for a metric comparison of the 3D model, from which all the elaborates will be derived (orthophotos, sections, level curves, etc.).

ABSTRACT

Nell'ultimo decennio lo sviluppo della fotogrammetria da mezzi aviotrasportati ha subito un notevole incremento nelle applicazioni scientifiche per il rilievo architettonico e nel monitoraggio dell'ambiente, riuscendo a integrare (a volte addirittura a sostituire) le classiche tecniche della geomatica e aprendo nuove possibilità alle cosiddette tecniche di remote sensing rispetto alla tecnica fotogrammetrica aerea tradizionale. L'utilizzo di algoritmi provenienti dalla Computer Vision, soprattutto dalla disciplina della visione artificiale, ha permesso l'estrazione da set di immagini, di nuvole di punti di elevatissima densità e qualità metrica, sempre più utilizzate nei settori di nostro interesse (architettonico e ambientale). Le motivazioni del rapido successo di tali sistemi sono da attribuire alla qualità dei risultati metrici e infografici prodotti, alla rapidità della fase di acquisizione e ai prodotti realizzabili in post-processamento oltre che alla facilità di divulgazione del dato 3D. La diffusione del nuovo processo fotogrammetrico è avvenuto di pari passo alla innovazione tecnologia dei sensori passivi, dovuta all'ingresso sul mercato di fotocamere, anche consumer, in grado di acquisire immagini di ottima qualità metrica e ad alta risoluzione.

Il lavoro sviluppato durante il corso di dottorato, sulla base delle numerose esperienze svolte all'interno del Laboratorio Modelli dell'Università degli Studi di Salerno, si è focalizzato sull'uso di sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) per la fotogrammetria aerea del vicino (o spesso definita di prossimità), utilizzando e analizzando innovativamente diverse configurazioni di sistema, ad esempio diverse tipologie di sensori passivi e diversi vettori aerei su cui queste sono state installate. Le applicazioni svolte hanno occupato diversi casi applicativi, con caratteristiche morfologiche e grado di dettaglio differente, a seconda degli elaborati metrici finali richiesti.

La ricerca si è focalizzata sull'analisi degli scarti che un rilievo aereofotogrammetrico può produrre rispetto ai classici rilievi topografici, per mezzo di stazione totale, GPS (Global Positioning System) o TLS (Terrestrial Laser Scanner), strumentazioni dotate di sensibilità, nominali e certificate, decisamente più elevate del sistema aviotrasportato, e quindi affette da minori incertezze. Nelle diverse applicazioni, utilizzando misurazioni topografiche

provenienti da sistemi diversi e avvalendoci dei cosiddetti GCP (Ground Control Point), sono stati calcolati gli scarti metrici tra il modello fotogrammetrico georeferenziato e l'appoggio topografico, valutando le potenzialità metriche del sistema nelle diverse configurazioni.

Inoltre per mezzo di uno script, sono stati misurati gli errori di riproiezione per ogni punto della nuvola generata dall'intero processo fotogrammetrico; da analisi statistiche sull'errore di riproiezione nei diversi casi studio sono state poi valutate le modalità per cui il rilievo aerofotogrammetrico avesse degli scostamenti minimi.

I casi studio elaborati più emblematici sono ricaduti essenzialmente nell'ambito di aree archeologiche, dove in stretto contatto con le diverse sovrintendenze, sono stati analizzati i risultati delle diverse sperimentazioni.

ESTADO DEL ARTE

La ‘ciencia’ de la fotogrametría, hasta finales de los años’ 90, ha sido caracterizada por una serie de innovaciones atadas particularmente al campo aéreo y para aplicaciones cartográficas, para automatizar la restitución fotogramétrica, primeramente de manera analítica y luego con técnicas digitales. Desde el año 2000 hacia adelante, los sensores activos (láser escáner terrestre y aéreo) han tomado la ventaja sobre la técnica fotogramétrica. La popularidad de los láseres escáneres, llamados en el caso aéreo LiDAR, fue debida al hecho que estos instrumentos pudieron proveer nubes de puntos densas y precisas de manera simple y bastante rápida, además del hecho que tales nubes pudieron ser filtradas casi automáticamente (por ejemplo con la tecnología multi-eco). En los primeros años del nuevo milenio, la fotogrametría no ha sido capaz de proveer de modo eficiente nubes de puntos densas; por lo que muchos investigadores han desplazado sus intereses hacia el láser escáner, ralentizando los progresos y los desarrollos de algoritmos para automatizar el proceso de restitución fotogramétrica. Recientemente, gracias a las mejoras del hardware y nuevos algoritmos desarrollados sobre todo en el sector de la Computer Vision, la fotogrametría ha emergido como una tecnología fuertemente competitiva y capaz de proveer de manera automática, nubes de puntos 3D y modelos detallados de la superficie, geoméricamente comparable a aquéllos conseguidos con instrumentación activa. Los desarrollos de la última década han sido principalmente dos: automatización de la fase de orientación de las imágenes, sin la necesidad de utilizar tarjetas (esta metodología, normalmente llamada Structure From Motion, término acuñado por Ullman en el 1976) y restitución de nubes de puntos densas: con resoluciones comparables a los sensores activos. El elevado grado de automatización del proceso fotogramétrico ha llevado a la realización de soluciones *black box*, haciendo más fácil el modelado 3D de imágenes a los menos expertos. Sin embargo los aspectos metodológicos y la fiabilidad de estos métodos no deberían ser descuidados, sobre todo si el objetivo es de mediciones precisas, sobre el cual se basa este trabajo de tesis. Recordemos que las restituciones fotogramétricas siempre se basan en mediciones redundantes (2 o más rayos homólogos) y las estimaciones de las coordenadas 3D siempre

están asociadas a indicadores de calidad derivadas con procedimientos estadísticos, al contrario de las nubes de puntos producidas con instrumentación activa.

La fig. 1 muestra la cantidad de puntos por superficie y cobertura típica para cada una de las investigaciones metodológicas¹ [Remondino et al., 2011]. La adquisición con la fotogrametría o el escáner láser permite conseguir un elevado número de mediciones en objetos de similares dimensiones y complejidad, y por esto en los últimos años han sido múltiples los estudios para integrar las dos tecnologías. Existen en este caso dos ámbitos diversos de aplicación: uno a escala arquitectónica y al otro a escala territorial con adquisiciones por avión o satélite. En la escala territorial se puede utilizar también la tecnología GNSS, pero en este caso el número de los puntos medidos es limitado, a diferencia de las técnicas de adquisición láser. En las aplicaciones de monitoreo y levantamiento ambiental, generalmente se utilizan los VANT en la adquisición de imágenes digitales que permiten producir ortofotos y modelos digitales 3D con precisión en planimetría y altimetría en el orden de algunos centímetros.

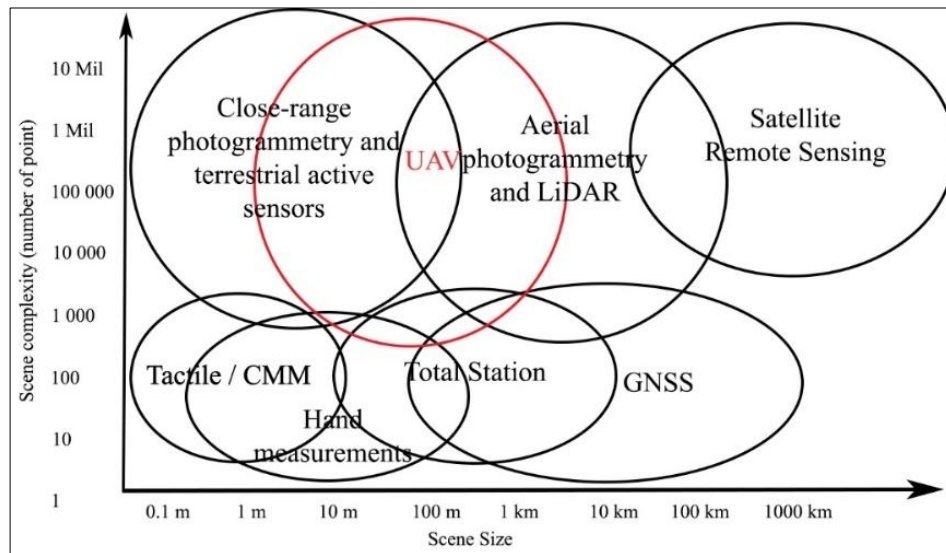


Figura 1: Campo de aplicaciones del tele-levantamiento con drones (fuente: Remondino F., Nex F).

El vehículo aéreo no tripulado (VANT), conocidos también como UAV (Unmanned Aerial Vehicle), son objetos de búsqueda y desarrollo de finales del siglo pasado. Los campos de aplicación en el levantamiento y en el análisis de los procesos territoriales son múltiples: defensa del ambiente, protección de los bienes culturales, agricultura de precisión, inspecciones en elevaciones, etc. Desde el punto de vista de utilización con fines fotogramétricos, o en todo caso de levantamiento, hoy en día los VANT son una alternativa ágil y económica a los tele-levantamientos con aviones. Su empleo es particularmente interesante cuando el área en examen es de limitadas extensiones, o en casos en que la zona de interés es inalcanzable o inaccesible, ejemplo las áreas construidas azotadas por un acontecimiento sísmico. En general resultan ser mayormente flexibles y económicas, con respecto a las tradicionales plataformas de tele-levantamiento aerotransportada (que son necesarias dónde las extensiones territoriales superan algunos kilómetros cuadrados).

Un VANT puede transportar instrumentos de foto y vídeo, sensores NIR y TIR, sistemas LiDAR y láser escáneres; sin embargo, al menos hasta hoy, la reducida carga útil de un VANT ha impedido el empleo de sistemas de tomas de alta calidad debido a que tienen un peso relevante y por lo tanto necesitan una mayor complejidad estructural del medio. La continua miniaturización de los sensores como cámaras fotográficas de alta resolución y de sistemas láser escáner², hacen entrever una fuerte expansión del empleo de los drones ya sea en el ámbito territorial, como realmente ya ha ocurrido en los años pasados, pero sobre todo en el ámbito urbano, donde por ley, no es posible volar (hasta ahora) con medios adaptados para el tele-levantamientos a baja altura.

Luhmann en el 2006, introduce un esquema de los campos de aplicación de los diversos sensores aerotransportados, según la relación entre la precisión final solicitada y las dimensiones del objeto. En el esquema están presentes, además de la fotogrametría con UAV, que cubre al interno del esquema la posición con precisiones del centímetro hasta objetos con un centenar de metros, también láser escáneres en helicópteros y aviones. Completan el cuadro las técnicas de DinSAR (Differential SAR Interferometry) y SAR (Synthetic Aperture Radar), con resoluciones menores pero con mayores áreas levantadas.

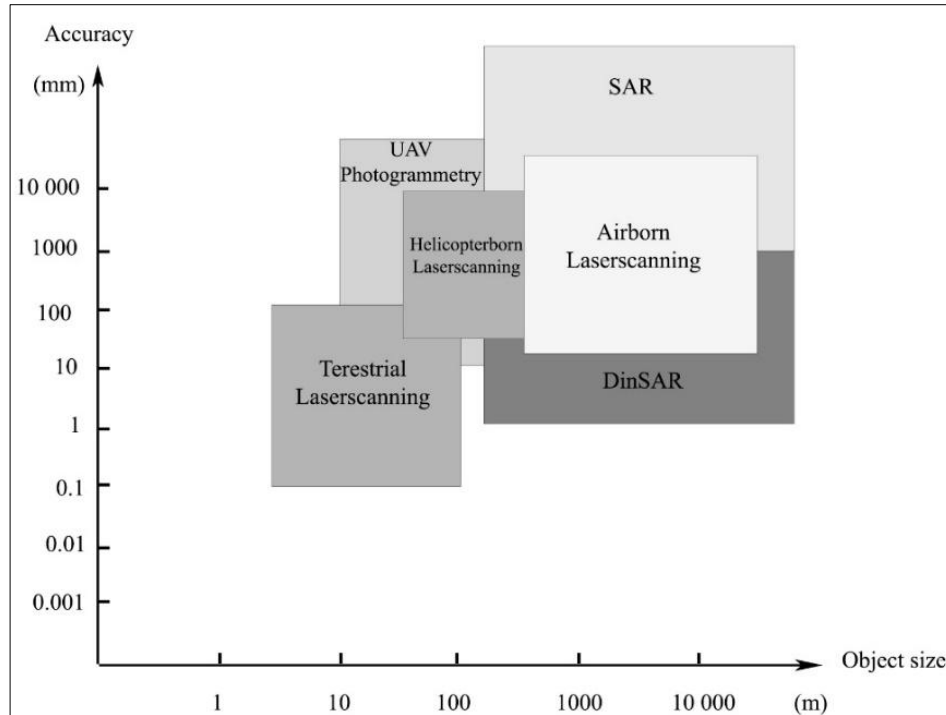


Figura 2: Precisión de los métodos de medición con relación a las dimensiones (Eisenbeiß H).

La ventaja de utilizar sensores pasivos respecto a los activos está en sus costes reducidos de la instrumentación y de las plataformas (ej. Drones), que junto a la disponibilidad de soluciones software black-box está favoreciendo la difusión de las técnicas fotogramétricas. Sin duda la técnica láser queda como un instrumento indispensable en todos los análisis que conciernen una importante presencia de vegetación sobre el terreno¹ (difícilmente eliminable de elaboraciones fotogramétricas).

OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En la fotogrametría a gran escala la adquisición de los datos primarios e imágenes métricas, puede ser oportunamente efectuada con medios de bajo o mediano coste al alcance de pequeñas empresas. Tal posibilidad es debida a la actual disponibilidad de vehículos aéreos no tripulado (VANT), últimamente experimentados en el campo del levantamiento arqueológico y en la monitorización ambiental. De igual paso, también los sensores ópticos instalables sobre ellos, han tenido un notable desarrollo tecnológico mejorando sus características técnicas, reduciendo sus dimensiones y peso, también en un futuro cercano el empleo de los VANT en la monitorización del ámbito urbano. En este último, un aspecto a tener en cuenta a fin de utilizar estos medios, es el reciente reglamento creado por ENAC el 16.07.2015 (y continuamente puesto al día), que impone reglas rígidas para medios cuyo peso total es menor de 25 kg, pero tolerante para medios con peso al despegue menor de 2 kg (art.12), y no aplicable para medios con peso al despegue inferior a los 300 g., con los sensores pasivos cada vez más ligeros que permitirán menores payload, abriendo la línea del empleo de los VANT en el ámbito urbano, tal como ya ocurre para la monitorización del territorio.

El estudio ha sido extendido a diversos paquetes software comerciales (Agisoft PhotoScan, Pix4dMapper y 3DF Zephyr) a modo de entender las características y las adaptabilidades según el set de tomas fotogramétricas a elaborar. Para valorar tales aspectos se ha creído necesario utilizar el mismo set de datos en input por cada aplicación software a analizar. En primera instancia se ha probado un sensor action camera en el caso de estudio del levantamiento fotogramétrico de una de las paredes perimétricas sobre el extremo este de la Villa de Giulia Feliz en Pompeya; las adquisiciones fotográficas han sido ejecutadas con la ayuda de una GoPro Hero 3 Black, catalogable como action camera por sus evidentes efectos distorsionantes. Seleccionando algunos de los puntos topográficos (Ground Control Point) adquiridos, han sido valuados los errores para cada GCP y el error medio sobre la superficie levantada. Un primer procedimiento probado para eliminar los efectos distorsivos de barril de los fotogramas, ha sido una pre-elaboración por medio del filtro “corrección de lente” de Adobe Photoshop, generando en algunos casos errores respecto a los GPC en el orden de algunas

decenas de centímetros. Sucesivamente algunos de los software citados anteriormente han implementado algoritmos específicos para la calibración interior de la cámara, así las tomas fotogramétricas han sido reelaboradas sin el empleo de dicho filtro, encontrando mejorías métricas en los productos finales (los errores finales fueron medianamente en el orden de los centímetros).

Una segunda aplicación desarrollada con el levantamiento fotogramétrico de Via di Nocera a Pompeya ha tenido el objetivo de probar un dron, equipado con una cámara no mirrorless, una action camera. El medio utilizado es un hexacoptero en parte ensamblado en el laboratorio Modelo de la Universidad de Salerno. Han estado adquiridas las tomas fotogramétricas en modalidad manual y time-lapse de 2 segundos en tres vuelos consecutivos: una primera adquisición con la cámara puesta en posición nadiral, al cual siguen otros dos vuelos con la cámara inclinada cerca de 45° sobre la posición horizontal de los andenes. Para georeferenciar la nube de puntos fotogramétricos, 10 GCP, indicados por tarjetas fotogramétricas, han sido medidos a tierra con una estación total.

Para probar un VANT con peso al despegue menor de 2 Kg, ha sido desarrollada una adquisición aérea del Anfiteatro de Avella (AV). El medio utilizado fue un Phantom 3 Professional, un cuadricoptero con peso de unos 1,3 kg, capaz de efectuar tomas fotográficas y vídeos en 4K, con 30 fotogramas por segundo. La cámara está dotada de un sensor de 12,4 megapixel, integrada a un gimbal para maximizar la estabilidad de las imágenes durante los movimientos. Para el estudio del Anfiteatro han sido probadas dos diferentes metodologías de adquisición fotogramétrica: una más clásica con vuelo realizados para tomas fotográficas en modalidad manual y una segunda adquisición menos experimentadas a través de vídeo. Para el control métrico del error han sido tomados 6 GCP distribuidos sobre el plano de la arena, medidos por un GPS en modalidad nRTK. Además del medio ligero, en el mismo día, ha sido ejecutado un levantamiento aerofotogramétrico con hexacóptero con cámara mirrorless, utilizando una modalidad mixta para la adquisición de los fotogramas (plano de vuelo para las tomas nadir, imágenes oblicuas de forma manual). En este vuelo los GCP han sido medidos en tres modalidades diferentes: una primera configuración ha sido una red constituida por 8 puntos de apoyo naturales medidos en modalidad estático-rápido, una segunda red constituida por 17 puntos naturales medidos en nRTK y al final una red constituida por 22 tarjetas fotogramétricas artificiales planos apoyados a tierra medidos en nRTK.

En las últimas aplicaciones nos interesamos particularmente en la posibilidad de integración de datos procedentes de sensores activos y sensores pasivos, en particular de TLS (Terrestrial Laser Scanner) y de fotogrametría aérea de rango cercano. Una aplicación de este tipo ha sido desarrollada en el Anfiteatro romano de Pompeya - Parque Arqueológico de Pompeya. En esta aplicación se tuvo a disposición la nube TLS georeferenciada de todo el anfiteatro (cerca de unos 600 barridos láser escáner para el interior y el exterior), y la nube fotogramétrica no georeferenciada. Han sido medidos de la nube TLS 16 GCP para poder georeferenciar la nube fotogramétrica: con el procedimiento de alineación a través de puntos homólogos. De la compatibilidad de los productos (nubes de puntos), adquiridos de sensores diferentes, para minimizar la diferencia entre las dos se ha utilizado un algoritmo ICP (Iterative Closest Point) llegando a la optimización métrica con errores medios de unos 6 cm. Este procedimiento permitió conseguir un modelo 3D de todo el anfiteatro, conservando la nube láser escáner solo de los sitios inaccesibles por medios a pilotaje remoto (por ejemplo las galerías) mientras, todo aquello “a cielo abierto” ha sido reemplazado por la fotogrametría aérea. Ulteriores aplicaciones de integración de nubes de puntos TLS y fotogramétrica han sido efectuada en el Parque Arqueológico de Paestum, donde un levantamiento fue efectuado por medio de un VANT en el Templo de Neptuno y consiguiente integración con datos TLS, únicamente para el *basolato*; el objetivo no es la integración de los dos sensores, si no de explotar las potencialidades del uno y del otro para un mapa del Templo, con resoluciones diferentes según la solicitud. El vuelo VANT ha previsto una adquisición mixta utilizando un plan de vuelo para la adquisición de las tomas fotogramétricas en nadir y en modalidad manual para las tomas oblicuas laterales. Han sido ubicados en tierra con tarjetas fotogramétricas 11 GCP medidos por GPS en modalidad nRTK. Del modelo 3D fotogramétrico han sido extraídos 5 ortofoto: los 4 alzados laterales y una vista desde lo alto, con una resolución de 1 cm. El mismo día fue efectuado un levantamiento TLS solo del *basolato*, con 24 barridos (paso entre los barridos inferiores a 3 m). Los modelos láseres y fotogramétricos han sido alineados y ubicados en el sistema de referencia, a través de los GCP medidos en nRTK. La nube de puntos láser escáner, con resolución métrica mayor, ha sido utilizada para mapear la presencia de depresiones presentes sobre el *basolato* > 2 cm. La superposición de la ortofoto aérea con el DEM procedente de TLS, evidencia en la primera la distribución espacial de las depresiones, en

coordenadas topográficas, mientras la segunda las cotas altimétricas en falsos colores. Por la utilización del interior del Templo para objetivos turísticos, la Sovrintendenza tiene intenciones de engendrar una pasarela en metal sobre el corredor Este-Sur. Para posicionar esta última, la Sovrintendenza ha solicitado una consideración del volumen de llenado de las depresiones presentes sobre el *basolato*; esta es posible engendrando un plan horizontal de *fit*, por la sola área interesada por la pasarela, y calcular el volumen de llenado de las depresiones. Se han valorado sistemas fotogramétricos innovativos en presencia de vínculos normativos, o bien en áreas definidas críticas del normativo ENAC del 16.07.2015). Un primer sistema, probado en la mayoría de los casos de estudio, es 3D Eye provistos por la empresa italiana Microgeo. El sistema está formado por un asta telescópica, largo máximo 13 m, en cuya cumbre tiene posicionado un estabilizador electro-mecánico calibrado por una cámara fotográfica Sony QX-30. Un caso de estudio ha sido efectuado sobre el portal de la Iglesia de Sant'Eligio Maggiore (NA), utilizado para confrontar la reconstrucción 3D fotogramétrica producidas con una nube láser escáner, sin información RGB. El objetivo de la actividad es el de confrontar la reconstrucción del modelo 3D con la nube láser escáner para entender si el sistema, siempre utilizable en área crítica, puede considerarse una válida alternativa a los métodos de medición canónica, para el levantamiento y la restitución de ortofoto de fachadas arquitectónicas. Siempre en presencia de vínculos normativos, el actual reglamento ENAC no contempla drones con peso total inferior a los 300 g.; en efecto estos últimos están dotados con protecciones de las partes rotatorias y no superan los 60 km/h de velocidad de punta, son considerados intrínsecamente inofensivos y heredan todas las facultades de empleo de los drones certificados como inofensivos, al piloto no le es solicitado la licencia de pilotaje ni la visita médica aeronáutica. El sistema utilizado para averiguar las potencialidades fotogramétricas en áreas críticas, es el Beecopter de Microgeo. El "mini dron" con peso total de 248 g, tiene integrado una cámara fotográfica de 12 megapíxeles con óptica modificada para la realización de ortofotos (nadir) y modelos 3D a alta definición. La prueba efectuada sobre un eje de camino con el empleo de 6 GCP en tierra, medidos en modalidad nRTK y adquisición de los fotogramas en nadir por plano de vuelo. Para averiguar la autenticidad métrica de la restitución fotogramétrica, también se efectuó un levantamiento TLS para confrontar las dos restituciones.

1 MARCO NORMATIVO Y PROYECCIONES FUTURAS

1.1 LOS SISTEMAS A PILOTAJE REMOTO

El levantamiento aéreo detallado de áreas con extensiones variables, de pocas hectáreas o con algunos kilómetros cuadrados, siempre ha sido el problema mayor la falta de instrumentos adecuados que permitan llenar el gap entre los clásicos levantamientos fotogramétricos aéreos y los levantamientos terrestres (topografía, fotogrametría o escáner láser). Recientemente este gap ha estado superado gracias al desarrollo de los vehículos aéreos no tripulado (VANT) que consiguen tanto la realización de levantamientos a baja altura, generalmente en un rango comprendido entre 20 y 150 metros, como la obtención de datos métricos y cualitativos de extremo detalle.

Los VANT, en general conocidos con el término de “drones” y desarrollados inicialmente para aplicaciones militares, son de uso común en trabajos civiles y en particular en el sector del levantamiento arquitectónico, arqueológico y geológico/geomorfológico. Su popularidad es debido sobretudo a la posibilidad de obtener imágenes aéreas del área de interés con numerosas ventajas, algunas son: rapidez en la ejecución del levantamiento aéreo, posibilidad de realización en áreas de difícil acceso, mayor resolución de las imágenes respecto a la tradicional fotogrametría aérea (hasta con píxeles < 1 cm), dispone de diversas soluciones de software userfriendly y low-cost para el procesamiento de los datos. Dado el aumento exponencial en el uso de estos vehículos en el sector civil, en 2014 el ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile) emitió un reglamento donde define los VANT, como un sistema consistente en un vehículo aéreo (aeronaves con pilotaje remoto) sin personas a bordo, utilizado para fines diversos sea recreativos o deportivos, y los componentes y sensores relacionados necesarios para el control y el comando (estación de control). En

el ámbito internacional las siglas VANT fueron sustituidas por UAV (Unmanned Aerial Vehicles) o en ocasiones por UVS (Unmanned Vehicle Systems); este último es más abarcativo que UAV y aquel es el acrónimo más completo utilizado a nivel internacional porque comprende todos los aspectos de tales vehículos y no solo las plataformas. Existen algunas clasificaciones de estos medios en función del peso, características técnico-mecánicas, de la carga transportada (payload), de la máxima distancia a recorrer, de la altura de vuelo o del tipo de ala (fija o rotante). Según una de las clasificaciones más utilizadas, que corresponde al 2011 de la *Unmanned Vehicle System International*, los APR pueden ser clasificados en base a un conjunto de parámetros, en tres grandes clases: Táctico, Estratégicos y para Operaciones Especiales. La mayor parte de los UAV utilizados para barrido fotogramétrico son aquellos pertenecientes a los tácticos y en particular a las sub-categorías mini y micro UAV, que se volvieron muy populares gracias al desarrollo de nuevas plataformas tecnológicas con prestaciones siempre más avanzadas. Tales plataformas tienen un rango operativo (definido como la distancia máxima de vuelo a la estación de control, o del radio comando) siempre inferior a los 10 km (la mayor parte de las plataformas no llega a esta distancia), la altura máxima de vuelo es en torno a los 250-300 metros, la autonomía de vuelo es inferior a 1-2 horas y peso máximo para despegar es inferior a 30 kg. Actualmente los VANT representan una tecnología innovadora que está volviéndose cada vez más presente en la vida diaria de todos, no solo en el ámbito del levantamiento del terreno, si no también en tantos sectores que explotan la capacidad de estos sistemas de obtención de informaciones desde las alturas. Así mismo, la difusión en el mercado de cámaras fotográficas digitales compactas de bajo costo, elevada resolución y gracias al desarrollo de sensores siempre más miniaturizados, ha permitido, en los últimos años, un aumento del número de sistemas UAV utilizados para aplicaciones fotogramétricas.

La potencialidad ofrecida por estos sistemas es principalmente asociada a la posibilidad de obtener imágenes aéreas a baja altura, útiles tanto para trabajos documentalista como para productos métricos, necesarios en la representación y análisis de sitios investigados. Los aviones pueden dividirse en dos categorías principales: los multicopteros y los mono-ala llamados también de ala fija.

Tabla 1: Clasificación de los APR según la UVS International.

CATEGORÍA	Radio [Km]	Altura de vuelo [m]	Duración [h]	Masa [Kg]
Nano (Micro)	< 10	100	1	0.025
Micro	< 10	250	< 1	< 5
Mini	10 - 30	150 - 300	< 2	< 30
Close Range	30 - 70	3000	2 - 4	150
Short Range	70 - 200	3000	3 - 6	200
Medium Range	> 500	5000	6 - 10	1250
Low Altitude Deep Penetration	> 250	50 - 9000	0.5 - 1	350
Low Altitude Long Endurance	> 500	3000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	> 500	14000	24 - 48	1500

Los multicopteros tienen una estructura con hélices caracterizada por la presencia de una o más hélices (en general con un mínimo de tres y un máximo de ocho), que permite al aeroplano comportarse como un helicóptero. Pueden, por lo tanto, mantener fija la posición en medio del aire (capacidad de hovering), efectuar giros repentinos, volar en dirección oblicua; los movimientos se llevan a cabo oportunamente moviendo a la par las hélices independientes desde el radio comando. Los mono-ala tienen una estructura plana que se asemeja a las aeronaves más que a los helicópteros; estos aviones están dotados por lo tanto de una hélice que sirve para proporcionar elevación y de grandes alas que permiten el aprovechamiento de las corrientes y flujos de aire.

Todos los aeroplanos APR con ala fija no tienen la capacidad de hovering, pero tienen una mejor aerodinámica que le permite lograr una mayor resistencia al viento. Los multicopteros representan los APR más conocidos y más difundidos. Desde el punto de vista de los problemas de levantamiento del terreno las dos tipologías de aviones se diferencian por la operatividad, autonomía de vuelo, modalidad de adquisición. Los multicopteros tienen, en cambio, resistencia al viento inferior, pueden volar a alturas de vuelo muy bajas (10 metros), tienen una mayor flexibilidad en fase de adquisición de fotografías tanto nadiral como inclinadas gracias a la posibilidad de rotar el sensor por medio de un gimbal que puede ser guiado desde el piloto remoto de manera independiente al avión. Los aviones con ala fija vuelan a alturas de 100 metros, permiten la ejecución únicamente de la toma nadiral según el clásico esquema de fotogrametría aérea

(creando un plano de vuelo), tienen capacidad de carga muy bajas que limita grandemente el tipo de sensor que puede llevar. Las dos tipologías de aviones, que pertenecen a la misma gran categoría de los mini APR, y teniendo campos de aplicaciones parecidos, se diferencian también por la finalidad del levantamiento y por las características del producto que pueden obtener de su implementación: levantamiento a grandísimas escalas (resolución y precisión del levantamiento incluso subcentimétrica) de áreas incluso extensas de algunos kilómetros cuadrados para los aviones de ala fija. El piloto en tierra mediante la estación de control, dispone de esquemas que muestran las imágenes transmitidas en tiempo real desde la cámara fotográfica instalada a bordo, la telemetría, la velocidad, la altura de vuelo y todos los otros parámetros necesarios para un control detallado de cada fase del vuelo.



Figura 3: Multicoptero DJI Phantom 4 (dx) y ala fija Lehmann LA500 (sx).



Figura 4: Sensores instalables sobre VANT: cámara mirrorless Sony Alpha 6500 (sx), cámara multispectral Parrot Secuoia (centro), láser escáner Riegl VUX 1 (dx).

Después del despegue, el dron puede seguir un plano de vuelo programado, sin la necesidad de ser telecomandado, como sucede siempre con los drones de ala fija. El sistema de navegación satelital GNS (Global Navigation System) basado en el sistema de localización satelital GPS (Global Positioning System) garantiza al vehículo las indicaciones espaciales de posición, velocidad y altura de vuelo en cada momento, informaciones que vienen elaboradas desde la computadora a bordo que guía la trayectoria según lo programado en tierra. A parte del GPS, a bordo del medio están siempre otras tipologías de sensores, útiles para el control de vuelo, que son principalmente: giróscopo, acelerómetro, barómetro magnetómetro.

El sensor (activo o pasivo) equipado a bordo hace que un simple UVA sea, con el Reglamento ENAC, un UVS. El tipo de cámara que puede ser montada en un UVS depende principalmente del dron que se utiliza (payload) y del tipo de actividad que debe ser realizada. Junto a la cámara fotográfica normal los UVS pueden equiparse con cámaras térmicas, multiespectrales y con cámaras hiperspectrales; en particular, las cámaras multiespectrales e hiperspectrales son similares a los típicos procedimientos de telelevantamientos satelitales pero con imágenes tomadas desde distancias cortas. Junto a los sensores ópticos los UVS pueden ser equipados con sistemas LIDAR. Su uso es aún bastante limitado a causa del costo elevado de la instrumentación de los sistemas más eficaces, la necesidad de utilizar UVS con payload elevados, y la instalación de estaciones inerciales.

1.2 LA EXPANSIÓN DE LOS DRONES

Los drones son un sector hoy protagonista de un desarrollo tecnológico continuo que acompaña y estimula cada vez más la curiosidad y el interés de los consumidores y profesionales del sector, atraídos por las nuevas funciones implementadas (video, GPS, técnicas de vuelo automático, guía FVP, etc.) y de las nuevas y diversas aplicaciones en el campo profesional.

En este momento el mercado de los drones atraviesa su fase de fuerte expansión, resulta difícil contar con datos completamente fiables, principalmente sobre sus proyecciones futuras y su impacto en los diversos campos de aplicación; todavía existen algunos instrumentos, que pueden ofrecer un buen número de informaciones sobre la expansión futura de estos medios y su impacto en la

comunidad. En la literatura existen algunos estudios de agencias internacionales, que proyectan el mercado de los drones en los próximos años, tomando como indicador, la cantidad de inversiones previstas en el mundo de los drones. Este parámetro puede justificar la futura expansión de estos medios (sobre todo en ámbito urbano, donde la normativa hoy no permite un fácil empleo de estos medios), y el aumento tecnológico aportará beneficios en diversas ramas profesionales.

La AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) emite regularmente boletines proclamando el impacto económico del sector Unmanned en USA, prevé un aumento de inversiones en el mercado de los drones de 82 millones de dólares en la próxima década, sobre todo ligada a la innovación tecnológica de los UAV en el campo agrícola y la seguridad pública. *ABI Research*, sociedad de market intelligence con una comprobada experiencia de 25 años, en su reporte de 23 páginas, prevé que entre el 2015 y el 2024 las inversiones en el campo de los drones en el mercado global serán de una cifra de 111 millones de dólares. El tren anual será creciente de manera exponencial sobre todo en la fase de los llamados *drones consumer* o sea aquellos colocados entre los drones aficionados y los drones profesionales, mientras las inversiones en el campo militar serán prácticamente constantes. BI Intelligence, un servicio de búsqueda de Business Insider, declara al contrario un giro empresarial de 7.4 millones entre el 2018 y el 2019, con una neta dominación del mercado comercial de los pequeños drones y la obtención de cerca de 5,1 millones (considerando también los drones de juguete en el segmento comercial).

Para el mercado militar se prevé sólo el 42% de la cifra total (fig.5). En lo que concierne al cuadro nacional, *Conrad Italia*, uno de los player de tecnologías online más importantes a nivel europeo, estimó que la venta de drones aumentó en 16% desde el 2015 al 2016 y están destinadas a crecer aún más en los próximos años. Hasta el momento los drones más vendidos son aquellos cuya función es la toma de imágenes: el 46% de los drones adquiridos online están dotados de cámaras fotográficas y GPS en conjunto y el 26% solo con cámaras fotográficas para después seguir los drones profesionales de varios tipos (12%), mini drones (9%) y drones de carreras (7%).

Otra búsqueda de mercado sobre los drones y su impacto en las empresas del ámbito nacional es la agencia Adnkronos. El informe muestra que en 2015 la

facturación generada por drones en nuestro país alcanzó los 350 millones de euros; las empresas del sector impulsadas desde el Centro-Italia, tienen como media 7 empleados y un business de 700 mil euros cada uno.

Otros datos que pueden resultar interesantes en el territorio italiano son aquellos publicados anualmente por la ENAC con la “Rapporto e Bilancio Sociale”. Verificando los datos en la declaración de Trabajadores VANT para operaciones especiales críticas y no críticas, del reglamento (2014), se nota un aumento exponencial de estas cifras: en el 2014 las declaraciones para operaciones no críticas y críticas valoradas por la ENAC fueron respectivamente 102 y 8, en el 2015 958 y 79, en el 2016 incluso 2989 y 504. Hoy, son 1200 las Aeronaves con Pilotaje Remoto que vuelan en nuestro país, y un número muy superior de aeromodelos. Con respecto al Reglamento redactado por el Ente Nazionale per L’Aviazione Civile (ENAC), para un total de cerca 600 pequeñas agencias especializadas en la producción de estos vehículos radio comandados o que utilizan los mismos para varias aplicaciones profesionales, desde la fotografía aérea hasta la vigilancia del territorio y desde la agricultura hasta el control de grandes infraestructuras. Se quiere señalar al final que cada proyección se debe tomar con la debida tolerancia, viendo la continua modificación del cuadro normativo tanto nacional como internacional.

or tanto, una eventual modificación que favorezca o permita realizar operaciones puede cambiar rápidamente la cifra de las inversiones previstas para el futuro.

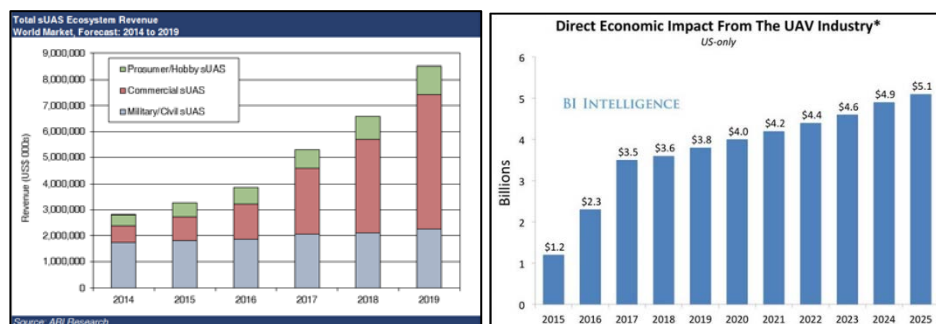


Figura 5: Estudios de sectores de ABI research (sx) y BI Intelligence (dx), Mayo 2015.

1.3 EL REGLAMENTO ITALIANO ENAC

La rápida difusión del empleo de los VANT no puede hacernos olvidar que se tratan de instrumentos donde su uso requiere de determinada competencia, la ausencia de ésta es fuente de riesgo para las personas y las cosas. En consecuencia, la ENAC (Agencia Nacional de Aviación Civil) intervino dictando normas obligatorias sobre las calificaciones de los operadores y los métodos de empleo y las áreas sobrevolables. En este sentido, está disponible el Reglamento ENAC *Mezzi aerei a pilotaggio remoto*, emitido en diciembre del 2013 y continuamente actualizado. Desde la creación del reglamento ENAC, se realizaron varias revisiones que tuvieron en cuenta el creciente fenómeno del uso de estos medios. Brevemente, como representa también la fig. 6, la presentación del reglamento fue en el 2013, pero su entrada en vigor fue el 30 de abril del 2014. La normativa realiza diversas revisiones con el paso del tiempo; una de estas es aquella de marzo del 2015 refiriéndose esencialmente al art. 8 del viejo reglamento, imponiendo muchas restricciones sobre toda la actividad del vuelo relativa a los drones y permitiendo solo a operadores certificados de efectuar tomas aéreas en lugares públicos. La revisión, entre otras cosas, obliga al piloto y al comitente (si este existe), de efectuar la relativa comunicación obligada a la ENAC identificando el nivel de peligrosidad de las operaciones de vuelo con drones, que varían en dependencia de la composición demográfica y del área de interés. Por lo tanto, la nueva regulación hace que el uso autónomo de drones para vídeos profesionales sea más complejo, especialmente en áreas donde existe la posibilidad de sobrevolar a personas que no están relacionadas al trabajo.

El 16 de julio del 2015 se publicó la segunda edición del reglamento por parte de la ENAC, que entra en vigor después de 60 días de su publicación en el sitio (16 de septiembre del 2015). El reglamento, todavía hoy en vigor, establece que el entrenamiento y la habilitación para volar un APR con el cual un piloto piensa volar, debe ser dada por el fabricante o por uno de sus instructores habilitados. Con la entrada en vigor del nuevo reglamento, el entrenamiento para volar asume una competencia exclusiva de Organizaciones de entrenamiento teórico/práctico reconocida, que deberían dar un certificado de piloto³ VANT, después de la valoración teórica y práctica por parte de un inspector reconocido de la ENAC.

Los actuales certificados serán válidos hasta el 1 octubre del 2016 y desde el 1 de abril del 2016 se podrá iniciar a convertirlos en el nuevo certificado. En cambio, desde el 1 de julio del 2016 será necesario equipar el dron con un sistema identificativo electrónico. Este sistema transmitirá en tiempo real toda la información de vuelo del dron, para poder verificarlos en tiempo real, así como también registrarlos. Las características del sistema están fijadas por la ENAC en el mismo Reglamento. En el Reglamento de distinguen dos categorías de VANT en función del peso: inferior a 25 kg; igual o superior de 25 kg hasta 150 kg, en el que se aplican obligaciones diversas, que se relacionan con aquellas derivadas de la modalidad operativa; delimitando obligaciones normativas más sencillas para los VANT de menor dimensión y/o de uso experimental. Los siguientes párrafos tratan solo de los medios pertenecientes a la clase de peso inferior a 25 kg. En particular, existen dos subclases para esta última, la cual se subdivide en base al MOD (Masa operativa al Despegue), o sea el peso total del APR incluido todos los accesorio en el momento de su uso: la subclase VL (Very Light) agrupa los APR con MOD comprendido entre los 300 gramos y los 4 kg y la clase L (Light) incluye los APR con MOD superior a los 4 kg hasta los 25 kg.



Figura 6: Roadmap del Reglamento italiano ENAC - Medios aéreos con pilotaje remoto (fuente Dronezine).

1.4 NOTAS SOBRE EL REGLAMENTO ENAC

En el artículo 743 del Código de Navegación bajo la noción de “Nozione di aeromobile (Concepto de aeronave)” prevé: “...ogni macchina destinata al trasporto per aria di persone o cose. Sono altresì considerati aeromobili i mezzi aerei a pilotaggio remoto, definiti come tali dalle leggi speciali, dai regolamenti dell’ENAC e, per quelli militari, dai decreti del Ministero della Difesa...” (“... cualquier máquina diseñada para transportar personas o cosas por aire. Son considerados aeronaves los drones pilotados remotamente, definidos como tales por leyes especiales, por la Reglamentación del ENAC y los de uso militar, por los decretos del Ministerio de Defensa ...”).

Del artículo emerge que aeromodelo y VANT tienen reglas completamente diversas, pero físicamente son la misma cosa; por tanto, cualquier objeto radiocomandado, independientemente del peso, de los componentes a bordo (dentro de ciertos límites, visto que los aeromodelos por ley no pueden transportar sensores que lo califiquen como VANT) y en función de las prestaciones recaen indiferentemente en la noción de aeromodelo o de VANT según el uso que se realiza de los mismos. Si el uso es exclusivamente recreativo y/o deportivo se clasifica como aeromodelo, si se utiliza para cualquier otra cosa (trabajo, búsqueda e investigación, protección civil, etc.) será un VANT, con determinado vínculo normativo bastante diverso.

Esto implica que, los pilotos de VANT tienen que tener la responsabilidad civil (ser, por tanto, mayores de edad) y ser certificados como operadores de una entidad autorizada, mientras los aeromodelistas pueden ser menores de edad, no tienen la necesidad de ningún permiso que los certifique con la capacidad de volar, ni de visitas médicas y menos de aseguraciones (esta última es grandemente aconsejada).

1.4.1 APLICABILIDAD DEL REGLAMENTO

Conforme con el Reglamento del Parlamento Europeo y del consejo (CE) n. 216/2008, son de competencia de la ENAC los VANT de masa operativa al lanzamiento inferior a 150 kg y todos aquellos proyectados o modificados para trabajos de búsqueda, experimentos o científicos.

El VANT debe ser identificado a través de una tarjeta colocada en el mismo, reportando los datos identificativos del sistema y del operador; esta tarjeta debe

ser instalada también en la estación de tierra (radiocomando). Este procedimiento es esencial para identificar el verdadero propietario en caso de accidentes o también por la pérdida del dron. Desde el 1 de julio del 2016, junto a la tarjeta, el VANT debe tener un dispositivo electrónico de identificación que registre la transmisión en tiempo real de los datos relacionados con el VANT. De forma simplificada algunos parámetros que pueden ser considerados obligatorios son: altura, velocidad, datos de identificación del operador, etc. El reglamento en el art.5 define los límites de los instrumentos necesarios para definir los parámetros del vuelo, declarando que los VANT *“devono essere equipaggiati con i dispositivi/sistemi necessari per l’effettuazione delle operazioni previste in accordo alle regole dell’aria applicabili e in funzione degli spazi aerei impegnati”* (debe estar equipado con los dispositivos/sistemas necesarios para llevar a cabo las operaciones previstas de acuerdo con las normas aéreas aplicables y de acuerdo con los espacios aéreos contratados). Estos deben, por tanto, equiparse con un sistema idóneo para señalar la altura (GPS, barómetro, etc.), con el objetivo de garantizar un control de la altura. En cambio, para las operaciones realizadas en condiciones VLOS⁴, el piloto al mando de un VANT debe ser visible y claramente identificable de inmediato (por ejemplo, la normativa prevé un abrigo de alta visibilidad con la escritura Piloto APR). El reglamento define en cambio que todos los VANT deben ser dotados de un Manual de Vuelo (o documento equivalente), o sea de un documento redactado de la actividad experimental⁵ en la cual están incluidas sus características y performance habituales y contener los procedimientos a realizar en caso de anomalías y de emergencias.

1.4.2 OPERACIONES CRÍTICAS Y NO CRÍTICAS

La actividad con los VANT está dividida en *“actividad experimental”* (dedicada a la investigación y desarrollo del sector) y de *“operaciones especiales”* (para la prestación de servicios de bases profesionales).

A su vez las operaciones especiales vienen divididas en críticas y no críticas. Por operaciones especiales no críticas se entienden aquellas operaciones realizadas en VLOS⁴ que no prevén el sobrevuelo, aunque en caso de averías y mal funcionamiento, de:

- áreas congestionadas, concentraciones de personas, aglomeraciones urbanas;
- infraestructuras sensibles.

Antes de iniciar una eventual operación no crítica, el operador debe presentar a la ENAC la declaración que certifique la correspondencia a los requisitos solicitados en el Reglamento e indique las condiciones y los límites aplicables a las operaciones de vuelo previstas, incluso (eventualmente) la necesidad de operar en espacios aéreos segregados. La declaración⁶ es enviada por el operador utilizando exclusivamente el acceso al sitio web de la entidad (www.enac.gov.it), proveyendo las informaciones y datos previstos en el procedimiento, incluso los datos de la tarjeta identificativa del VANT. En este caso, es el operador responsable de evaluar el riesgo asociado con las operaciones y la continuación de las condiciones que hacen que las operaciones no sean críticas; es el operador que se responsabiliza por lo que declara, pero también por haber verificado que los conductores tienen las calificaciones requeridas.

Por operaciones especiales críticas se entiende aquellas operaciones que no respetan, aunque solo parcialmente, todo lo previsto en el art. 9, inciso 1 del reglamento. En este tipo de operaciones es al contrario las Autoridades, quienes analizan todo lo que viene declarado y autorizan a los operadores y/o pilotos. Se pueden llevar a cabo operaciones críticas especializadas donde se garantice un nivel de seguridad consistente con la exposición al riesgo, con referencia a las operaciones generales de la aviación. El nivel de seguridad de tales operaciones está determinado por el conjunto de contribuciones previstas por el VANT, el piloto, de los procedimientos operativos y de gestiones de la actividad de vuelo, de las condiciones ambientales y de los otros elementos esenciales para determinar un empleo seguro de estos medios, incluso la correcta actuación del programa de mantenimiento. El sistema en su totalidad debe por tanto asegurar un nivel de confianza mínimo compatible con el cuadro delineado arriba y adecuado al consentimiento de apropiados niveles de seguridad en relación con la tipología de operaciones.

Las restricciones para este tipo de operaciones son fuertemente vinculadas: el VANT debe estar dotado de un medio de terminación del vuelo cuya funcionalidad sea independiente del sistema primario de comando. El sobrevuelo de áreas urbanas bajo condiciones VLOS está permitido solo para los VANT que demuestren un aceptable nivel de seguridad⁷, mientras que el sobrevuelo de aglomeración de personas, desfiles, eventos deportivos o formas de entretenimiento relacionadas o

en cualquier caso de áreas donde ocurren concentraciones inusuales de personas está en cualquier caso prohibido.

A tal propósito, en la revisión del ENAC, en la sección 8.11 dedicada a las operaciones críticas, el reglamento especifica que: *“Per soddisfare la probabilità di occorrenze di avarie del sistema, si possono effettuare scelte opportune di progetto finalizzate all’irrobustimento dell’architettura, con uso di ridondanze nei sistemi e/o nel data link, uso di tecnologie dissimilari, utilizzo di sistemi con caratteristiche di affidabilità note e elevate, appropriati livelli di qualificazione del software e dei dispositivi complex hardware, e impiego di sistemi di terminazione del volo. L’uso di architetture dissimilari rispetto ai sistemi di controllo manuale ed automatico possono costituire metodi utilizzabili per soddisfare il requisito, purché soddisfino caratteristiche di indipendenza”*.

Será, por tanto, necesario reforzar la arquitectura hardware del dron; como, por ejemplo, un doble sistema de pilotaje que, a través de una tarjeta de control sea en grado de habilitar, según criterios automáticos o comandos manuales del piloto, el segundo sistema de emergencia. Existen ya varios ejemplos en Italia, ya algunas grandes marcas como DJI incluso tienen inmerso en el mercado tarjetas de vuelo *tri-dondanti*, mejorando tanto las características del vuelo como del entero sistema.

Las operaciones especiales conducidas con VANT de masa operativa al despegue menor o igual a 2 kg son considerados no críticos en todos los escenarios operativos, a condición de que los aspectos proyectuales y las técnicas constructivas de los APR tengan características inofensivas, precedentemente aceptada de la ENAC o de sujetos aceptados por ellos. Como anteriormente dicho, en conjunto con todo lo reflejado en el art. 10, inciso 7 del presente Reglamento, está prohibido el sobrevuelo de asentamientos de personas, por cortejos, manifestaciones deportivas o diversas formas de espectáculos o en todo caso de áreas donde se verifiquen concentraciones inusuales de personas. Para la realización de las operaciones, es suficiente que la APR sea pilotada por personas que posean un Certificado válido. La última revisión de la norma, es que las operaciones especiales conducidas con un APR de masa al despegue menor o igual a 0,3 kg con partes rotatorias protegidas de impactos accidentales (para-hélice) y con velocidad máxima menor o igual a 60 km/h, son considerados no críticos en todos los escenarios operativos y el piloto no tiene la necesidad de tener un Certificado, pero debe por lo tanto garantizar que las operaciones sean realizadas

con la revisión de las reglas de circulación y con la máxima seguridad. También en este caso está siempre prohibido el sobrevuelo de asentamientos de personas.

1.4.3 OPERACIONES EN VLOS, EVLOS Y BVLOS

En las operaciones en VLOS el piloto debe estar en grado de mantener el contacto visual directo con el APR, de forma tal que pueda monitorear el perfil de vuelo cuidándolo de otros aeromóviles, personas, embarcaciones, vehículos e infraestructuras al fin de evitar coaliciones. Las operaciones en VLOS están consentidas, hoy día, hasta una altura máxima de 150 m y una distancia máxima horizontal de 500 m, y deben ser conducidos de forma segura y sin provocar daños a terceros. Distancias y alturas superiores pueden ser valoradas y, si en caso, autorizada por la ENAC a continuación de la presentación de adecuadas valoraciones del riesgo por parte del operador VANT. En caso de pérdida del contacto visual del VANT, dentro de los límites horizontales y verticales concebidos, el piloto debe finalizar el vuelo lo antes posible (con el finalizador de vuelo). En el caso en donde el área de trabajo sea menor que la dimensión de la zona franca mínima requerida se puede considerar agregar medios físicos de retención, algunos cables que anclan al suelo el APR, impidiendo la salida de la zona franca. Para escoger el cable a utilizar (tipo de material, largo y diámetro), deben ser consideradas las peores condiciones de vuelo posibles para el APR (máxima velocidad operativa, máxima velocidad del viento admitido y máximo peso). La fuerza máxima que el APR puede aplicar contra el cable mismo viene expresada:

$$F = m * V * \sqrt{\frac{E * A}{L * m}} \quad (1)$$

E = Módulo de elasticidad de tracción o de Young [N/m²].

A = Sección del cable [mm²].

L = Largo del cable [m].

m = Masa máxima del APR [Kg].

V = Vel. Operativa máxima del APR (v₀) + Vel. Viento máxima [m/s].

A excepción de lo prescrito en el inciso 6, las operaciones de los VANT no pueden ser conducidas al interno de los ATZ de un aeropuerto ni en las áreas aledañas a las trayectorias de despegue o aterrizaje o bien a una distancia inferior a los 5 km del aeropuerto (APR o coordenadas geográficas publicadas), donde no sea instituida una ATZ para proteger el tráfico del aeropuerto.

Las operaciones de los VANT al interno de los CTR están concebidas exclusivamente a los sistemas con medios aéreos de masa operativa al despegue inferior de 25 kg, hasta una altura máxima de 70 m y hasta una distancia máxima en el plano horizontal de 200 m.

En las áreas por debajo de las trayectorias de despegue y aterrizaje más allá de los límites de los ATZ y hasta 15 km del aeropuerto, el límite de altura es fijado a 30 m. En las operaciones en EVLOS (Extended Visual Line Of Sight), realizadas dentro de los límites horizontales y verticales VLOS o más allá de estos límites, si está autorizado, el piloto retiene la responsabilidad de evitar colisiones, adoptando métodos alternativos para mantener el contacto visual con los VANT.

Esta responsabilidad se puede cumplir a través de la observación visual a través del uso de observadores adicionales y/o estaciones de pilotaje suplementarios. Las operaciones de EVLOS pueden realizarse siguiendo la autorización específica de ENAC y de acuerdo con los mismos procedimientos y con las mismas limitaciones que las operaciones en VLOS, o de acuerdo con lo establecido del art. 24.

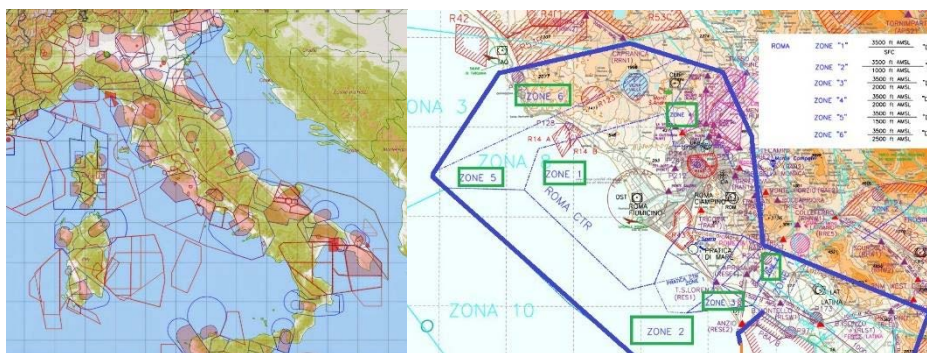


Figura 7: Espacio aéreo italiano (sx) y CTR de Roma (dx) (Fuente: Enac).

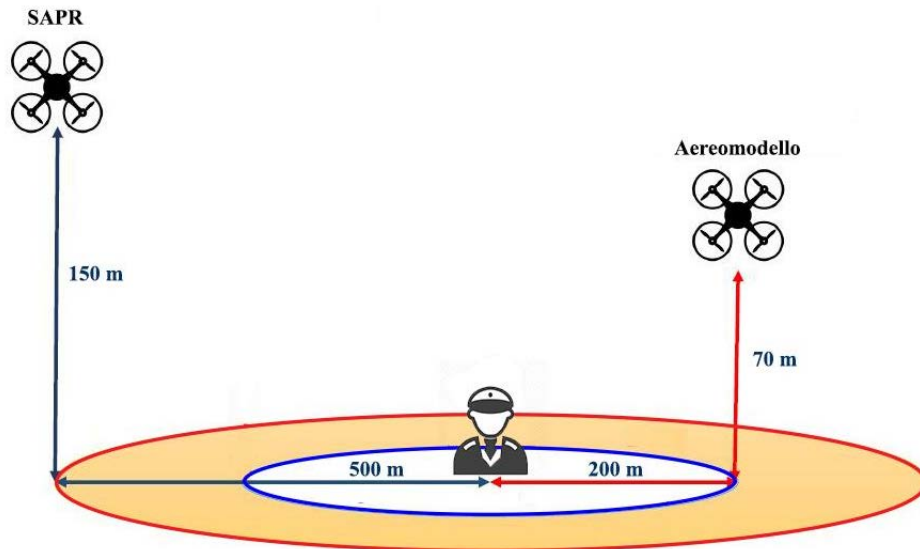


Figura 8: Espacio aéreo permitido para un VANT y para un aeromodelo (fuente Dronezine).

Las operaciones en BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) se llevan a cabo más allá de los límites horizontal y vertical de VLOS, es decir, a distancias tales que los procedimientos para evitar colisiones por observación visual no se pueden aplicar. Las operaciones en BVLOS requieren sistemas y procedimientos para mantener la separación y evitar colisiones que requieren la aprobación de ENAC. Las operaciones en BVLOS pueden necesitar el uso de espacios aéreos segregados (temporal o permanente), quedando firmes las limitaciones y las condiciones de uso identificadas en la ENAC, en función del tipo de operaciones y los resultados de la evaluación de riesgos realizada por el operador del VANT.

1.5 LA NORMATIVA FAA

La FAA (Federal Aviation Administration), la Autoridad americana para la Aviación Civil, en el mes de febrero del 2015, dispuso una propuesta de ley (Part 107), entrada en vigor en junio del 2016, para el uso de los drones con fines comerciales, aplicable solo a los vehículos registrados en el territorio estadounidense teniendo un peso inferior a las 55 libras (25 kg) empleados para

el desarrollo y la toma de datos de actividades no recreativas. Las limitaciones impuestas por susodicha propuesta son numerosas y en particular se dice que el dron tendrá que tener, un peso inferior a las 55 libras (25 kg) y tendrá que permanecer siempre dentro de la línea de visual del operador. El UVS, además, podrá ser utilizado solo durante las horas de la mañana y en presencia de una visibilidad atmosférica no inferior a las 3 millas (5 km). Otras limitaciones vienen impuestas en referencia a la altura de vuelo y de velocidad, previendo que el dron pueda alcanzar un máximo de 500 pies (152,4 m) y una velocidad de 100 millas por hora (161 km/h). La propuesta de la FAA prohíbe al operador de sobrevolar el dron sobre personas que no están vinculadas directamente con la actividad comercial realizada. La entidad federal está considerando la posibilidad de una nueva propuesta de ley con el objetivo de reglamentar una subcategoría de drones, denominados micro-drones, teniendo un peso no superior a las 4,4 libras (2 kg). Tales vehículos podrán ser utilizados hasta un máximo de 400 pies (120 m) de altura y dentro de los 1500 pies (457,2 m) de distancia con el operador. La velocidad máxima alcanzable por los micro-drones será de 35 millas por hora (56,32 km/h). Al contrario de los drones, a los micro-drones se les permitirá sobrevolar sobre personas que no estén directamente vinculadas con la actividad desarrollada por los mismos.

Se le solicita a los operadores de UVS la obtención de un certificado; para conseguir tal documento, el operador deberá tener una edad superior a los 17 años y deberá superar el test de conocimiento aeronáutico (examen, a diferencia no pedido en el caso de utilización de micro-drones) además tendrá que someterse a un control por parte de la Transportation Security Administration. El operador, obtenido el certificado, deberá someterse cada 24 meses a un examen para verificar sus conocimientos aeronáuticos.

El reglamento ENAC se asemeja a la normativa FAA. Si se enfrentan los sistemas normativos, aquellos pertenecientes a USA prevé más libertad y más responsabilidad para el operador, a diferencia del italiano que se presenta mayormente burocrático. Por ejemplo, desde el punto de vista del dron utilizado, para la FAA este deberá simplemente ser registrado, pero no será necesario un certificado de tipología del dron por lo que será suficiente una simple declaración del operador que confirma la idoneidad del dron para las operaciones previstas y la realización del control pre-vuelo (costo de registraci3n U\$S 5). Para la ENAC un dron dedicado a las operaciones no críticas es necesario el empleo de un

terminador de vuelo si se quiere lograr trabajar a una distancia mínima de 150 metros de edificios y zonas pobladas. Desde el punto de vista de los requisitos del vuelo, la FAA (como la ENAC), admite sólo vuelos conducidos a vista (VLOS) con cota máxima de 150 metros, no pueden sobrevolar personas no vinculadas directamente en las operaciones. Se puede volar prácticamente por todas partes, pero en los espacios aéreos (B-C-D-E), sea contactado anteriormente el controlador de vuelo de la zona ATC. ENAC en cambio prevé para vuelos en operaciones críticas, como aquellas efectuadas en escenarios urbanos, es necesario estar al menos a 8 km de distancia de los aeropuertos, lejos de las sendas de acercamiento, y al menos a 150 metros de edificios y 50 metros de personas no vinculadas a las operaciones.

1.6 VANT PARA LA FOTOGRAMETRÍA

Por fotogrametría de VANT, o por fotogrametría de rango cercano, se entiende una plataforma de medición fotogramétrica, que opera por control remoto en modo semiautomático o automático, transportada de un dron con pilotaje remoto, y por tanto sin piloto a bordo. El sistema está dotado de un sensor fotogramétrico, que puede incluir en paralelo también otras tipologías de sensores (cámaras térmicas o multispectrales, sistemas LiDAR). Las innovaciones tecnológicas de la última década sobre los medios y sobre la miniaturización del sensor, ha abierto diversas y nuevas aplicaciones que explotan la ventaja de la corta distancia y de la rápida adquisición de datos, combinando por ejemplo, la fotogrametría terrestre con la aérea.

La fotogrametría de VANT puede ser utilizada en aplicaciones con media y gran escala. El precio del sistema puede variar al interno de algunos órdenes de grandeza, en dependencia de la complejidad del sistema y de los sensores instalados a bordo. Las principales ventajas de los VANT respecto a los clásicos sistemas aéreos, están ligados a la ausencia de personal a bordo, por lo tanto, limitado el riesgo expuesto en áreas peligrosas, como sitios de desastres naturales o áreas inaccesibles. En las áreas en donde el acceso es difícil y donde no es posible el vuelo de proximidad por parte de aeronaves con personal a bordo, como por ejemplo cerca de casas o edificios, los VANT con frecuencia resultan ser de la única alternativa práctica. Sobre todo en aplicaciones a escalas intermedias, donde los costos de adquisición de datos primarios desde aeronaves con pilotos

son excesivos, los UAV son una útil alternativa, que conserva la ventaja de la rapidez en la fase de adquisición de los datos a diferencia de las alternativas de uso de sistemas terrestres. Otra ventaja con fines fotogramétrico es la reducida distancia al objeto, por lo cual se logra una mayor resolución en el modelo final. La implementación a bordo de sistemas GPS/INS con tableros para el control del vuelo más sofisticados, permiten vuelos precisos tales de garantizar una cobertura aérea y un solapamiento de las imágenes suficientes para generar modelos 3D aerofotogramétricos.

En comparación con la fotogrametría aérea clásica, que sigue siendo la única alternativa para el mapeo a gran escala, los VANT tienen un reducido payload, lo que no permite la instalación de sensores de alta calidad. En general, a medida que aumenta el peso de una cámara, aumenta la calidad de sus elementos internos (piense en el sistema de vidrio y espejos, que es un objetivo). Otro factor limitante es el viento; normalmente un viento por encima de los 30-40 Km/h hace particularmente inestable el movimiento de un VANT en altura, que en casos extremos pueden conducir a la caída. La frecuencia de radio para la comunicación entre estación de control y el VANT puede ser sujeta a interferencias provocadas por motivos externos, como antenas de radio y televisión o de telecomunicaciones, que utilizan la misma frecuencia, o en cambio sufrir una alteración de la señal. Por tanto, en dependencia de la situación local del área de interés, la frecuencia para la comunicación entre telecomando y el dron debe ser seleccionada atentamente, actualmente, los VANT están controlados con conexiones radiales 2.4Ghz, mientras el enlace de video está puesto en la frecuencia de 5Ghz.

M. Limongiello - Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas

2 LOS RECIENTES DESARROLLOS DEL PARADIGMA FOTOGRAMÉTRICO

2.1 BREVE HISTORIA DE LA FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es aquella disciplina a través de la cual es posible reconstruir la forma geométrica de un ambiente territorial, urbano o arquitectónico, a través de una o más imágenes fotográficas. Una definición significativa es aquella reportada en el libro de K.B. Atkinson del 2001 en la cual la fotogrametría viene descrita como “la ciencia y el arte de determinar la dimensión y la forma de objetos como resultado del análisis de imágenes registradas en una película o en un soporte electrónico”.

Para buscar cómo encuadrar mejor la relación entre la fotogrametría y la fotomodelación es útil hacer algunas consideraciones de carácter histórico. Los orígenes científicos de la fotogrametría surgen a finales del mil ochocientos con numerosos campos aplicativos desarrollándose a partir de los primeros años del mil novecientos. La fotogrametría, nacida como rama de la fotogrametría descriptiva, utiliza principios y conceptos propios de la geometría proyectiva a través de la cual es posible indagar las relaciones biunívocas que se establecen entre una realidad tridimensional y su representación bidimensional. A parte las aplicaciones de orientación fotográfica referidas al denominado problema inverso de la perspectiva, la fotogrametría está esencialmente basada en la visión estereoscópica. Ya en las primeras aplicaciones se diferencia la fotogrametría terrestre de aquella aérea; la fotogrametría aérea ha encontrado enseguida una amplia difusión en la realización de los mapas a través de los estereorestituidores analógicos, mientras la fotogrametría terrestre para el levantamiento de arquitecturas a menudo ha quedado relegada en el campo de la restitución a la perspectiva de fotograma único. Hubo que esperar al desarrollo de la fotogrametría analítica de los años 70 para registrar un importante salto de cualidad en la fotogrametría arquitectónica (considerada

una actividad altamente especializada, ya sea por los costos de los equipos como por la necesidad de una específica instrucción del personal).

La fotogrametría analítica usada entre los años 70 y los años 90 utilizaba un estereorestituidor analítico acompañado de un PC y software dedicado, junto con la dotación de la cámara métrica. En esta configuración la computadora no era el componente principal, era simplemente un recolector de datos que venían generados desde el estereorestituidor. La transición de la tecnología analítica a la digital tuvo lugar al principio en dos pistas paralelas pero con diferentes velocidades. En una línea se llevó a cabo la informatización del proceso de estereorestitución: sucedió que la computadora anteriormente relegada a un simple asistente reemplazó por completo al estereorestituidor; en la otra línea, hemos sido testigos del abandono lento pero inexorable del halogenuro de plata fotosensible (la llamada película), utilizada durante más de un siglo.

La fotogrametría digital, inicialmente anclada a las propias metodologías de la fotogrametría analítica, ha adoptado una propia connotación gracias a la adquisición de técnicas automáticas desarrolladas en el ámbito de la Computer Vision, aquella disciplina que analiza y reinterpreta en clave informática la geometría proyectiva de la visión.

Se abre así un nuevo campo de investigación desde el momento en que, después de haber automatizado los procedimientos de orientación interior y relativa, de autocalibración, de configuración del modelo fotográfico digital, y de todos aquellos procesos que no necesiten algún tipo de conocimiento semántico de la escena, con el objetivo de la automatización de los procesos de restitución. Las técnicas automáticas para la identificación de los puntos homólogos se basan, además de la ayuda de la considerada geometría *epipolar* a través de la cual es posible reducir el espacio de búsqueda de las correspondencias entre puntos conjugados, también con algoritmos de última generación como el algoritmo SURF (Speeded Up Robust Features) o SIFT (Scale Invariant Feature Transform).

En esta fase, los conceptos básicos de la fotogrametría, sin cambios durante un siglo y medio, son de alguna manera "superados" por las nuevas instancias de la Computer Vision, y es quizás por esta razón que, algunos estudiosos vinculados al pasado, han atribuido a esta nueva tecnología un nuevo término, el de fotomodelación (*photomodelling*).

2.2 FUNDAMENTOS GEOMÉTRICOS

Por el término fotogrametría se entiende el conjunto de todos los procesos analíticos, gráficos y óptico-mecánicos a través de los cuales, dado un suficiente número de fotografías de un objetivo tomado de diversos puntos, es posible reconstruir el objeto o determinar su proyección. Desde un punto de vista topográfico de la representación, la fotogrametría sirve para pasar de un tipo de representación ligado a las imágenes a tablas arquitectónicas, o mejor de “perspectiva central” a “perspectiva ortogonal”. La principal diferencia que puede ser operada al interno de la fotogrametría resulta ser aquella entre la fotogrametría terrestre y la aérea: la fotogrametría terrestre viene identificada como fotogrametría de Close-Range (cercana o de rango cercano o de proximidad) y encuentra aplicaciones no solo en levantamientos arquitectónicos si no también en la descripción de fenómenos geomorfológicos, de laderas o a nivel industrial en el estudio de las deformaciones de probetas sometidas a sobrecargas inducidas con carácter experimental. Por fotogrametría aérea entendemos las adquisiciones fotográficas para producir mapas de cualquier tipo, desde una escala general y militar a pequeña escala, hasta cartas técnicas de escala mediana y grande.

2.3 PERSPECTIVA CENTRAL EN EL ESPACIO

Para reconstruir la posición y la forma de los objetos a partir de fotografías, necesitamos conocer las relaciones geométricas en las que se forman las imágenes. Los tomas fotogramétricas se pueden considerar rigurosamente con perspectiva geométrica central; en realidad, en un sistema óptico complejo, como en un objetivo fotográfico, esta es una aproximación porque no hay un solo centro unívoco.

Las relaciones entre coordenadas x e y de un punto imagen P' y las XYZ del correspondiente punto objeto P están expresadas en las ecuaciones:

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + x'_0 \\ y &= -c \frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + y'_0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde:

c = distancia focal;

x, y = coordenadas del punto imagen;

(x'_o, y'_o) = posición del punto principal;

(X_o, Y_o, Z_o) = posición de la cámara en el espacio;

(X, Y, Z) = coordenadas 3D de los puntos homólogos a aquellos medidos.

Las ecuaciones (1) en literatura vienen llamadas *ecuaciones de colinealidad* y expresan las circunstancias de que, para cada fotograma, el centro de toma O, el punto objeto P' y el punto imagen P en el fotograma están alineados en el mismo rayo de proyección r.

Los parámetros r_{ij} son elementos de la matriz de rotación R, que indica la estructura espacial del fotograma relativo al sistema de coordenadas objeto XYZ. Los elementos pueden ser expresados en función de las tres rotaciones (w, y, h). Derivando de las ecuaciones (1) las coordenadas objetos X e Y se obtiene:

$$X = x_o + (Z - Z_o) \frac{r_{11}(X-x'o) + r_{12}(Y-y'o) - r_{13}c}{r_{31}(X-x'o) + r_{32}(Y-y'o) + r_{33}c}$$

(2)

$$Y = y_o + (Z - Z_o) \frac{r_{21}(X-x'o) + r_{22}(Y-y'o) - r_{23}c}{r_{31}(X-x'o) + r_{32}(Y-y'o) + r_{33}c}$$

Las ecuaciones (1) muestran que a cada punto objeto le corresponde un punto imagen. Las ecuaciones (2) en cambio muestran que a causa de la presencia de la Z al segundo miembro, para cada punto imagen le corresponden por tanto infinitos posibles puntos objeto, resultando por tanto imposible reconstruir la geometría espacial de un objeto a partir de un solo fotograma. Es necesario disponer de un segundo fotograma del mismo objeto o de otras informaciones sobre las coordenadas Z (por ejemplo la pertenencia al mismo plano, y por tanto misma profundidad Z de la cámara, como cuando se rectifica la imagen). Las transformaciones definidas en la ecuación (1) necesitan el conocimiento de los siguientes parámetros: coordenadas imagen del punto principal (x_o, y_o) y la distancia focal (c). Estos tres parámetros vienen definidos en la literatura como parámetros *de orientación interior (O.I)* y definen la posición del centro de la

imagen. La posición de la cámara en el espacio (X_o, Y_o, Z_o) y los ángulos de rotación de la cámara (w_1, y_1, h_1), vienen definidos como parámetros *de orientación exterior (O.E)* y definen la posición y el orden de la cámara en el sistema de coordenadas objeto.

La definición de la perspectiva central representada por un fotograma, necesita en cambio un total de nueve parámetros (3 de O.I y 6 de O.E), que se pueden determinar en modos diversos. Los parámetros de orientación interior son constantes, características de la cámara, y vienen indicados por el constructor a través de mediciones en laboratorio. Los parámetros de orientación externa exterior pueden ser determinados mediante métodos topográficos.

2.4 ABERRACIONES ÓPTICAS RADIALES Y TANGENCIALES

La hipótesis adoptada de perspectiva central rigurosa donde el centro se encuentra a una distancia c del punto principal no es aplicable en los casos prácticos. De hecho, la óptica de la cámara fotogramétrica está constituida de objetivos de notable espesor, usualmente asimétricos. Las lentes están hechas de diferentes tipos de vidrios, para asegurar la mejor corrección posible de aberraciones. La teoría geométrica de los sistemas ópticos impone la presencia de dos planos principales H y H' (planos principales en el espacio objeto y en el espacio imagen). En el caso ideal, N es el centro de perspectiva O en el espacio objeto, N' es el correspondiente centro de perspectiva en el espacio imagen, coincidentes con los puntos ópticos principales (O para el espacio objeto y O' para el espacio imagen, fig. 9) en la hipótesis hecha los rayos centrales, pasan por los puntos nodales, forman con el eje óptico el mismo ángulo (t) sea en el espacio imagen como en el espacio objeto ($t=t'$).

El objetivo fotogramétrico real se diferencia notablemente del modelo ideal, en cuanto:

- El eje óptico no contiene los centros de curvatura de todos los lentes por lo que el eje de referencia fotogramétrico no es el eje óptico si no un eje calibrado perpendicular, en el espacio objeto, al plano del fotograma y pasando por el centro de la pupila de ingreso;

- los ángulos de incidencia de los rayos están definidos en el centro de la pupila de ingreso que no se encuentra en el plano principal. Por tanto los ángulos de refracción no son iguales a aquellos incidentes;
- la distancia principal efectiva no coincide con la distancia principal óptica;
- el plano imagen no es perpendicular al eje óptico.

En la calibración se genera un centro de perspectiva matemática O'_m colocado a una distancia perpendicular c de el punto principal y que reproduce los ángulos t lo más exacto posible (fig.10).

Las diferencias que aún queden, son imputadas a una serie de distorsiones, bajo el parámetro definido como distorsión óptica (D_r). Los efectos distorsivos se propagan desde el centro de la imagen radialmente.

La distorsión de barril es el defecto del objetivo que genera líneas rectas de la realidad como convexas desde el centro de la toma (usual efecto de un objetivo gran angular), la distorsión de cojín (o almohada) es el defecto opuesto, las líneas rectas se transforman en curvas cóncavas (típico efecto en los teleobjetivos, fig.11).

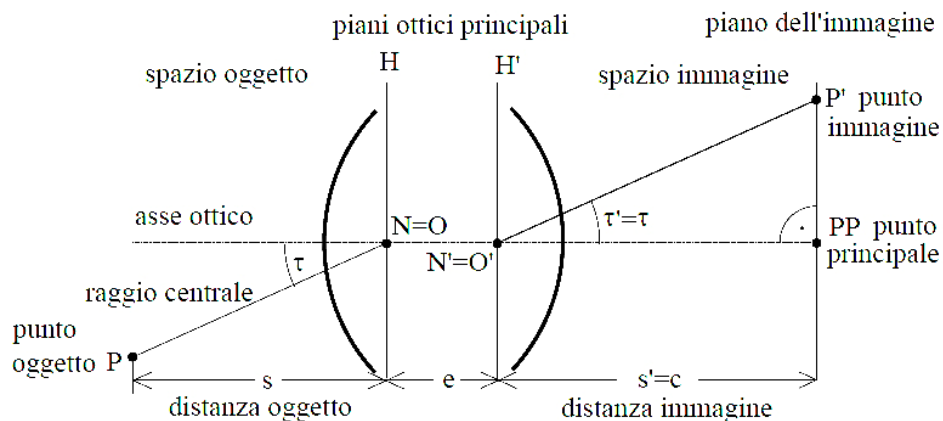


Figura 9: Construcción geométrica en un sistema óptico ideal (fuente: Kraus).

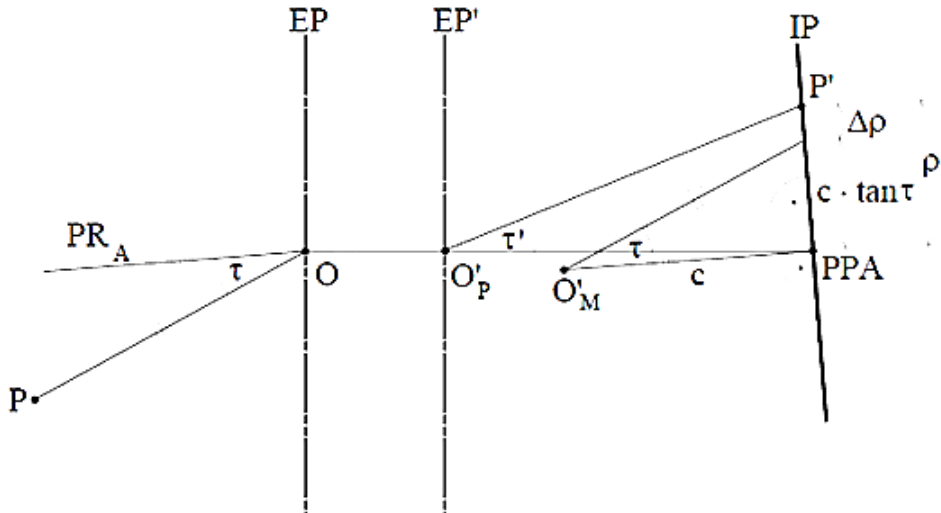


Figura 10: Definición del centro de perspectiva ficticio O'_m (fuente: Kraus).

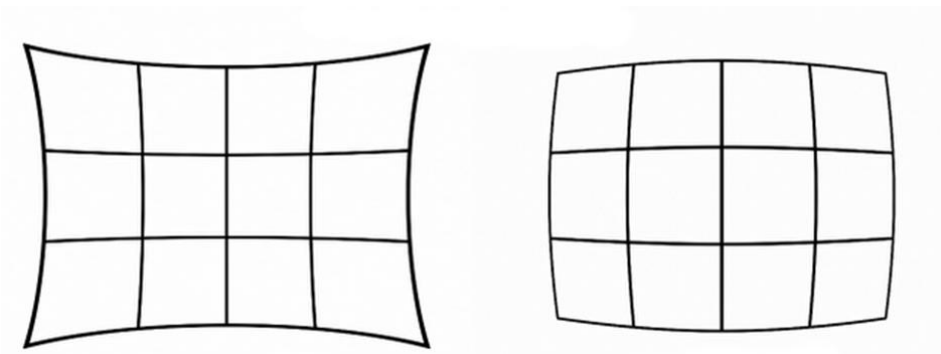


Figura 11: Efecto distorsionador a cojín o almohada (sx) y barril (dx).

2.5 ORIENTACIÓN INTERIOR (O INTERNA)

La calibración de cámaras de fotos y ópticas se va a insertar en la que es la primera fase del proceso de elaboración, producción y manutención de los productos cartográficos, o bien a la producción de las ortofotos necesarias para la restitución cartográfica a cualquiera escala necesaria para el trabajo. Los parámetros de orientación interior son conseguidos a través del procedimiento de calibración y consisten en la constante de la cámara c (o distancia focal), posición del punto

principal (x_0, y_0) y algunos parámetros adicionales (AP) usados para modelar eventuales errores sistemáticos, debido por ejemplo a la distorsión del lente. El método principalmente utilizado para calibrar una cámara digital es el *self calibrating bundle adjustment*, introducido en fotogrametría en los años setenta (Brown 1976). El modelo matemático utiliza las ecuaciones de colinealidad, incluidos los parámetros adicionales Δx y Δy , para modelar posibles errores sistemáticos presentes dentro de la cámara, y consta de 10 parámetros:

- orientación interior de la cámara $(\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta c)$;
- incertidumbre sobre la forma del pixel (skew factor S_x);
- no ortogonalidad del sistema de referencia (shear factor Λ);
- distorsión simétrica radial de las lentes (k_1, k_2, k_3) ;
- distorsión tangencial de las lentes (p_1, p_2) .

Según este modelo los términos de corrección Δx y Δy que comparecen en las ecuaciones de colinealidad mayormente asumen las siguientes expresiones:

$$\Delta x = \Delta x_0 + \frac{\Delta c}{c} \acute{x} + \acute{x} S_x + \acute{y} A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \acute{x} + p_1 (r^2 \acute{x}^2) + 2p_2 \acute{x} \acute{y}$$

$$\Delta y = -\Delta y_0 + \frac{\Delta c}{c} \acute{y} + \acute{x} A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \acute{y} + 2p_1 \acute{x} \acute{y} + p_2 (r^2 + 2\acute{y}^2)$$

$$\acute{x} = x - x_0; \acute{y} = y - y_0; r^2 = \acute{x}^2 + \acute{y}^2 \quad (3)$$

Todos los términos del sistema de ecuaciones (3), pueden ser atribuidos a errores debidos a causas físicas reales, por esto el sistema toma el nombre de “modelo físico.”

Hasta ahora hemos asumido que al menos los parámetros interiores de las cámaras fotográficas fueran conocidos. En ausencia de los parámetros de calibración, como a menudo ocurre en las reconstrucciones tridimensionales, la estructura de la escena puede ser conocida a menos que la proyectividad sea incógnita. Antes de fijar las técnicas fijamos la notación, aclarando los términos del problema y la ambigüedad de la solución. Consideramos un conjunto de puntos 3D, visto de m cámaras fotográficas con matrices $\{P_i\}_{i=1\dots m}$. Sean m_i^j

le las coordenadas homólogas de la proyección del j -ésimo punto en la i -ésimo cámara fotográfica. El problema de la reconstrucción puede ser puesto en el siguiente modo: dado el conjunto de las coordenadas píxel m_i^j encontrar el conjunto de las MPP de las cámaras fotográficas y la estructura de la escena tal que:

$$m_i^j \cong P_i M_j \quad (4)$$

La matriz P representa el modelo geométrico de la cámara fotográfica y es llamada matriz de la cámara fotográfica o matriz de proyección perspectiva (MPP). Sin más restricciones, generalmente obtendremos una reconstrucción definida sin una perspectiva arbitraria. La matriz fundamental se puede calcular a partir de las correspondencias de al menos ocho puntos. Aunque de una reconstrucción proyectiva se puedan obtener algunas informaciones útiles (Robert y Faugeras, 1995), lo que querríamos conseguir es una reconstrucción euclidiana de la estructura, que difiere de la estructura verdadera para una similitud. Esta última está compuesta de una transformación rígida (debida a la elección arbitraria del sistema de referencia mundial) más un cambio uniforme de escala (debido a la bien conocida ambigüedad profundidad-velocidad). Dichosamente, si algunas condiciones razonables son satisfechas (por ejemplo al menos tres cámaras fotográficas y parámetros interiores constantes) es posible pasar a la estructura euclidiana o bien la que conseguimos por medio del calibrado de la cámara. Tal proceso toma el nombre de autocalibración. Esto ocurre por dos caminos diferentes: podemos partir de la reconstrucción proyectiva y por lo tanto promoverla a euclidiana, o bien podemos recobrar los parámetros internos a partir de las matrices fundamentales y reconducirnos al caso calibrado. Solucionar un self-calibration con bundle adjustment significa estimar los parámetros adicionales en las ecuaciones y al mismo tiempo los parámetros de orientación exterior de cada imagen y las coordenadas objeto de los puntos a través de la colimación de un cierto número de puntos homólogos en todas las imágenes. Aunque Brown indica 10 APs, hoy no todos estos parámetros vienen considerados porque modelan errores que se pueden asumir ausentes o en todo caso irrelevantes. Entre estos, por ejemplo, no será considerado el skew factor S_x , porque los sensores digitales modernos presentan una relación entre los lados 1:1 (o bien 1 pixel es cuadrado).

2.6 ORIENTACIÓN EXTERIOR (EXTERNA)

Conocer la orientación exterior significa obtener los 12 parámetros por cada modelo: estas 12 incógnitas pueden ser obtenidas a través del apoyo en tierra, notas las coordenadas del terreno de algunos puntos, así pueden ser linealizadas las ecuaciones de colinealidad y solucionarlas sucesivamente con un procedimiento de mínimos cuadrados.

Como hemos visto en las ecuaciones (2), a causa de la presencia de la Z en el segundo miembro, para cada punto imagen existen infinitos puntos objetos. Se reitera por lo tanto que es imposible reconstruir la geometría espacial de un objeto teniendo a disposición solo un fotograma. Se necesitan por tanto al menos dos fotogramas y 4 ecuaciones de colinealidad. Por medio de la calibración de la cámara, o sea de la orientación interna, se conoce la posición del centro de proyección y del plano imagen. Se indican con X_i, Y_i, Z_i las coordenadas objeto de los centros de toma y con y_i, w_i, h_i los ángulos de rotación, cada fotograma tiene 6 parámetros de orientación exterior que definen su posición y su orden en el sistema de coordenadas objeto. La definición de la perspectiva central necesita por tanto un total de 9 parámetros (3 de orientación interior y 6 de orientación exterior) que pueden ser determinados midiendo las coordenadas objeto de al menos tres puntos ubicados en la zona de solape entre fotogramas; haciendo esto es posible escribir las 4 ecuaciones que expresan para cada uno de ellos las coordenadas de colinealidad. Tendremos por tanto 12 ecuaciones que contienen 12 incógnitas ($X_1, Y_1, Z_1, w_1, y_1, h_1, X_2, Y_2, Z_2, w_2, y_2, h_2$), resolviendo el sistema encontraremos los parámetros de la orientación exterior. Es posible sin embargo dividir el problema en dos partes, es decir obteniendo primeramente 5 incógnitas independientes del datum y a continuación las otras 7 que dependen solo del datum. La primera operación se llama orientación relativa, la segunda orientación absoluta.

Para obtener 5 incógnitas independientes del datum en un problema de 12 incógnitas, la solución es fijar arbitrariamente el datum, es decir, fijar todos y sólo siete parámetros dependen del sistema de referencia que se desea fijar. Estos siete parámetros pueden ser vistos como los seis grados de libertad de un cuerpo rígido (una tierra cartesiana ortogonal) en el espacio ($X_1, Y_1, Z_1, w_1, y_1, h_1$) más un factor de escala λ . Son estos los parámetros que permiten pasar de este sistema arbitrario (X, Y, Z) al sistema externo (E, N, Q) por medio de una roto-traslación con variaciones de escala.

2.7 GEOMETRÍA EPIPOLAR

Del esquema físico, existe una relación que une dos imágenes de una misma escena obtenida por dos cámaras diversas o de la misma cámara fotográfica en movimiento. En particular, dado un punto m en la primera imagen, existe un vínculo geométrico de su similar m' en la segunda imagen. Algunas simples consideraciones geométricas indican que el punto similar de m tiene que yacer sobre una línea recta en la segunda imagen, llamada *recta epipolar*. La geometría epipolar es importante sobretodo porque describe la relación entre dos imágenes de una misma escena, pues es básica en cualquiera de las técnicas de la Computer Vision basadas en más de una imagen.

Dado un punto de m en la primera imagen su correspondiente m' en la segunda imagen está vinculado a yacer sobre la intersección del plano imagen con un plano determinado de m , C y C' denominado plano epipolar; esto ya que el punto m' puede ser la proyección de cualquier punto en el espacio yacente sobre el rayo óptico de m . Se observa entre otros que la redes epipolares de una imagen pasan todas por el mismo punto, dicho epipolo, y los planos epipolares constituyen un conjunto de planos que tienen en común la recta pasante por los puntos de vista C y C' .

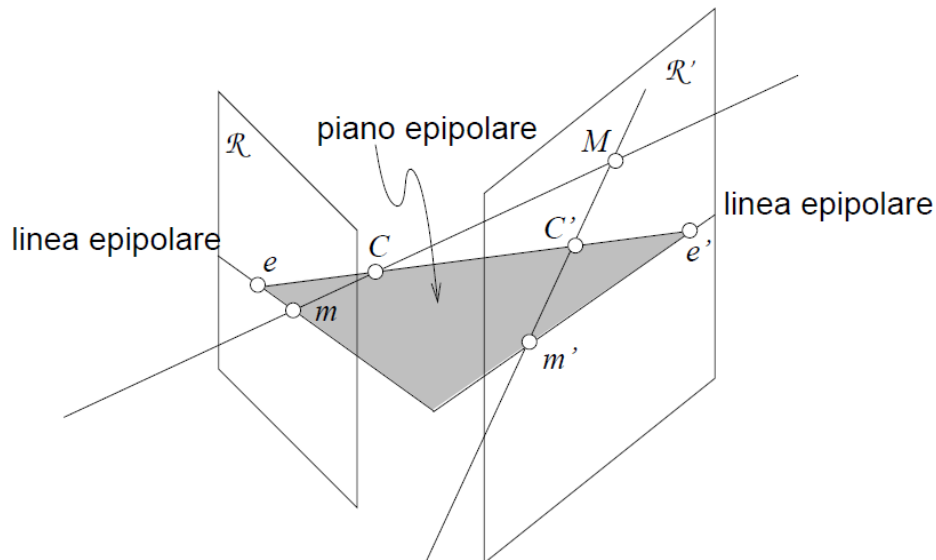


Figura 12: Representación de la geometría epipolar (fuente: Computer Vision).

2.8 IMÁGENES DIGITALES

En una cámara fotográfica digital el sensor está constituido por una matriz CCD (Charge-Coupled Device) o CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Un CCD mide alrededor de 50 mm^2 y contiene un orden de 10^6 elementos. Podemos ver esta última como una matriz $n \times m$ celdas rectangulares fotosensibles, cada una de estas convierte la intensidad de la radiación luminosa incidente en potencia eléctrica. Los elementos de la matriz toman el nombre de pixel (picture element). Una vez fijado un determinado sistema de referencia, es posible asociarle directamente a cada pixel las coordenadas (en este caso coordenadas imagen). En fotogrametría el sistema de referencia (x_i, y_i) que se encarga de identificar métricamente los píxeles de las imágenes digitales está definido según la siguiente conversión:

- Eje x paralelo a lado superior de la imagen digital orientado a la derecha;
- Eje y paralelo al lado izquierdo de la imagen y orientado hacia la parte inferior;
- Origen en la esquina superior izquierda de la esquina superior izquierda de la imagen digital.

Si en la fotogrametría clásica analógica el dato primario desde el que comenzamos todos los procesos de cálculo era la fotografía, con la llegada de la imagen digital se pasó al uso de estos últimos haciendo surgir una nueva rama de la fotogrametría llamada fotogrametría *digital*.

Existen también diferencias desde el punto de vista operativo. En fotogrametría analógica es el operador quien localiza autónomamente los puntos necesarios para la orientación y la restitución, colimándolos y midiéndoles las coordenadas. La fotogrametría digital en cambio también puede valerse de procedimientos automáticos de colimación y medición de puntos característicos.

Este aspecto resulta fundamental en cuanto a la utilización de algoritmos que permitan alcanzar un elevado grado de autonomía en numerosas fases del proceso fotogramétrico reduciendo los tiempos de elaboración y por lo tanto al mismo tiempo también los costes de producción.

Al interior de una imagen raster, se encuentran siempre dos tipos de resoluciones: la *resolución geométrica* y la *resolución radiométrica*.

La resolución geométrica de una imagen digital está ligada a las dimensiones del píxel; estas están directamente ligadas a la densidad de discretización. La resolución indica el número de píxel contenidos en una oportuna unidad de largo que generalmente viene expresada en píxels per inch (dpi) o puntos por pulgadas⁸. Establecida la resolución de adquisición es posible calcular la dimensión del píxel correspondiente según la relación:

$$d_{\text{píxel}} [\mu\text{m}] = 25400/\text{dpi}$$

De la resolución de la imagen depende la correcta visualización de los detalles más pequeños y la precisión geométrica alcanzable durante las operaciones de orientación interior y externa.

El modo óptimo para valorar la resolución geométrica de una imagen digital es tomar en consideración el área real de superficie de la imagen, proyectada sobre el plano focal y por lo tanto sobre el sensor, que cubre la superficie de un píxel; tal área es llamada Ground Sampling Distance (GSD):

$$GSD_{(mm)} = l * \frac{H}{c}$$

Donde:

H: distancia de toma (altura de vuelo) [mm],

c: distancia focal de la cámara [mm],

l: dimensión del lado del píxel [mm].

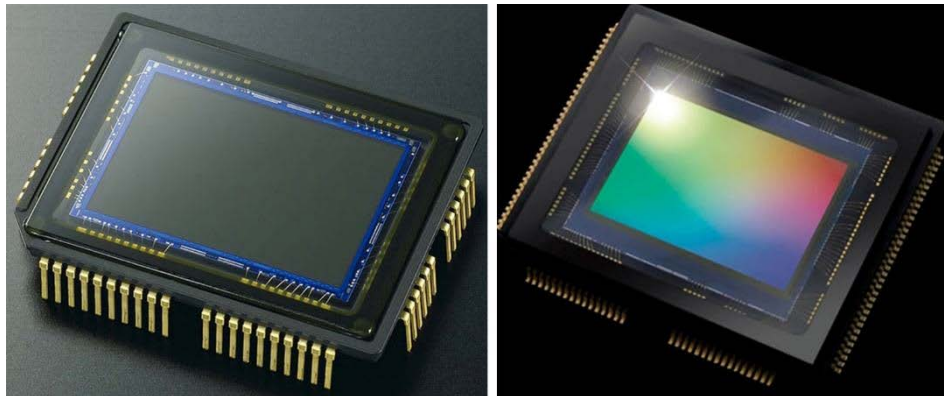


Figura 13: Sensor CCD (sx) e CMOS (dx).

A igual distancia del objeto, la resolución de una imagen es mucho mayor cuanto más pequeña es la dimensión del pixel del sensor: mayor es el número de píxeles, por lo tanto la imagen reproduce de modo más fiel la realidad.

La resolución radiométrica es la transformación aplicada a la intensidad de la señal luminosa, percibida por el sensor, en un valor numérico entero llamado Digital Number (DN). El DN es memorizado por cada pixel proveyendo el valor radiométrico de la porción de imagen ocupada. Existen muchos tipos de resolución radiométrica en función del tamaño imputable al DN y por lo tanto al tipo de imagen que se quiere conseguir. Si la imagen tiene que representar un objeto en blanco y negro, por lo tanto constituida por solo 2 colores, la radiometría puede ser expresada por dos números enteros: 0 para el blanco y 1 para el negro. Si se quiere representar una imagen en blanco y negro, pero más detallada a tonos de grises, el valor del DN es un valor entre 0 y 255 donde el cero es correspondiente al negro y el 255 al blanco. Si la imagen digital tiene que representar un objeto a colores, imágenes True Color (RGB, rojo-verde-azul), cada color es la superposición de tres colores fundamentales. La saturación de cada uno de los tres colores es representada por un valor incluido entre 0 y 255. Luego la radiometría de un pixel es representada por los tres números que expresan las saturaciones de los tres colores fundamentales. Los softwares fotogramétricos derivados de los fundamentos de la Computer Vision, emplean algoritmos que miden la correspondencia entre los píxeles sobre la base de los niveles de intensidad radiométrica. Las imágenes son convertidas en niveles de gris y consecuentemente son aplicados algoritmos de búsqueda que valoran el nivel de correspondencia o bien la similitud de los niveles de grises.

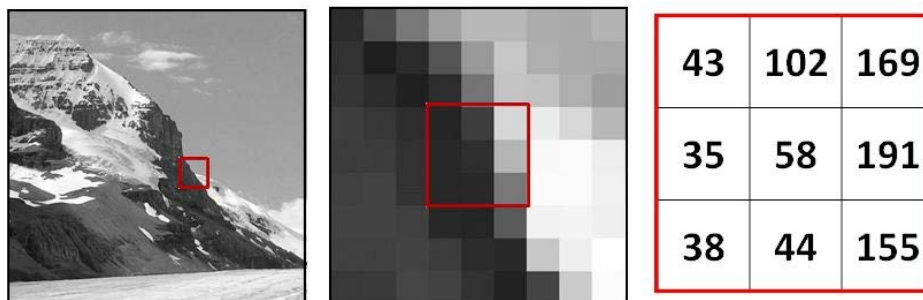


Figura 14: Información radiométrica en una imagen (8 bit)

Por cada posición x de los píxeles en la primera imagen es definida un dominio en la segunda imagen, (representada por el área de búsqueda), en el que es computado el nivel de correspondencia y por lo tanto seleccionado el pixel con el mayor parecido.

En los párrafos siguientes serán descritos en detalle los algoritmos utilizados para la individuación de los Keypoint y Tie Point a través de correlaciones automáticas.

2.9 STRUCTURE FROM MOTION

La Structure From Motion (SfM) utiliza imágenes adquiridas desde varios puntos de vista de una o más cámaras, para solucionar la geometría 3D de objetos y superficies.

Es una técnica derivada de la Computer Vision basada fuertemente en los principios de la fotogrametría, en donde un número significativo de fotografías solapadas tomadas en diferentes perspectivas se combinan para recrear un entorno en 3D.

A diferencia de lo que ocurre en la fotogrametría clásica, con los algoritmos que recaen en la clasificación de SfM; la reconstrucción de la escena, con el posicionamiento y la orientación de la cámara fotográfica se solucionan automáticamente por el software utilizado. No hay, por lo tanto, la necesidad de precisar primeramente tarjetas o puntos notables presentes en las imágenes adquiridas (como ocurría en la fotogrametría analógica), estos son localizados y solucionados automáticamente por el software que se basa en un campo fotográfico compuesto por tomas múltiples con superposición de las imágenes de la escena obtenida (entre el 60 y 80%), tal de permitir una reconstrucción tridimensional completa de la escena adquirida. Mientras la fotogrametría tradicional utilizaba enfoques de correlación de las imágenes basadas en el núcleo de la matriz, hoy en día algoritmos como SIFT (Love 2004) o el SURF (Bay, 2006) utilizan la luminosidad de la imagen multi-escala y las informaciones del color, para identificar los puntos homólogos en imágenes que toman el mismo punto. Por tanto a diferencia de la fotogrametría tradicional, que se basa en líneas rectas de imágenes sobrepuestas, el SfM permite realizar imágenes casuales desde muchos rincones y distancias para crear geometría 3D.

En el flujo de trabajo con tecnología SfM, la primera operación consiste en identificar y extraer puntos notables presentes en cada fotografía realizada (definidos en bibliografía internacional como *keypoint*) a través de, por ejemplo, el empleo del algoritmo SIFT. A través de este algoritmo, los puntos homólogos presentes en los tomas se identifican por medio de operadores de interés. Posteriormente, a través del uso de descriptores de imágenes, se elegirán aquellos que se desvíen menos unos de otros de los puntos homólogos identificados. Además de valores inherentes (iluminación, color, rotación, etc.) los puntos homólogos son buscados dentro de particulares zonas de la escena encuadrada (zonas dónde se hallan principalmente elementos de discontinuidad). Localizado un punto en la primera escena que tenga determinadas características, el homólogo en la escena siguiente resultara ser aquél que se acerca principalmente al examinado. En esta fase resulta, determinante el empleo de la geometría epipolar para definir los vínculos geométricos que unen a los puntos homólogos localizados en las tomas representadas de la misma escena.

En la fase siguiente se procede a la generación del modelo en 3D. Para hacer eso, son localizados los parámetros de orientación interior de la cámara utilizada para las tomas. La identificación ocurre por las correspondencias ya localizadas (puntos homólogos y geometría epipolar), una siguiente fase, el control y la limitación de los errores ocurre por el *bundle adjustment*. La última fase es la generación del modelo mediante una nube densa. Aquí son utilizados los algoritmos de Dense Image Matching. Debe ser recordado que los sistemas de reconstrucción de foto restituyen un modelo que en proporción es corregido pero no resulta estar a escala; además la nube de puntos obtenida no resulta ser georeferenciada pero sí representada en un sistema local. Luego hace falta pasar de un sistema de coordenadas espaciales relativas a un sistema de coordenadas absolutas. Eso ocurre localizando un número razonable de puntos de control en tierra con coordenadas conocidas y atribuibles dentro de la nube conseguida por la reconstrucción. En la bibliografía los puntos de control en tierra a menudo vienen definidos como *Ground Control Point (GCP)*, y son medidos a través de las clásicas técnicas topográficas, para conseguir un modelo final en un sistema de referencia topográfico y a escala real.

Existen muchas soluciones para la generación de nubes, tanto software open source, comerciales y servicios web. En particular los softwares probados durante la investigación han sido de tipo comercial: Agisoft Photoscan y 3DF Zephyr utilizan esencialmente un algoritmo SIFT con algunas diferenciaciones entre ellos, mientras Pix4dmapper utiliza un enfoque mixto entre Computer Vision y fotogrametría llamado Multi View Estéreo (MVS).

2.10 SIFT (SCALE INVARIANT FEATURE TRANSFORM)

El método SIFT introducido por Lowe en el 2004 localiza los puntos salientes a través de un algoritmo que puede ser resumido sintéticamente en cuatro fases fundamentales:

- identificación de los extremos locales de la scale-space;
- localización de los Keypoint;
- asignación de la orientación;
- generación de los descriptores.

IDENTIFICACIÓN DE LOS EXTREMOS LOCALES EN EL ESPACIO ESCALA

El primer paso del algoritmo consiste en la búsqueda de todos los posibles puntos de interés sobre la entera imagen a cualquiera escala. Para esta búsqueda, la imagen es representada como una familia de sus versiones suavizada (*smoothed*), parametrizada de la dimensión s del núcleo de filtración utilizado. El parámetro s toma el nombre de *parámetro de escala*, y junto a las variables espaciales del espacio imagen (x, y) localiza un punto (x, y, s) en el espacio escala.

Para una determinada imagen $f(x, y)$, su representación en el espacio-escala lineal es una familia de imágenes $L(x, y, s)$, definida por la convolución de $f(x, y)$, con núcleo gaussiano de varianza s :

$$L(x, y, s) = g(x, y, s) * f(x, y)$$

Donde con $*$ queremos indicar la convolución y $g(x, y, s) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{x^2+y^2}{2s}}$

A medida que la varianza s del núcleo gaussiano aumenta, hay una creciente eliminación de la imagen ya que L resulta de la convolución de f con un filtro paso-bajo de soporte espacial creciente. En particular las manchas que son significativamente más pequeñas que la desviación estándar del filtro \sqrt{s} vienen prácticamente a desaparecer en $L(x, y, s)$. La motivación para generar una representación espacio-escala de una imagen original nace de la constatación que las escenas reales están compuestas por muchas estructuras que poseen escalas intrínsecas diferentes y que la dimensión proyectada de los objetos varía en razón de la distancia de la cámara fotográfica.

Los más comunes detectores de puntos salientes, se basan en el laplaciano de Gauss. Dada una imagen de entrada $f(x, y)$ ésta viene ligada con un núcleo gaussiano $g(x, y, s)$ para conseguir una versión suavizada:

$$\hat{f}(x, y) = g(x, y, s) * f(x, y)$$

al cual, por tanto, se le aplica el laplaciano:

$$\nabla^2 \hat{f} = \left(\frac{\partial^2 \hat{f}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{f}}{\partial y^2} \right)$$

Los puntos salientes vienen por lo tanto definidos como puntos extremos (máximos y mínimos) locales del laplaciano.

Gracias a la comunicación entre los operadores resultantes y la convolución con el núcleo gaussiano, el laplaciano de la imagen suavizada se puede calcular de manera equivalente la convolución con el laplaciano del núcleo gaussiano, del cual toma el nombre de Laplaciano de Gauss (LoG).

El núcleo de LoG provee fuertes respuestas positivas por las manchas oscuras de medida \sqrt{s} y fuerte respuestas negativas por manchas luminosas de dimensiones parecidas.

Desde punto de vista frecuencial el operador LoG es un filtro pasabanda, y en efecto responde bien a manchas caracterizadas por una frecuencia espacial en su banda pasante, mientras que atenúa el resto.

El método SIFT propuesto por Lowe en el 2004 puede ser visto como una variante computacional eficiente del enfoque de Linderberg (1998).

Para encontrar puntos de interés dentro de las scale - space, es determinada una función DoG, en donde el espacio-escala laplaciano normalizado es reemplazado por una pirámide de diferencias de Gauss:

$$DoG(x, y, s) = L(X, y, K s) - L(x, y, s)$$

Donde los niveles de escala siguen una progresión geométrica: donde $\sigma_i = \sqrt{s}$ es la desviación estándar de la gaussiana.

La constante K no influencia la localización de los puntos extremos y es elegida como $\sqrt[n]{s}$ para tener un número n fijo de niveles de escala por *octava*, dónde la *octava* corresponde a la duplicación de σ (el SIFT emplea n=4).

La pirámide gaussiana es construida aplicando repetidamente la filtración gaussiana y diezmando a cada cambio de octava, por cual al final se consigue una pirámide en “escalera”.

Las diferencias (DoG) vienen calculadas entre niveles adyacentes dentro de la misma octava y por lo tanto son notados los puntos extremos en espacio y escala de la pirámide DoG.

La función DoG resulta ser extremadamente conveniente desde el punto de vista computacional y representa al mismo tiempo una aproximación muy buena del Laplaciano de la función gaussiana normalizado con respecto a la escala.

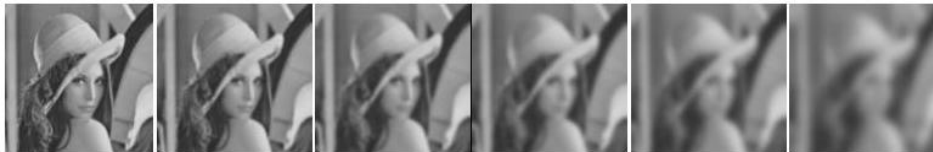


Figura 15: Filtrado gaussiano con s creciente.

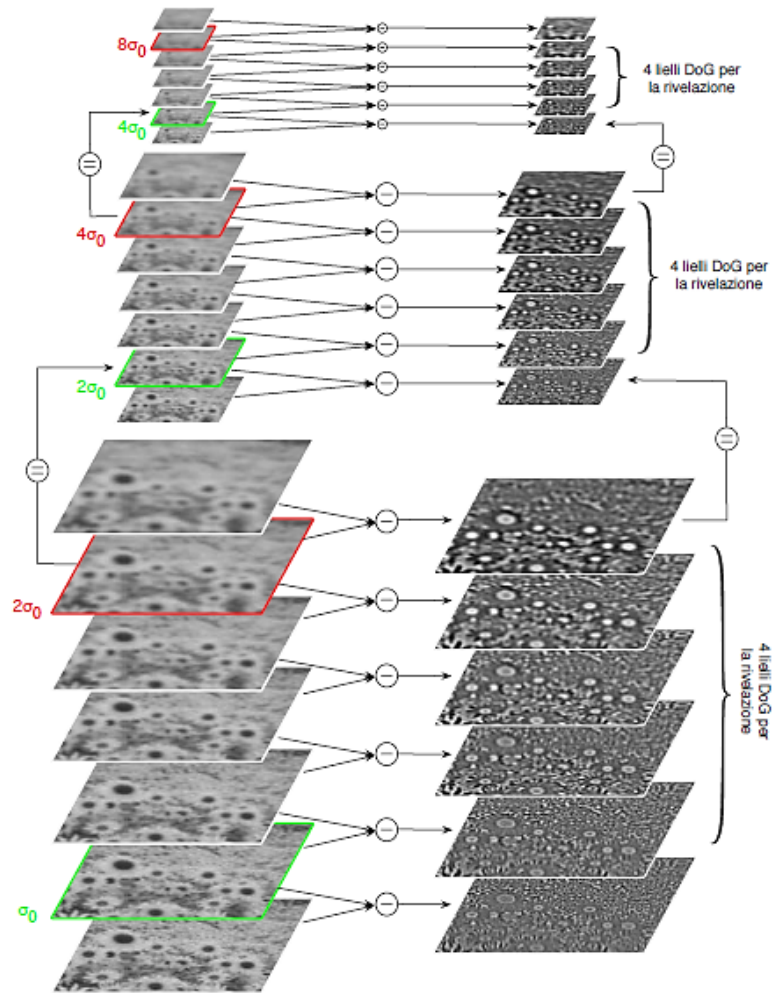


Figura 16: Diferencias de Gauss.

LOCALIZACIÓN DE LOS KEYPOINT

Una vez construida la pirámide de las diferencias de Gauss, se puede proceder a buscar los extremos en la pirámide apenas obtenidas. El método usado es confrontar cada punto de cada nivel con los ocho puntos alrededor de él en su escala y los nueve en la escala superior e inferior, como se muestra en la fig.17.

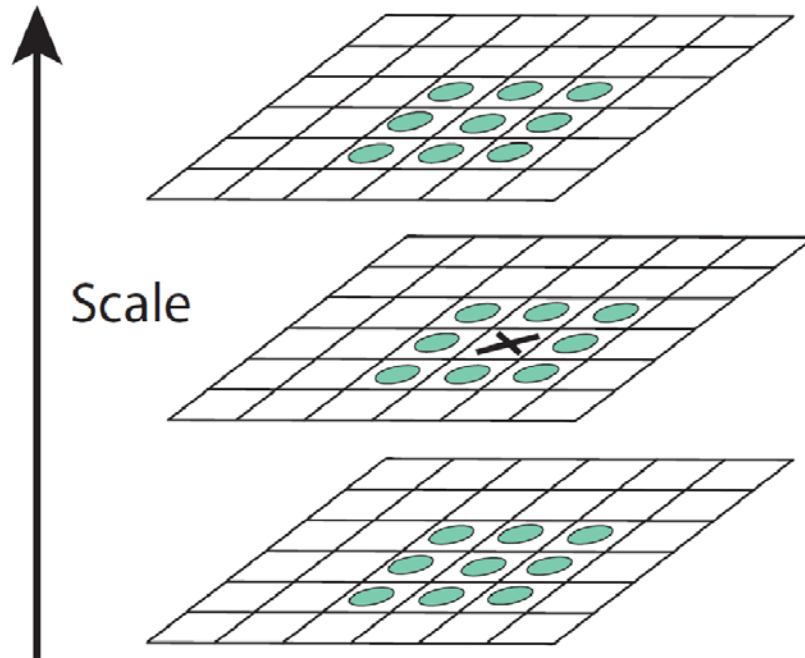


Figura 17: Los extremos locales de la DoG.

Es fácil ver porqué es necesario crear $s + 3$ imágenes desenfocadas por cada octava de la pirámide Gaussiana: desde el momento que para localizar un extremo tenemos que confrontar un punto con los puntos de las imágenes con escala superior e inferior (quedando en la misma octava) serán necesarias al menos 3 imágenes por cada octava de la pirámide de DoG para poderlo hacer (y el valor mínimo de s y 1). Los extremos locales de la función $D(x, y, s)$, representan los puntos de interés a investigar. Para determinarlos cada punto es confrontado con los ocho vecinos localizados en la imagen corriente y con los nueve de las dos escalas seguidas superiores e inferiores, y son elegidos en caso de que resulten también ser mínimos o máximos absolutos.

ASIGNACIÓN DE LA ORIENTACIÓN

A cada punto saliente es asociado un descriptor, que se reduce a un histograma local de la orientación del gradiente. Al comienzo, para conseguir la invariante de la escala, la dimensión de la cercanía tiene que ser normalizada oportunamente haciéndola depender de la escala. De modo equivalente, SIFT considera una

ventana de dimensiones fija 16×16 en el nivel de la pirámide gaussiana en donde el punto ha estado levantado. Para conseguir invariante de la rotación se considera una orientación dominada de los gradientes calculados en la ventana 16×16 ; en particular es construido un histograma en donde el dominio angular es discrepado en 36 intervalos (bin) y los votos ponderados de la amplitud del gradiente y de un gaussiano centrado sobre la ventana. El máximo del histograma identifica la orientación dominante. Vienen aceptadas orientaciones dominantes múltiples si hay otros máximos dentro del 80% de aquel absoluto. En este caso un descriptor es producido por cada orientación. Una vez calculado, la orientación dominante es empleada para girar la imagen, normalizando así la posición y manteniendo una invariante con respecto a las rotaciones.

GENERACIÓN DEL DESCRIPTOR LOCAL

Hasta ahora las operaciones realizadas han servido para asignar a cada punto localizado de la coordenada imagen, una escala y una orientación. El último paso consiste por lo tanto en la generación del descriptor que sea sumamente distintivo y la posible invariante a variaciones de iluminación y a cambios de perspectiva. El descriptor será creado calculando la magnitud en una región alrededor del punto de interés. Ello es representado con una ventana gaussiana (fig. 18): esta permite evitar cambios inesperados dentro del descriptor a causa de pequeñas variaciones en la posición de la ventana, pero también de poner menor énfasis a los gradientes que están más lejos con respecto al centro del descriptor. El descriptor SIFT es construido dividiendo los 16 píxeles cercanos al keypoint en examen en sub-regiones de dimensiones 4×4 píxel; para cada una de estas regiones están localizadas 8 orientaciones: eso comporta que cada descriptor genera un vector compuesto por 128 elementos ($4 \times 4 \times 8$). Cada elemento del vector, corresponde por lo tanto al valor del histograma de las orientaciones de la relativa subregión 4×4 del entorno del keypoint. Al final, para reducir los efectos debidos a las variaciones de iluminación, el vector característico es normalizado. Los descriptores asociados a los puntos salientes en dos imágenes son puestos en correspondencia con una simple estrategia del “primer vecino”: para cada descriptor en una imagen el descriptor se busca en la otra imagen que minimiza la distancia euclidiana entre los descriptores (vectores de dimensión 128).

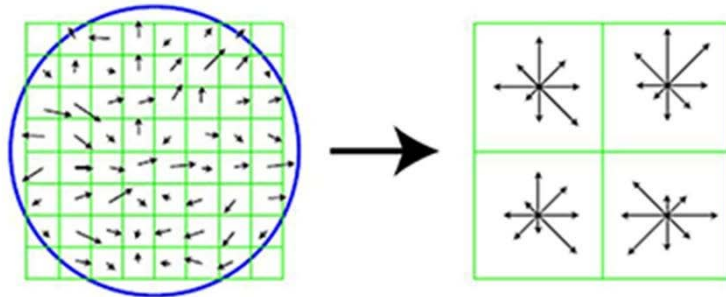


Figura 18: Descriptor de dimensiones 4x4, construido de un set de 16x16 muestras de la imagen.

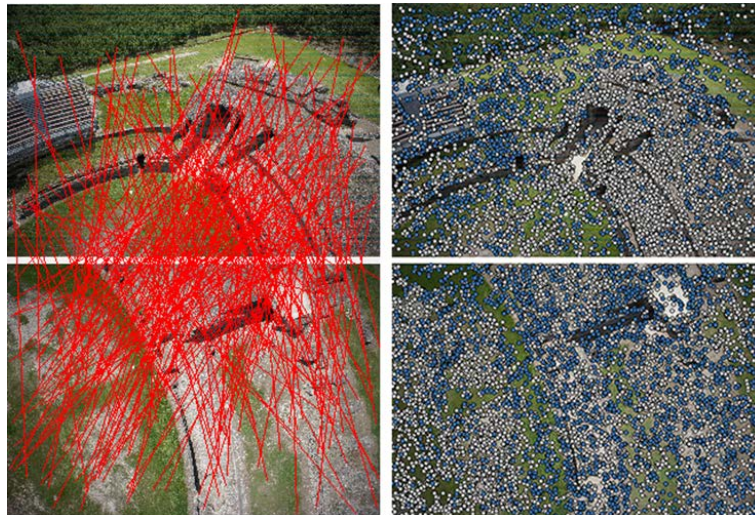


Figura 19: Imágenes de un VANT del anfiteatro de Avella, con extracción de los Keypoint, Tie point y el sucesivo matching.

2.11 BUNDLE ADJUSTMENT

Para mejorar la precisión en el cálculo de las orientaciones y para minimizar el error de retro-proyección, muchos software utilizan un procedimiento iterativo llamado bundle adjustment. El *bundle block adjustment*, formulado como un problema no lineal a los mínimos cuadrados, permite la definición completa de

los parámetros de orientación interna y externa de cada fotograma, a partir de al menos 3 puntos de control a tierra. Cuando están presentes muchas cámaras fotográficas, para las tomas fotogramétricas, el método hasta ahora presentado padece de una acumulación de errores, que lleva a una deriva del resultado: errores sobre los parámetros estimados en las primeras cámaras fotográficas y puntos que influyen los elementos que son añadidos sucesivamente.

Para solucionar este problema se tiene que tratar de minimizar el error global de retro-proyección⁹ de todos los puntos 3D obtenidos de las imágenes: el procedimiento utilizado deriva de la fotogrametría clásica y toma el nombre de *bundle adjustment*. En particular, el bundle block adjustment, cuya unidad elemental está constituida por el único fotograma (Kraus, 1998), es un método de compensación que permite calcular directamente las relaciones entre coordenada “imagen” y coordenada “terreno”, sin introducir la coordenada “modelo” como paso intermedio y basa su elaboración en el hecho que el centro de toma y los puntos imagen de cada fotograma definen una estrella de rayos en el espacio.

Por estrella de rayos se entiende el conjunto de rayos luminosos que, pasando por la lente, y por lo tanto por el centro de toma, interceptan los puntos objeto sobre el terreno y los puntos imagen sobre cada fotograma. Se trata pues de arreglar sea las N cámaras fotográficas que los n puntos 3D, para que la suma de las distancias al cuadrado entre los puntos j-ésimo re-proyectado por la cámara fotográfica i-ésima $P_i M_j$ y el punto medido m_j^j sea lo más pequeño posible, para cada imagen donde el punto aparece. Si nos referimos al solo caso proyectivo:

$$\min_{P_i M_j} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n d)^2$$

Donde:

P_i = matriz de proyección prospectiva de la cámara fotográfica i-esima;

M^j = coordenadas 3D del punto j-esimo;

m_i^j = coordenadas cartesianas de la proyección del j-esimo punto en la i-esima cámara fotográfica;

$d(.)$ = la distancia en el plano euclídeo.

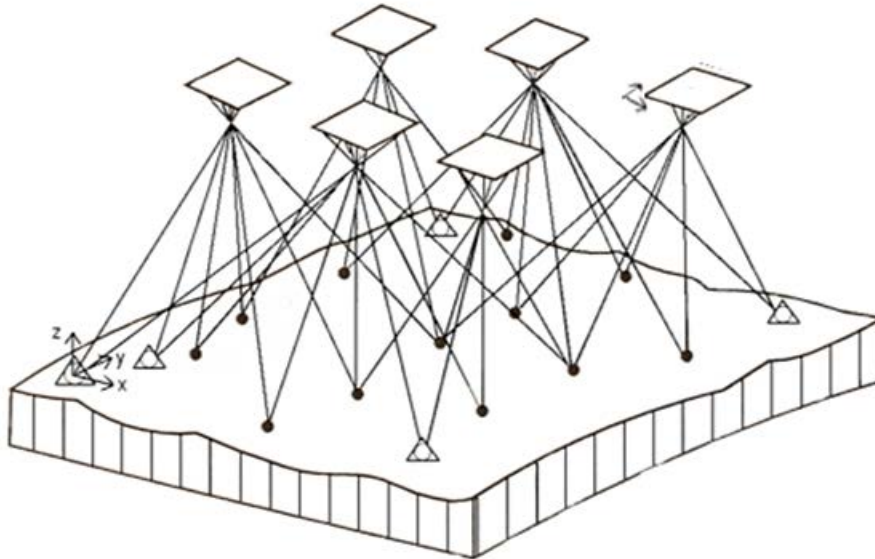


Figura 20: Esquema de intersección de rayos homólogos.

En la ecuación se pueden considerar también los parámetros intrínsecos como variables: este puede servir para refinarlos cuando su consideración no sea completamente confiable, por ejemplo cuando provienen de auto-calibración.

La minimización de la ecuación de arriba, equivale a la solución a los mínimos cuadrados de un sistema de ecuaciones no lineales. Uno de los mejores algoritmos para este objetivo es aquel de Levenberg-Marquardt (LM). En la aplicación de este algoritmo de *bundle adjustment*, se pueden efectuar algunas optimizaciones que derivan de la estructura jacobiana de la función de costo¹⁰.

2.12 DENSE IMAGE MATCHING

Cómo anticipado en el párrafo 2.10, la extracción automática de puntos homólogos es una de los temas fundamentales que ha caracterizado la búsqueda en estos últimos años sea en fotogrametría que en Computer Vision. La

identificación de estos puntos es una cuestión crucial para una vasta gama de aplicaciones, las cuales por ejemplo son el reconocimiento de objetos, su reconstrucción tridimensional, la generación de DSM, los procedimientos de colimación automática para la orientación de imágenes y el *motion tracking*. Su empleo representa, por lo tanto, el aspecto más innovativo de las técnicas fotogramétricas digitales ya que permiten limitar fuertemente la intervención directa del operador, reconociendo automáticamente grandes cantidades de puntos homólogos con precisiones inferiores a las dimensiones del pixel. El principal objetivo de la fotogrametría es la precisión del resultado, mientras aquel del CV la calidad del contenido informativo y descriptivo de la escena. La integración entre las dos técnicas ha permitido explotar el elevado nivel de automatización del CV para volver al entero proceso fotogramétrico mucho más eficiente. Eso es debido al hecho que el CV provee a la fotogrametría de los algoritmos y los modelos matemáticos alternativos que han simplificado los problemas de orientación e identificación de los puntos homólogos, utilizando al mismo tiempo los modelos geométricos y estocásticos rigurosos de la fotogrametría tradicional.

Las operaciones de correlación pueden ser ejecutadas a través del reconocimiento de las imágenes de entidades diferentes; pueden ser considerados los valores radiométricos de las imágenes, o bien puede ser utilizada la presencia de elementos geométricos simples (puntos, líneas, áreas o más comúnmente agrupados bajo la nomenclatura inglesa *Feature*).

En función de la diferente tipología de entidades que son consideradas es posible subdividir los distintos métodos de autocorrelación en 2 grupos:

- Algoritmos de Area Based Matching (ABM);
- Algoritmos de Feature Based Matching (FBM).

Los métodos ABM más simples entran en la categoría de la correlación simple: desplazando con pasos regulares sobre la imagen de trabajo una ventana de dimensiones establecidas, se busca el máximo de una medición de igualdad de los tonos de gris de los dos fotogramas. Es conocido que, salvo condiciones particulares, la precisión de estos métodos es limitada. Sin embargo ellos quedan actuales porque son extremadamente veloces en determinar correspondencias sobre dos imágenes: el número de operaciones requeridas para el cálculo de los descriptores estadísticos es en efecto mucho menor con respecto a otras técnicas de matching. Pues, cuando el área de búsqueda sobre las imágenes de trabajo es

particularmente extensa y son por lo tanto necesarias numerosas tentativas antes de conseguir la correspondencia correcta o en las aplicaciones en tiempo real, ellos son abundantemente utilizados. Con el objetivo de evitar luego un número demasiado elevado de falsos matching es necesario añadir otras hipótesis de trabajo, las cuales por ejemplo son la pertenencia de los puntos homólogos a la línea *recta epipolar*, ver en el párrafo 2.8. Las medidas de correlación más comúnmente usada en fotogrametría son:

Sum of Square d Difference

$$SSD = \sum_{(k,l)} (I_1(u+k, v+l) - I_2(u+k+d, v+l))^2$$

Sum of Absolute Difference

$$SAD = \sum_{(k,l)} |I_1(u+k, v+l) - I_2(u+k+d, v+l)|$$

Normalized Cross Correlation

$$NCC = \frac{\sum_{(k,l)} (I_1(u+k, v+l) - I_2(u+k+d, v+l))}{\sqrt{\sum_{(k,l)} I_1(u+k, v+l)^2} \sqrt{\sum_{(k,l)} I_2(u+k+d, v+l)^2}}$$

Dónde $I_{(u,v)}$ indica el nivel de gris del píxel mientras k y v son los contadores para la iteración sobre la entera imagen.

En el caso de algoritmos FBM en cambio, se localizan las primitivas (como por ejemplo bordes, líneas y polígonos, llamados features), que tendrán que ser buscadas, dentro de las otras imágenes de la secuencia, con adecuados operadores de *feature extraction*. Se construye, por lo tanto, una lista preliminar de parejas correspondientes sobre la base de medidas de similitud de los atributos (los cuales por ejemplo posición geométrica o radiometría) y se ejecuta el matching sobre la base de criterios de coherencia.

Estos métodos son en general más veloces con respecto a aquellos ABM, ya que focalizan su atención sobre particularidades del objeto, en lugar de confrontar todos los píxel presentes en la imagen, pero resultan ser poco confiables en el caso de objetos de forma libre, sobre los que es difícil imponer vínculos de

parecido. La búsqueda de los feature ocurre a través de los operadores de interés como Harris y Förstner que trabajan sobre elementos puntuales o los *edge detector* los cuales recuerdan aquellos de Sobel, Roberts, Laplacian, Canny operator.

Es importante notar que, sobre todo en el campo de la generación de superficies complejas y de fotografías de aproximación, como en el caso de algunos bienes arqueológicos, cada vez más parecen ventajosas las estrategias que integran métodos de matching, ABM y FBM, o bien que integran sistemas activos y pasivos.

2.13 SOFTWARE SFM EXPERIMENTADOS

Durante el trienio del doctorado han sido probados muchos paquetes softwares comerciales: Agisoft PhotoScan, Pix4d Mapper y 3DF Zephyr Aerial.

Agisoft PhotoScan¹² está disponible sólo como software a pago, con la solución Estándar a 179 dólares y la versión Professional disponible por \$3.499. Una vez adquirido, el software es concedido con licencia para el empleo sobre un solo ordenador (Pix4D, por ejemplo, puede ser instalado en dos dispositivos). Este podría ser restrictivo para algunas empresas. Está disponible una versión de prueba del software Professional por 30 días, por lo tanto el usuario está en grado de conseguir una buena panorámica sobre los tool del software. Como podríamos esperar del coste, hay una clara diferencia entre las versiones Estándar y Professional: la versión Estándar incluye la triangulación fotogramétrica, generación y texturing de modelos 3D, generación de nubes de puntos densos pero los trabajos no pueden ser ni georeferenciados ni escalados con GCP. La versión Professional, además de prever el tool de georeferenciación y orientación absoluta, añade otras funciones, entre las cuales se encuentran la posibilidad de generar mapas NDVI para la agricultura, clasificar por layer la nube densa, medir con precisión distancias, áreas, volúmenes, etc.

Pix4D¹³ nace en el 2011 de uno spin-off de la Escuela Politécnica Federal de Lausana. Desde las alboradas, Pix4D pone la atención sobre la gestión de las fases de post-elaboración de datos para UAV, para luego también mejorar los mismos

algoritmos para el close range. Pix4D provee gratis una app Pix4Dmapper Capture, capaz de engendrar planos de vuelo para la mayor parte de los drones del mercado consumer como los drones DJI y Parrot. Atándose enseguida a productos realizables para drones, Pix4D ha sido el primer software capaz de elaborar imágenes para fines fotogramétricos procedentes de Gopro (por lo tanto con grandes efectos distorsivos), y de imágenes 360° (posteriormente también Agisoft importará en el tool “camera calibration” muchas configuraciones para imágenes fuertemente deformadas). En parte como sus competidores, Pix4D incluye la posibilidad de confrontar simultáneamente mediciones (lineales, reales y volumétricas), de editar nubes de puntos y mesh para garantizar aún más un modelo 3D claro y limpio, generar ortofoto, DTM y otro. A diferencia de Agisoft Photoscan, Pix4dMapper presenta una única versión software fotogramétrico, Pix4d Mapper Pro, pero con planes de pago flexibles. Es posible alquilar el software sobre base mensual (260 €) o anual (2600 €), o bien adquirir una licencia ilimitada a 6500 €. El software house también concede una versión gratuita, Pix4dDiscovery con algunos límites para la producción de las salidas, por los que es necesario pasar a la versión Pro. Cuenta con muchos template para la elaboración de imágenes, que varían del empleo de cámaras multispectrales para la agricultura y el consiguiente índice de NDVI, a la realización de ortofoto procedentes de sensores térmicos, al clásico proceso de generación de modelos 3D de imágenes digitales.

3Dflow¹⁴ es una sociedad privada e independiente de consultoría y producción software operante en el campo de la Computer Vision e Image Processing. Ha sido fundada en el 2011 como spin-off de la universidad de Verona y en el 2012 ha sido reconocida como spin-off de la universidad de Udine. 3DF Zephyr están ofrecidos en tres versiones: Pro, Lite y Education. 3DF Zephyr Pro es la versión estándar pensada para el sector arquitectónico, arqueológico, médico-dental y del body-scanning. 3DF Zephyr Aerial es la versión verticalizada dedicada al mundo de la fotogrametría aérea y a las aplicaciones en el ámbito de la monitorización urbana y ambiental, de la topografía, de la geodesia y de la agricultura de precisión. 3DF Zephyr Lite es una versión indicada para los artistas, para el mundo de la prensa y el modelado 3D, o más en general para los que desean únicamente conseguir un mesh e/o que no necesitan todos los instrumentos y funciones provistas para las otras versiones. Las principales diferencias están en

la exportación, no es posible exportar nubes de puntos, la imposibilidad de engendrar ortofoto/ortomosaicos y el empleo máximo de un GPU durante el procesado de datos. El coste de la versión Aerial es de 4200 \$ mientras para las versiones Lite y Pro el precio es respectivamente de 149 \$ y 3200 \$. Últimamente 3DFlow también han concedido una versión gratuita capaz de elaborar hasta 50 imágenes, y con la posibilidad de exportación y editing. 3DF Zephyr se basa en una tecnología patentada como *Multi-View-Stereo*. Se presenta con una interfaz accesible y permite exportar nubes de puntos y mesh en los formatos 3D más comunes. Además es posible generar animaciones vídeo, ortofoto, modelos digitales del terreno (DTM), secciones, curvas de nivel y calcular rincones, áreas y volúmenes.

PhotoScan, Pix4DMapper y 3DF Zephyr Aerial utilizan el mismo modelo de calibración de la cámara de fotos responsable de la triangulación de los puntos 3D con base en los parámetros internos. El modelo de cámara de fotos utilizado es un típico modelo de cámara fotográfica a 8 parámetros donde k_1 , k_2 , k_3 y k_4 , describen la distorsión radial mientras p_1 , p_2 , p_3 , p_4 son los coeficientes de distorsión tangencial. Los otros parámetros en la orientación interna son f (f_x , f_y) o bien las dimensiones en x e y , la distancia focal c (c_x , c_y) y las coordenadas de los puntos principales, en x e y . Todos los softwares probados utilizan el algoritmo SIFT en la fase de la búsqueda de puntos homólogos, utilizando en todo caso líneas diferentes no dadas a los usuarios. El empleo de un SIFT modificado, para los tres softwares house, es declarado en algunas publicaciones científicas (Por ejemplo C. Strecha, CEO de Pix4D) lo declara en *The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery*: “The software searches for matching points by analyzing all uploaded images. Most well known in Computer vision is the SIFT (Lowe) 2004, feature matching. Studies on the performance of such feature descriptors are given in. We use here binary descriptors similar to, which are very powerful to match keypoints fast and accurate”. El workflow de los tres softwares es parecido: Agisoft Photoscan y 3DF Zephyr Aerial prevén la realización del mesh con texture en 4 step en series: i) Generación de la orientación y nube esparcida, ii) Generación nube densa, iii) Extracción del mesh, iv) Generación de un mesh con textura. Pix4D presenta un workflow principalmente simplificado en 3 step: Initial Processing (generación de la orientación y nube esparcida), 2) Point Cloud and Mesh (generación de la

nube densa y el modelo mesh con textura), y al final prevé un tool denominado DSM, Orthomosaic and Index, dónde son generados el Digital Surface Model, el ortofoto nadir y eventualmente otros elaborados preseleccionados del usuario. El apéndice contiene un breve resumen de los software SFM probados con la descripción de cada parámetro en el workflow..

Otra diferencia entre los softwares es sobre la importación de formato vídeo: Pix4DMapper y 3DF Zephyr Aerial son capaz de importar un vídeo, subdividirlo en partes con paso seleccionado por el operador, y de este engendrar el proceso fotogramétrico, mientras Agisoft Photoscan no ha implementado esta función.

En los muchos casos de estudio afrontados y descritos en los capítulos siguientes, la elección del software a utilizar para la restitución fotogramétrica ha sido efectuada según las ventajas que el empleo de uno comportó respecto al otro. Para cada caso de estudio además, son descritos los parámetros utilizados y los datos cuantitativos de las salidas (cantidad de puntos de la nube esparcida, densa y número de polígonos del modelo poligonal).

M. Limongiello - Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas

3 VALIDACIÓN DE DATOS PROVENIENTES DE ACTION CAMERA PARA FINES FOTOGRAMÉTRICOS: EL CASO DE ESTUDIO DE VILLA DI GIULIA FELICE

3.1 INTRODUCCIÓN

En campo arqueológico, hoy día, la representación 2D todavía es la más difusa y utilizada con respecto a las restituciones actuales 3D, sobre todo para uso técnico. En efecto, la realización de un foto-plano, el enderezamiento de una única toma fotográfica por los puntos de control, a menudo es requerida para recoger informaciones cromáticas y métricas en un único expediente.

Sin embargo, a causa de las condiciones intrínsecas, por ejemplo superficies no planas, y/o extrínsecas (por ejemplo distancia reducida del objeto), no es siempre posible reducirse al empleo de la fotogrametría llamada monoscópica. El empleo de la fotogrametría multi-imagen para investigaciones a distancia cercana puede representar una solución alternativa, en particular en condiciones de adquisición compleja en el sector de los Bienes Culturales. En los últimos años han habido desarrollos importantes en la fotogrametría *close range*, gracias a varios factores bien conocidos, los cuales: (i) la aplicación de algoritmos procedentes del Computer Vision, los que permiten la calibración automática de la cámara fotográfica y el cálculo de los parámetros de orientación exterior; (ii) la mejora en la fase de matching, con consiguiente recaída en una mejor consideración de los parámetros fotogramétricos; (iii) y el aumento de la calidad digital de las cámaras fotográficas digitales a bajo costo (capaz de proveer imágenes a alta resolución). La consideración de las características geométricas de la cámara (distancia focal, centro de proyección de la imagen, coeficientes de distorsión radial de la lente) pueden ser ejecutadas automáticamente dentro del workflow y al mismo tiempo los progresos matemáticos han permitido una mayor flexibilidad en el empleo con fines fotogramétricos de cámaras con enormes efectos distorsivos como las cámaras con óptica fisheye.

El objetivo con amplio ángulo de campo (FOV – field of view) puede ayudar a solucionar problemas de adquisición fotogramétrica relativo a espacios estrechos y a las condiciones complejas de tomas. Un mayor ángulo de campo puede reducir el número de capturas para cubrir la entera escena y como así el tiempo de la fase de adquisición; por otro lado, las desventajas son las distorsiones extremas de las imágenes que aumentan la dificultad de matching entre las imágenes. Se discute a continuación de una prueba ejecutada con un GoPro Hero 3 Black (fig.21) utilizado para el levantamiento de una pared perimetral perteneciente a un espacio estrecho. El objetivo final es conseguir una ortofoto detallada a través de una reconstrucción 3D fotogramétrica. La elaboración fotográfica ha sido desarrollada en muchos softwares fotogramétricos, Agisoft PhotoScan 1.2.3, Pix4Dmapper 1.4.46 y 3DF Zephyr Aerial 2.306, analizando la precisión de los modelos 3D finales.

3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

El área seleccionada para la prueba fué la pared perimetral lado este de “Villa di Giulia Feliz” (fig. 22) en el sitio arqueológico de Pompeya. La Villa, situada cerca de Porta Sarno, fue explorada primero entre el 1755 y el 1757 y luego en el 1953. El campo de levantamiento de “Villa di Giulia Feliz” forma parte del “Gran Proyecto Pompeya”, cuyos objetivos es la protección, la conservación, la manutención y la restauración del sitio.



Figura 21: Dimensiones de una Gopro Hero 3 Black.

Para los estudios arqueológicos fue solicitado una ortofoto del entero muro; en este caso, ha sido excluido el empleo de un escáner láser terrestre (TLS) a causa del estrecho espacio a disposición o bien un pasillo con la máxima distancia entre las dos paredes de unos 1,1 m. Considerando la distancia entre la cámara de fotos y la pared variable entre los 0,3 - 1,1 m, y las dimensiones mismas de la pared, el largo y la altura del muro son respectivamente cerca de 20 m y 4 m (fig. 23), el óptico gran angular representa una ventaja en la fase de adquisición de las imágenes. Este tipo de lente aumenta el campo visual, disminuyendo el número de capturas fotogramétricas a efectuar. Para el proyecto de levantamiento se ha previsto el empleo de un GoPro Hero 3 Black con una distancia focal nominal de 3 mm y pixel size de 1,55 μm (dimensiones del sensor de 6,2 x 4,65 mm).

Existen muchas modalidades de adquisición de las imágenes de la videocámara GoPro; en esta búsqueda ha sido utilizada la modalidad "Wide" con las siguientes especificaciones: dimensión de la imagen 12 MPx (4000 x 3000 pixel); FOV vertical 94,4° y FOV horizontal 122,6°. Las ventajas debidas al empleo de GoPro son las reducidas dimensiones y el peso de la misma (73 g. para la edición Black), que facilitan la adquisición fotográfica en espacios estrechos. De otro canto, la desventaja es que objetivos gran angulares son más expuestos a distorsiones, especialmente en los extremos del fotograma, engendrando un efecto distorsivo conocido como "efecto barril". A causa de este factor, el empleo de un objetivo óptico fisheye es menos común para fines fotogramétrico, en cuánto se espera una menor precisión de los elaborados desarrollados. Es de subrayar que en este caso de estudio, los fuertes efectos distorsivos son acentuados a causa de las reducidas distancias con el objeto; sin embargo, gracias a la implementación de específicos algoritmos de calibración de la cámara, algunos softwares fotogramétricos comerciales son capaz de elaborar foto capturada con objetivos fuertemente gran angulares (sin el empleo de un software externo para depurar las imágenes de las distorsiones).

El proyecto de adquisición de las imágenes ha previsto el empleo de un asta telescópica para "retomar" la entera altura del muro. 263 imágenes han sido adquiridas en 11 tiras horizontales, con superposición de cerca de 80% (distancia mínima entre la cámara fotográfica y el muro 30 cm, distancia máxima: 110 cm, fig. 23) y cámara a eje paralelo y horizontal. En base a la resolución del sensor y a la distancia de adquisición, el GSD medio de proyecto (Ground Sample Distance) es de 0,79 mm. Además, a través de una estación total (Leica TCR 705

con una precisión nominal de 5 mm), han sido medidos 14 puntos de referencia naturales distribuidos uniformemente sobre la pared perimetral (cerca de un punto por 5 m², fig. 24). Las coordenadas de los puntos de control han sido medidos en el sistema de referencia Gauss-Boaga. Los puntos de control naturales han sido elegidos por características cromáticas que los hacen fácilmente reconocibles sobre las imágenes; de este modo las coordenadas de referencia medidas han sido contraseñadas sobre las fotos y utilizadas como puntos de control (GCP) para escalar y georreferenciar correctamente la reconstrucción fotogramétrica 3D y para estimar la precisión del modelo final.

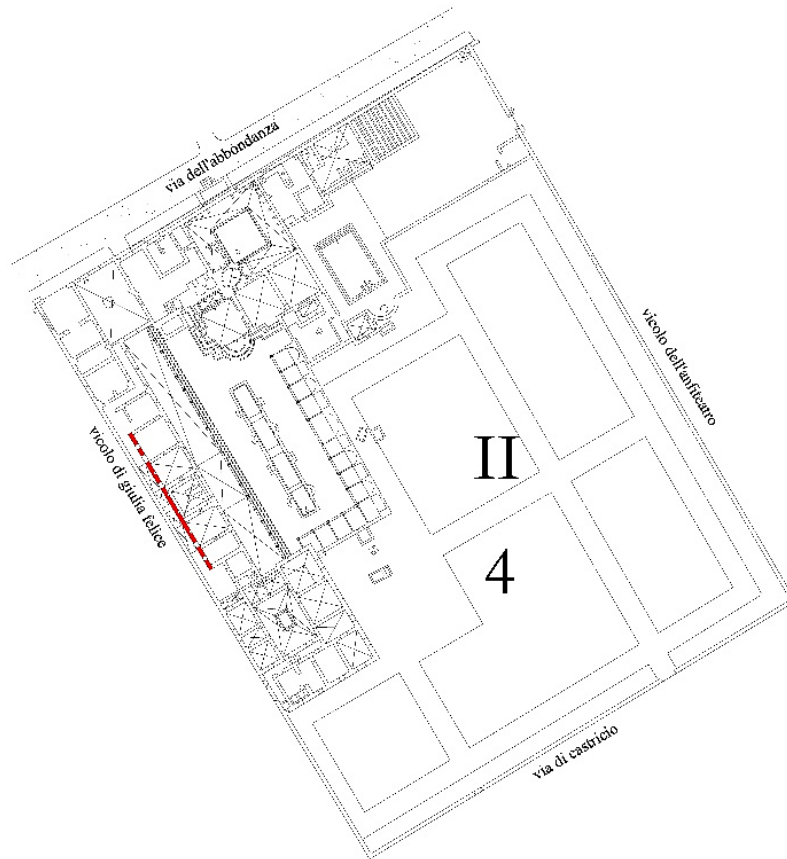


Figura 22: Planta Villa di Giulia Felice y el muro perimetral investigado (en rojo).

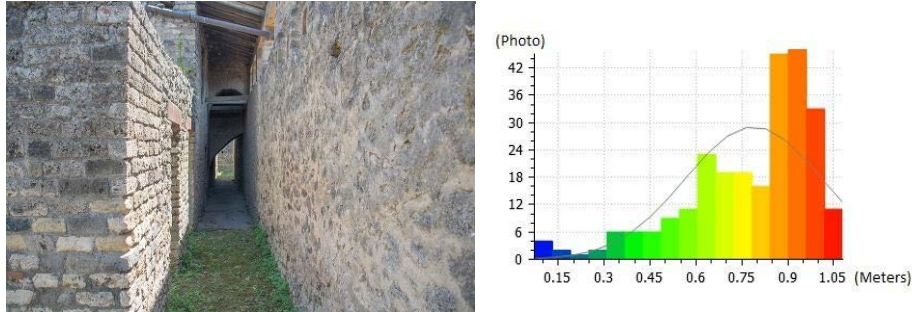


Figura 23: Corredor y muro perimetral levantado de Villa Giulia Felice (a sx).

3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

Para valorar un correcto *pipeline* de trabajo, desde el punto de vista de la precisión métrica de los productos en output y del tiempo total de elaboración, han sido probados tres softwares comerciales para la elaboración de imágenes con fines fotogramétrico: Agisoft PhotoScan en la versión 1.2.3, Pix4Dmapper en la versión 2.0.104 y 3DF Zephyr Aerial 2.306. Todos los softwares están focalizados sobre la tecnología del Structure from Motion, combinando las técnicas de automatización de puntos homólogos procedentes del Computer Vision, con los principios de la fotogrametría clásica. Por cada software, ha sido llevado a cabo el entero proceso de reconstrucción 3D, de la orientación interior y exterior de las imágenes, de la creación del modelo 3D, hasta la exportación de la ortofoto. Los pasos comunes en el flujo de trabajo estándares son: 1) cálculo de los parámetros de orientación interior y exterior (con levantamiento automático de los puntos de matching) y creación de Nube de Puntos esparcida; 2) extracción de una Nube de Puntos densas; 3) construcción de un modelo poligonal (mesh); 4) texture mapping y 5) realización y exportación de la ortofoto. Al primer paso, la consideración de los parámetros de orientación interior y exterior permite el cálculo de la posición espacial de las fotos y la reconstrucción del Sparse Cloud. Sucesivamente es posible georeferenciar la nube de puntos y verificar la autenticidad métrica, conociendo al menos 3 GCP para calcular los parámetros de roto-traslación y engendrar la fase de orientación absoluta.

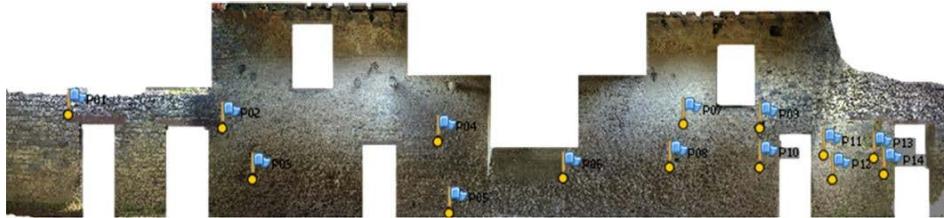


Figura 24: Puntos de control medidos con estación total (GCP).

También es posible optimizar la consideración de los parámetros de orientación interior y exterior de la cámara fotográfica utilizando los GCP. El procedimiento de optimización permite no solo conseguir una mayor precisión en el cálculo de los parámetros de la cámara y su posición espacial, sino también de corregir eventuales distorsiones (por ejemplo el efecto barril). Durante el proceso de optimización, la sumatoria de los errores de retro-proyección está reducida al mínimo mediante un algoritmo de bundle-adjustment. El error de retro-proyección concierne la diferencia entre la posición de los puntos de control definida sobre la imagen original y su posición estimada durante el proceso fotogramétrico. Por este motivo, las imágenes han sido elaboradas asociando las informaciones métricas de los GCP, contraseñando manualmente sobre las imágenes las coordenadas medidas con la estación total Leica TCR705. A fin de desarrollar una comparación coherente entre los resultados conseguidos por muchos programas, han sido tomadas algunas precauciones. En particular: (i) en los tres programas selectos los GCP han sido notados sobre las mismas imágenes; (ii) el entero proceso ha sido ejecutado con el mismo ordenador, una estación de trabajo con procesador i7-4790 -3.60 GHz, RAM 32 GB, NVIDIA GeForce GTX 970 de 2 GB, y además, (iii) han sido programadas las importaciones más parecidas en las varias fases de elaboración. Al final de la elaboración de las imágenes, cada software nos provee una relación sinóptica con informaciones sobre el entero proceso como la impostación de los datos de input, los parámetros de calibración de la cámara, el error de reproyección sobre cada punto de control, etc. En *Agisoft PhotoScan*, en el primer step han sido procesadas las imágenes a plena resolución y a la configuración de los parámetros de default ha sido programada un límite de 40.000 Keypoint y 4.000 Tiepoint; de la elaboración todas las tomas fotogramétrica han sido alineadas

(263/263). Los parámetros de calibración de la cámara fotográfica han sido optimizados para la inserción de los GCP. La nube densa ha sido realizada en “High Quality”; esta impostación comporta un factor de reducción de la imagen de $\frac{1}{4}$ (dos veces por cada lado). La nube de puntos engendrada cuenta con cerca de 19 millones de puntos y no presenta gap de informaciones.

En *Pix4Dmapper* en el step de self-calibration, el número Keypoint ha sido programado a 15.000; con esta impostación, el software alinea todas las imágenes (263/263). Los 14 GCP también han sido utilizados para regular la calibración de la cámara fotográfica y estimar un RMS (Root Mean Square) de 0,017 m. En la segunda fase, por la construcción de la nube densa, han sido utilizadas las mismas configuraciones de Agisoft PhotoScan, vale a decir un factor de escala de la imagen de $\frac{1}{4}$ (mitad resolución sobre cada lado). La nube densa cuenta con cerca de 24 millones de puntos.

En la elaboración con *3DF Zephyr Aerial* para utilizar configuraciones de cálculo parecido a las anteriores, los parámetros utilizados han sido: límite de 15000 Keypoint para la imagen en el primer paso; y un factor de escala de las imágenes de $\frac{1}{4}$ en la segunda fase para la realización de la nube densa. El software no alinea todas las imágenes (257/263) y la nube de puntos densa cuenta con cerca de 2 millones de puntos. La Tab. 2 esquematiza las fases del flujo de trabajo en cada software mientras la Tab.3 exhibe la recapitulación numérica de los output.

Las figuras. 25-26-27 muestran respectivamente las ortofotos finales conseguidas con Agisoft PhotoScan, Pix4Dmapper y 3DF Zephyr Aerial. Es posible notar que: (i) en ningún software está visible el efecto – barril (cada vista de lo alto es lineal y no tiene curvatura); (ii) las ortoimágenes producidas en 3DF Zephyr Aerial (fig. 27) presenta problemas y partes faltantes en la parte superior del muro, debido esencialmente al menor número de imágenes alineadas.

Una primera consideración puede ser hecha sobre el derroche de tiempo en la fase de elaboración de las imágenes. La duración de la elaboración en 3DF Zephyr Aerial ha sido mayor que en las otras dos; Agisoft PhotoScan y

Pix4Dmapper han completado el entero proceso en tiempos comparables (en total unas 6 horas).

Tabla 2: Workflow en los software usado.

	Agisoft Photoscan	Pix4Dmapper	3DF Zephyr Aerial
Paso 1	Aligh Photo	Initial Processing	Sparse Point Cloud
Paso 2	Build Dense Cloud	Point Cloud & Mesh	Dense Point Cloud
Paso 3	Build Mesh		Mesh
Paso 4	Build Texture		Texture Mesh
Paso 5	Export Ortophoto	DSM, Orthomosaic and Index	Orthophoto

Tabla 3: Confronto output de los software usados.

	Agisoft Photoscan	Pix4Dmapper	3DF Zephyr Aerial
Aligned Camera	263/263	263/263	258/263
Tie Point extracted	230.508	460.922	378.435
Dense Cloud	19.507.347	24.817.288	2.580.530

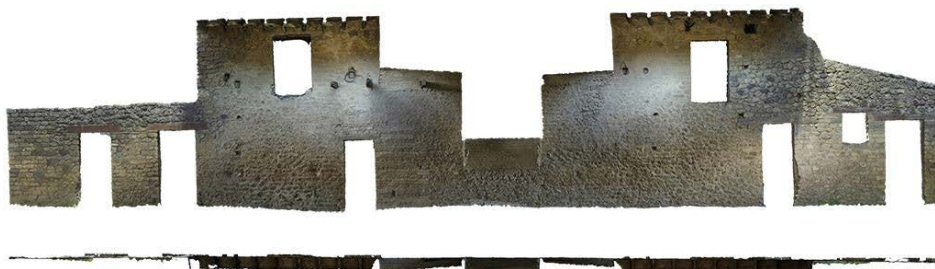


Figure 25: Ortophoto y vista desde el alto producida en Agisoft PhotoScan.



Figure 26: Ortofoto y vista desde el alto producida en Pix4Dmapper.



Figure 27: Ortofoto y vista desde el alto producida en 3DF Zephyr.

3.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS GENERADOS

Un primer análisis ha sido efectuado sobre la reconstrucción espacial de la posición de cada cámara (orientación exterior), o mejor sobre el centro de la cámara calculado para cada cámara en cada software. En el reporte publicado por cada software, podemos encontrar las coordenadas (X,Y, Z) del centro nodal de cada toma fotogramétrica y (ii) las rotaciones del eje óptico (respectivamente α , β , φ para los ejes x, y, z). Para cada combinación de parejas de software (Agisoft Photoscan vs Pix4D, Agisoft Photoscan vs 3DF Zephyr y Pix4D vs 3DF Zephyr), han sido calculadas las diferencias entre las coordenadas del centro nodal XYZ y los ángulos del eje óptico α , β , e γ para las fotos correspondientes.

La Tabla 4 muestra el valor medio, la desviación estándar y el valor máximo de la diferencia calculada. Se puede notar que las principales desviaciones son calculadas en la comparación con 3DF Zephyr Aerial. XYZ y diferencias inferiores a 1° por las rotaciones.

Tabla 4. Comparación de los parámetros de orientación externos.

		X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	α (°)	β (°)	F(°)
Agisoft Pix4D	Media	0.76	1.26	0.62	0.23	0.11	0.22
	Dev.st.	0.34	0.61	0.54	0.77	0.21	0.69
	Max	1.50	2.46	2.17	0.57	0.24	0.54
Agisoft 3DF Zephyr	Media	18.15	10.88	21.03	0.22	0.06	0.21
	Dev.st.	11.18	7.51	3.73	0.14	0.06	0.14
	Max	48.26	37.95	44.82	9.60	2.86	9.42
Pix4D 3DF Zephyr	Media	17.66	11.29	21.61	0.17	0.11	0.17
	Dev.st.	11.09	7.78	3.45	0.81	0.21	0.72
	Max	48.85	37.14	44.08	10.96	2.82	9.74

La posición en el espacio de las cámaras están muy cercanas en la comparación entre Agisoft y Pix4D; la comparación entre Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper tiene errores mínimos (del orden de cm) para las coordenadas. Una segunda comparación fue analizando los errores de retro-proyección sobre los GCP calculados por cada software. En la Tabla 5 para cada GCP se informa el error de retro-proyección correspondiente para los ejes X, Y y Z y su módulo vectorial (Error 3D). Los puntos han sido insertados en las mismas imágenes para cada software y por el mismo operador, para evitar ulteriores incertidumbres en el cálculo. Agisoft PhotoScan presenta los valores de desviación media más elevados (el error medio es 3,5 cm y la desviación estándar es 4 cm) mientras Pix4D presenta residuos métricos más bajos, (el error medio es 2,2 cm y la desviación estándar es de 2,6 cm). También podemos notar que los puntos C06 y C10 muestran una desviación mayor en cada software probado (de 7 cm y 10 cm respectivamente); probablemente tales errores son debidos a errores groseros imputables a una errada medición topográfica. Un ulterior análisis ha previsto la comparación estadística de las nubes de puntos georeferenciadas, eliminando otros puntos de la escena 3D que no pertenecen al muro indagado. Un análisis estadístico de la superficie de la pared puede proveer una consideración del ruido de la nube de puntos y las desviaciones entre las superficies producidas entre los muchos softwares probados.

En las figuras. 28-29-30 se muestra la comparación entre parejas de nubes de puntos georeferenciadas conseguidas en cada software (comparación realizada a través de Cloud Compare). La desviación entre dos nubes de puntos está representada en falso color: las desviaciones máximas (puntos rojos) están presentes sobre la pared superior y en los bordes (por ejemplo puertas, ventanas y techo). Los resultados de la comparación *cloud to cloud* están trazados en los histogramas sobre la columna derecha de las figuras. 28-29-30. La gráfica tiene sobre el eje x los valores de desviación (m) y sobre el eje y el número correspondiente de puntos. Del análisis se denota que, las nubes de puntos entre Agisoft Photoscan y Pix4D presentan desviaciones métricas mínimas mientras la comparación de las nubes de puntos entre Pix4D y 3DF Zephyr presenta las desviaciones máximas.

La tendencia de las desviaciones en la comparación entre nubes de puntos sigue la tendencia de la distribución de Weibull, representada para cada histograma con la curva gris continua.

Es posible observar que las frecuencias más altas de la distribución corresponden a un valor de desviación aproximado de: 1,5 mm para la comparación entre Agisoft y Pix4D, 3 mm para la comparación entre Agisoft y 3DF Zephyr y 2 mm para la comparación entre Pix4D y 3DF Zephyr. Eso significa que la comparación entre Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper tiene una distribución que evidencia los dos modelos generados son muy similares, con una desviación de 1,5 mm para la mayor parte de los puntos confrontados entre los modelos.

Tabla 5: Errores en los GCP en los software usados.

GCP	Error X (m)			Error Y (m)			Error Z (m)			Error3D (m)		
	PIX4D	ZEPHYR	AGISOFT	PIX4D	ZEPHYR	AGISOFT	PIX4D	ZEPHYR	AGISOFT	PIX4D	ZEPHYR	AGISOFT
C01	0.000	-0.010	0.007	-0.002	0.002	-0.004	0.002	-0.004	-0.005	0.005	0.011	0.009
C05	0.000	0.016	-0.003	-0.002	0.000	0.003	0.006	-0.004	-0.009	0.005	0.016	0.011
C04	-0.003	-0.002	0.001	0.001	0.000	0.003	0.008	0.001	0.006	0.003	0.002	0.007
C05	0.000	0.007	-0.008	-0.003	-0.003	0.011	0.005	0.002	-0.005	0.011	0.008	0.014
C06	0.036	0.026	0.001	-0.011	0.010	-0.002	-0.017	0.008	0.006	0.014	0.029	0.007
C07	0.009	0.016	-0.015	0.002	0.002	0.004	-0.071	-0.072	0.075	0.072	0.074	0.077
C08	0.002	0.010	-0.004	-0.005	-0.002	0.006	0.000	0.000	0.004	0.008	0.010	0.009
C09	-0.006	0.000	0.004	0.013	0.015	-0.012	-0.007	0.006	0.009	0.019	0.016	0.016
C10	-0.001	0.001	0.005	0.013	0.010	-0.010	-0.002	-0.002	0.006	0.015	0.010	0.013
C11	-0.025	-0.028	0.031	0.043	0.059	-0.056	0.079	0.084	-0.079	0.110	0.107	0.102
C12	0.002	0.003	-0.001	-0.012	-0.005	0.009	-0.004	0.000	0.003	0.015	0.005	0.009
C13	0.009	0.009	-0.013	-0.026	-0.023	0.025	-0.007	0.002	0.009	0.035	0.025	0.030
C14	0.000	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	-0.008	0.000	0.004	0.004	0.003	0.005
C15	0.003	0.013	-0.003	-0.014	0.001	0.016	-0.005	-0.004	0.000	0.027	0.014	0.016
Mean absolute error (m)	0.002	0.004	0.000	0.000	0.005	0.000	-0.002	0.001	0.000	0.024	0.024	0.023
Dev. standard (m)	0.013	0.013	0.011	0.016	0.018	0.019	0.030	0.031	0.031	0.031	0.030	0.029

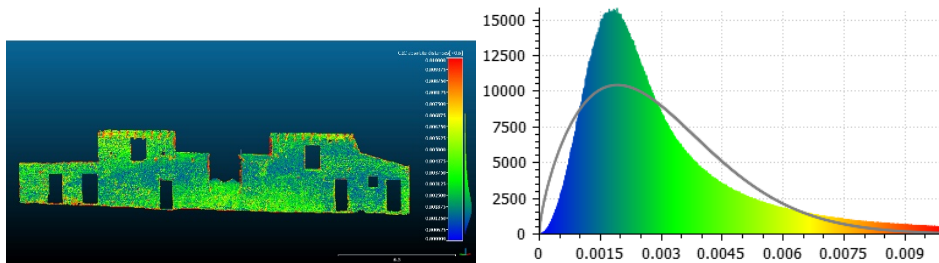


Figura 28: La comparación entre las nubes de puntos fotogramétricas de Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper (sx) y el gráfico de dispersión correspondiente con la distribución de Weibull (dx). El gráfico tiene sobre el eje x los valores de desviación (m) y sobre el eje y el número correspondiente de puntos confrontado de los dos modelos.

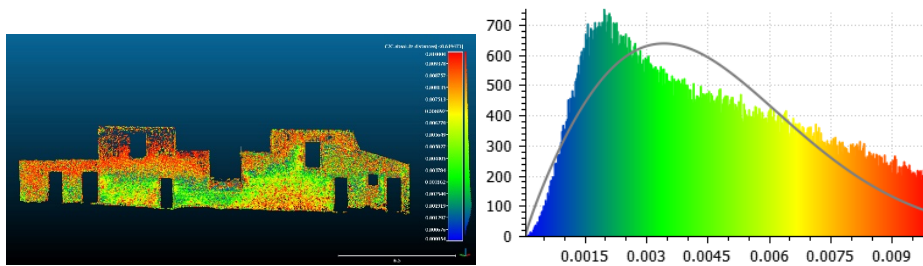


Figura 29: La comparación entre las nubes de puntos fotogramétricas de Agisoft PhotoScan y 3DF Zephyr Aerial (sx) y el gráfico de dispersión correspondiente con la distribución de Weibull (dx). El gráfico tiene sobre el eje x los valores de desviación (m) y sobre el eje y el número correspondiente de puntos confrontado de los dos modelos.

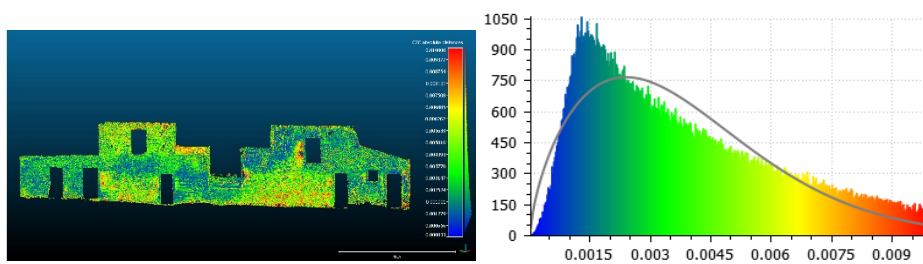


Figura 30: La comparación entre las nubes de puntos fotogramétricas de Pix4DMapper y 3DF Zephyr Aerial (sx) y el gráfico de dispersión correspondiente con la distribución de Weibull (dx). El gráfico tiene sobre el eje x los valores de desviación (m) y sobre el eje y el número correspondiente de puntos confrontado de los dos modelos.

Un valor positivo indica una asociación positiva, o bien, al aumentar valor de una variable, también aumenta el valor de la otra variable mientras un valor negativo indica una asociación negativa.

El método estándar usado por los estadísticos para medir el significado de sus análisis empíricos es el valor p (valor p).

Un bajo valor de p (como 0.05) se toma como prueba de que la hipótesis nula puede ser rechazada ($H_0: \rho = 0$, donde el coeficiente de correlación ρ es la relación entre la covarianza entre las dos variables y el producto de sus desviaciones estándar). Un valor de p bajo implica que el parámetro es altamente significativo.

La Tab. 6 muestra que el valor p máximo no excede en la mayoría de los casos (23/35) un valor $p < 5\%$, por lo tanto existe una buena correlación entre los errores calculados en los diversos programas.

3.5 CONCLUSIONES

Aunque hay objetivos gran angulares con menores distorsiones, las dimensiones de un GoPro y su control por conexión Wi-Fi han facilitado y simplificado la fase de adquisición fotográfica. Ha sido posible utilizar un asta telescópica simple y económica para realizar las fotos para toda la altura del muro y, a pesar del espacio estrecho y con un equipo a bajo coste, con un número limitado de imágenes ha sido conseguida la total cobertura horizontal y vertical del muro. Una action camera representa un instrumento low-cost que puede tener muchas aplicaciones, por lo tanto parecía interesante averiguar el comportamiento y la fiabilidad métrica de la aplicación fotogramétrica en situaciones extremas como en este caso de estudio. El análisis desarrollado nos permite considerar aceptable la precisión conseguida utilizando un action camera para aplicaciones de fotogrametría (error medio máximo de 3,5 cm Tab. 4).

La comparación entre los softwares probados exhibe que los resultados considerados pueden ser comparables: la desviación máxima entre nubes de puntos es de unos 3 mm (comparación entre Agisoft y 3DF Zephyr), correspondiente a la máxima frecuencia en la distribución de Weibull. La prueba realizada nos permite deducir que los sensores a bajo coste tipo action

cameras pueden ser considerados un instrumento útil para el levantamiento de los Bienes Culturales. Las principales ventajas de esta tecnología son el coste de la instrumentación y la facilidad de empleo de la cámara fotográfica. Las adquisiciones con este tipo de cámara han reducido notablemente los tiempos de adquisición y simplificación del levantamiento en situaciones de espacios estrechos.

En una fase anterior de esta búsqueda, ha sido utilizado un programa externo para corregir las distorsiones de cada imagen, antes de importarlo en el software fotogramétrico. En el ámbito del proyecto de investigación PRIN 2010-2011 "Prospettiva architettonica: conservazione digitale, accesso ai contenuti e analisi" han sido reconducidos los estudios y los análisis iniciales.

Estas primeras actividades han demostrado que el empleo de un pre-filtro externo de las imágenes, por ejemplo con el instrumento "corrección lente" de Adobe Photoshop, puede ser útil cuando el software fotogramétrico no posee algoritmos "interiores" tales de corregir en automático las distorsiones de un objetivo fisheye.



Figura 31: Ortofoto y vista desde el alto de imágenes filtradas en Pix4Dmapper.

Tabla 6: Descartes de los GCP a través de pre-filtración de imágenes en Adobe Photoshop.

GCPs	AGISOFT 1.1.6				PIX4D MAPPER 1.4.46			
	Non Filtrate		Filtrate		Non Filtrate		Filtrate	
	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z
P01	0.008	0.005	0.036	0.066	0.007	0.003	0.254	0.021
P02	0.009	0.011	0.002	0.093	0.003	0.011	0.047	0.021
P03	0.010	0.000	0.011	0.035	0.007	0.006	0.421	0.036
P04	0.002	0.008	0.017	0.076	0.009	0.012	0.802	0.015
P05	0.007	0.066	0.018	0.095	0.012	0.017	1.024	0.020
P06	0.015	0.001	0.004	0.015	0.005	0.070	0.847	0.024
P07	0.008	0.006	0.021	0.060	0.006	0.005	0.402	0.014
P08	0.008	0.007	0.004	0.047	0.013	0.002	0.520	0.012
P09	0.004	0.005	0.021	0.013	0.001	0.002	0.087	0.021
P10	0.007	0.003	0.016	0.029	0.003	0.002	0.111	0.002
P11	0.002	0.004	0.005	0.044	0.001	0.001	0.246	0.020
P12	0.002	0.001	0.021	0.044	0.009	0.002	0.308	0.022
P13	0.012	0.005	0.031	0.094	0.007	0.006	0.581	0.022
P14	0.004	0.003	0.001	0.029	0.005	0.005	0.668	0.011
Errore medio (m)	0.007	0.009	0.015	0.053	0.006	0.010	0.323	0.019

En las pruebas desarrolladas se encontró que en la versión de Agisoft PhotoScan (1.1.6 build 2038) que prevé la opción “Fisheye” para la definición en input de este específico tipo de cámara, se consiguen mejores resultados con respecto de aquellos conseguidos de la elaboración de imágenes filtradas; por este realce los resultados demuestran que la implementación de un filtro de pre-tratamiento digital resulta desafortunadamente en vano. En cambio, es de señalar que en las anteriores versiones, donde tal calibración no fue desarrollada todavía, los resultados conseguidos para la elaboración de imágenes filtradas resultaron ser métricamente mejores con respecto de aquellos generados por tomas toscas. De otra manera en Pix4DMapper, se puede observar como las medias calculadas para la elaboración de imágenes filtradas están extremadamente reducidas; de otra manera los errores métricos verificables con las imágenes filtradas son de un orden de tamaño más elevado. Este comportamiento es debido a la optimización del algoritmo de Pix4D Mapper por imágenes por GoPro; pues, en este caso, el re-procesamiento de imágenes filtradas o bien ya depuradas por las aberraciones ópticas, frustra de hecho la especificidad del mismo software. La fig. 32 muestra la ortofoto y la vista por lo alto del mismo muro perimetral, utilizando las mismas imágenes pero depuradas para los efectos a barril por el instrumento “corrección lente” de Adobe Photoshop, elaborado en Pix4Dmapper.

4 FOTOGRAMETRÍA CON VANT CON ADQUISICIÓN EN MODALIDAD MANUAL: EL CASO DE ESTUDIO DE “VIA DI NOCERA” (EXCAVACIONES ARQUEOLÓGICAS DE POMPEYA)

4.1 RESUMEN

El levantamiento aéreo en el campo de la arquitectura y arqueología, está demostrando mayor interés, principalmente luego del desarrollo tecnológico de los VANT (Vehículo aéreo no tripulado) o más conocido en su término en inglés UAV (Unmanned Aerial Vehicles). En los últimos años, en efecto, estos medios han mejorado notablemente sus características, ya sea, el tiempo y la estabilidad del vuelo, y el payload. Al mismo tiempo, hemos sido testigos del desarrollo tecnológico de los sensores pasivos, capaces en pocos años, de la miniaturización, que abre nuevas fronteras en el levantamiento fotogramétrico, situación que pocos años atrás era inimaginable. En este desarrollo, ha contribuido también el progreso de los softwares de fotogrametría digital, con la introducción de nuevos algoritmos de cálculo – Structure from Motion –, para la restitución de ortofotos de alta definición, muchas veces requisito esencial para la documentación y la conservación del patrimonio arqueológico. Precisamente en este ámbito de investigación se localiza el caso de estudio, aquí presentado con un objetivo principalmente divulgativo, del levantamiento fotogramétrico por medio de VANT de Via di Nocera, en el área arqueológica de Pompeya, patrimonio de la Unesco desde el lejano 1997. Desde el procesamiento de las imágenes, capturadas a partir de una precisa campaña de recolección y con la utilización de los necesarios Ground Control Point (GCP), ha sido restituida una ortoimagen de alta resolución y georreferenciada. El análisis métrico respecto los GCP ha evidenciado errores puntuales inferiores a los 2 cm, validando métricamente la

representación para piezas gráficas en escala 1:50 (o incluso más grande), esencial para una detallada documentación del pavimento y permitiendo también, de esta manera, una nueva lectura del relativo estado de degrado.

4.2 INTRODUCCIÓN

La documentación en ámbito arqueológico siempre solicita un mayor grado de definición gráfica y precisión métrica, requisitos que nos impulsan hacia el empleo de instrumentaciones y metodologías cada vez más avanzadas. Como sabemos, estamos asistiendo a una migración de la implementación de métodos tradicionales de recogida “puntual” de los datos, levantamientos directos y topográficos (con GPS, estación total, etc), hacia sistemas de adquisición “continúa” a elevada o completa ‘automatización’ - sistemas range-based o image-based - que restituyen una cantidad de datos extremadamente elevados y detallados, en tiempos cada vez más breves. En las aplicaciones de la fotogrametría en campo arqueológico, por ejemplo, los así llamados sistemas VANT han cobrado un notable éxito; ya múltiples son los ejemplos en literatura de su empleo, más o menos científico, algunos que involucran la misma documentación de varias partes de las Excavaciones Arqueológicas de Pompeya. El mayor recurso de esta técnica, con respecto del más tradicional fotogrametría aérea, está atada esencialmente a la menor altura de vuelo obtenible y al consiguiente mayor grado de resolución en tierra; de igual importancia es la facilidad de empleo y los menores costes de gestión y ejecución (sobre todo para áreas reducidas). El uso principal de los UAV en arqueología, en la actualidad, se limita a la documentación de lo visible mediante la adquisición de tomas fotográficas de baja altitud que, procesadas en aplicaciones fotogramétricas, se transforman geoméricamente en modelos métricamente confiables (bidimensionales y / o tridimensionales)), para una correcta representación y conocimiento del área bajo investigación. Las posibilidades ofrecidas por la fotogrametría 3D y el continuo desarrollo de cámaras digitales a gran resolución, adjuntas a una continua miniaturización del sensor y el cuerpo de la cámara, permiten un incremento exponencial de las implementaciones. Este trabajo, en particular, presenta una síntesis de los resultados conseguidos por un levantamiento fotogramétrico llevado a cabo a finales de septiembre del 2015 con un hexacóptero experimental puesto a punto por el grupo de *ricerca* activa del

Laboratorio Modelo de la Universidad de Salerno, relativo a la adquisición de la Via di Nocera en el ámbito del “Piano della conoscenza, servizi di diagnosi e monitoraggio dello stato di conservazione di Pompei”.

4.3 MARCO HISTÓRICO DE VIA DI NOCERA

La dimensión del sitio arqueológico de Pompeya (66 hectáreas de las cuales cerca de 50 excavadas) vuelve particularmente compleja la inmediata identificación de los espacios públicos y privados. En el 1858 Giuseppe Fiorelli puso a punto el sistema “catastral” con la Ciudad antigua dividida en nueve barrios (regiones), cada uno formado por manzanas (*insulae*), con las relativas viviendas (*domus*) y tiendas.

Los primeros hallazgos sobre la colina del Civita, bajo el que Pompeya yació, remontan a la época de la construcción del Canal de Sarno, ejecutada bajo la dirección de Domenico Fontana entre el 1592 y el 1600.

Desde entonces se han realizado muchas excavaciones arqueológicas y, en el período entre el 1950 y el 1961, fue hallada la mayor parte del *regio* II, a lo largo del cuadrante sudeste de la Ciudad, incluida entre el *decumanus maximus*, Via dell’Abbondanza, e il *cardo*, la actual Via di Nocera. Esta última, cruza al Sur Via di Castricio e Via della Palestra, para luego acabar en Porta Nocera, ubicado entre las torres ellenistiche II y III de la muralla que divide la Ciudad de la Necropoli di Porta Nocera (fig. 32).

En el 1886 a la profundidad de 3,40 m fueron hallados los primeros restos del zócalo de la calle de Via di Nocera y, en el 1952, Pietro Soprano halló la continuación de la misma calle de ancho 4,50 m, constituidas por grandes piedras de lava formando el adoquinado de una calle pública con orientación perpendicular al eje vial, surcada por anchos y profundos carriles; sucesivamente, el arqueólogo alemán August Mau reportó Porta Nocera.

Es en este punto donde se intersecan Via di Nocera e Via Pomeriale (la calle externa a las paredes), hallada en parte por el mismo Mau, donde en los dos márgenes se encuentran, en forma paralela, las necrópolis.

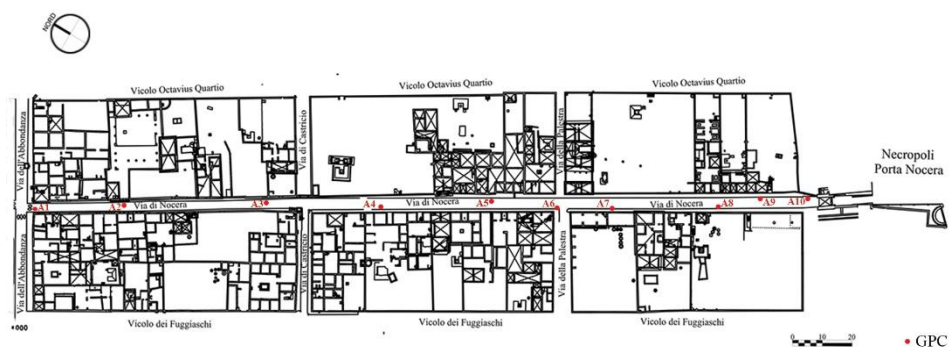


Figura 32: planimetría de Vía di Nocera (Pompeya).

Para igualar la viabilidad interior al área de sedime de las paredes externas, fueron efectuadas algunas intervenciones de alteración del contexto geomorfológico: se nota que el plan vial saliente de Porta Nocera (Via di Nocera), después de la deducción de la Colonia, fue bajado unos dos metros, así de llevar a la luz las fundaciones de la misma Porta.

Coherente con las intervenciones de adecuación, encontramos las tumbas republicanas ubicadas a la altura establecida por el nuevo orden vial que tuvo que ser realizado entre la edad republicana y la primera edad augustea.

Las excavaciones metódicas de la exploración de las capas inferiores al nivel del 79 d.C. ejecutados en el área de la necrópolis de Puerta Nocera han sido fundamentales para señalar el cumplimiento de la delimitación de la Ciudad y para la búsqueda de las fases más antiguas de ella.

4.4 LA INSTRUMENTACIÓN PARA EL LEVANTAMIENTO

Para el levantamiento ha sido utilizado un sistema experimental de despegue y aterrizaje vertical (Vertical Take Off and Landing) comúnmente dicho “multicoptero.” El vehículo, en fig. 33, ideado y ensamblado en el 2014 es puesto al día continuamente; por ejemplo, nacido como cuadricoptero, con el cual se ha iniciado la actividad de campo, ha sido al final transformado en un hexacoptero para una mayor potencia de los motores y, por lo tanto, un mayor

payload. Está dotado con 6 alas rotatorias, con un peso neto del sensor de unos 2,3 kg (comprendidas las baterías, dos LiPo 6s) y permite levantar un payload máximo de 1 kg.

El equipo completo tiene previsto muchas fichas de control y un complejo conjunto de sensores de navegación.

En particular, los elementos que lo han caracterizado durante los vuelos en Pompeya han sido:

- Telar Quadframe de carbono y fibra de vidrio a seis bracci;
- 6 motor Brushless de 740 kV con hélices 14 x 5 cm;
- 6 tarjetas ESC (Electronic Speed Controller) FullPower 40A que regulan la velocidad de rotación de los motores;
- Tarjeta Flight Control (FC) DJI Wookong que utiliza un receptor dedicado para mandos dirigidos por el piloto por radio comando y un procesador para interpretarlos. En combinación con los otros sensores instalados, define la justa tensión a dar a los motores, regulando, por consiguiente, su velocidad de rotación. El FC además de administrar la estabilidad dirige las varias modalidades de navegación, “asistida”(por el módulo GPS) y “manual”. En el específico, aquella asistida prevé dos ulteriores opciones, “GPS Altitud”(con módulo GPS) o simple modalidad “Altitud”, con el piloto que puede conmutar de una a la otra para perseguir diferentes peculiaridades de vuelo;
- radio comando Graupner MX16 de 2,4 GHz que permite el control del gimbal y la consiguiente rotación de la cámara a lo largo de los 3 ejes;
- radio comando Futaba 2,4 GHz S-FHSS que además de garantizar el pilotaje del medio de parte de un operador, activa remotamente las diferentes modalidades de vuelo, los ajustes y/o el bloqueo de la altura definido por el altímetro;
- receptor GPS DJI Naza M Lite que interactúa con el FC para la navegación GPS, haciendo posibles las modalidades de vuelo que disfrutan y necesitan datos del satélite, como en el caso de planes de vuelo;
- gimbal Brushless a 3 ejes con motor del tipo iPower Motor GMB4008-150t, un sostén siervo-asistido también indicado para reanudaciones de tipo cinematográfico (para una mayor fluidez de los movimientos).

Además, en esta aplicación ha sido utilizada una cámara mirrorless, una Sony Alpha 6000 con sensor APS CMOS Exmor HD de 24 megapíxeles (6000 x 4000 pixel), de tamaño 23,5 x15,6 mm, con procesador BIONZ X y óptica Sony Y-Mount fija de 16 mm; la dimensión del relativo Pixel Size es de 4 µm.

La cámara digital, obviamente, ha sido montada sobre el gimbal para tener electrónicamente rotaciones controladas. Los movimientos del sostén, además de compensar las naturales vibraciones durante el vuelo, garantizan la unidireccionalidad del eje óptico, eventualmente ajustable también manualmente a través de un adecuado control sobre el radio comando que gobierna la inclinación de la cámara según las 3 direcciones predefinidas (modificables durante el mismo vuelo): horizontal, nadiral o inclinada a 45° (este último útil sobre todo para la reanudación de eventuales cuadrantes y para garantizar una mejor conformación espacial de las tomas). A cumplimiento del sistema ha sido instalada una telecámara a baja resolución, con transmisión analógica a tiempo real a 2,4 Mhz, por el que, con conexión wireless, ha sido posible visionar, en directa por el receptor a tierra, cuánto observado por la misma telecámara en fase de vuelo y también pilotar el medio cuando la distancia era tal de ya no poder conducir el dron a vista.

En Pompeya, con base en las experiencias realizadas, se ha proyectado obrar con la presencia de un ingeniero fotogramétrico, tal que el piloto certificado pudiera conducir el instrumento a vista hasta cuando sea posible, mientras el técnico, en posesión del radiocomando del gimbal, pudiera visualizar las imágenes transmitidas por wireless y dirigir la cámara durante el vuelo. Durante el vuelo la captura ha sido controlable remotamente según 3 modalidades, de la cual dos para accionamiento manual a través de radiocomando (captura individual o time-lapse regulado), más una tercera totalmente automática con capturas en correspondencia al paso del medio sobre un waypoint, anteriormente artificioso con base en el proyecto del plan de vuelo. Obviamente, para la correcta correspondencia métrica a tierra de las restituciones procedentes de la elaboración fotogramétrica de las imágenes es indispensable (y al mismo tiempo a menudo descuidada) una esmerada campaña topográfica.



Figura 33: El hexacoptero y una fase de toma de los fotogramas.

En el caso en examen, el trabajo de campo ha visto el empleo de una estación total Leica TCR 705, cuyas características se muestran en fig. 34; cada GCP ha sido señalado a tierra por una adecuada tarjeta fotogramétrica, representado en fig.35.

Dati tecnici	
Misura degli angoli	
Metodo	assoluto, continuo
Scostamento standard	5" (1.5mgon)
Risoluzione del display	1" (0.5mgon)
Cannocchiale	
Ingrandimento	30x
Campo visivo/distanza di messa a fuoco min.	1° 30' (26 m a 1 km)/1,7 m
Misura della distanza (IR)	
	laser ad infrarossi
Portata su prisma circolare GPR1 (Leica)	3000m (condizioni medie)
Portata su pellicola riflettente (60mm x 60mm)	250m
Risoluzione del display	1mm
Scostamento standard/tempo di misura (IR)	
	laser ad infrarossi
Modo precisione	2mm + 2ppm/< 1 sec
Modo rapido	5mm + 2ppm/< 0.5 sec
Modo tracciamento	10mm + 2ppm/< 0.15 sec

Figura 34: Características de la Estación Total Leica TCR 705 (www.leica-geosystems.it).



Figura 35: 'Juego' topográfico y ejemplo de las tarjetas fotogramétricas utilizadas.

4.5 LA ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS DATOS

Para la adquisición de las tomas fotogramétricas se ha optado por una modalidad de captura manual, en cuanto, a la presencia de algunos obstáculos presentes a los lados de la Via di Nocera habría inevitablemente llevado a una mayor altimetría en la proyección de un plan de vuelo automático, eso en detrimento del detalle a tierra. Han sido así adquiridas en modalidad time-lapse, con intervalos de 2 segundos, 741 imágenes con 3 pases consecutivos. El primer vuelo ha previsto una adquisición nadiral, con 360 tomas fotográficas; siguieron, por lo tanto, otros dos vuelos con la cámara inclinada cerca de 45° sobre la posición horizontal de las aceras (para restituir en post-elaboración el detalle del levantamiento) adquiriendo, respectivamente, otras 138 y 243 fotografías (la diferencia en el número de los fotogramas es debida esencialmente a la necesidad de superar mayores obstáculos diseminados a lo largo del lado que ha solicitado el mayor número de tomas). En vuelo nadiral se ha realizado de Noroeste a Sureste, con una altura media de vuelo igual a 17 m sobre el plano de influencia, el que ha comportado un "abrazamiento" de los fotogramas de 25,0 x 16,5 m. Los otros dos vuelos con cámara fotográficas inclinada a 45° , con una altura media

de vuelo igual a 11 y 16 m, han tenido un “abrazamiento” de los fotogramas de 16,0 x 11,0 m y 23,5 x 15,6 m. Para comprender mejor la distribución espacial de las tomas fotogramétricas, en fig. 36 está representado un detalle de la “Camera positions”. Obviamente y como ya vuelto a llamar, a soporte de esta adquisición ha sido planeada una medición topográfica, con 10 GCP bien distribuidos a lo largo de toda la calle, necesarios para la verificación métrica y la georeferenciación. En efecto, el objetivo final de la elaboración de las imágenes fue la generación de una ortofoto de la Via di Nocera, de la intersección con Via dell’Abbondanza (al Norte) hasta Porta Nocera (al Sur).

El esquema de las siguientes operaciones por la restitución de modelos 2D y 3D, a través de la implementación de códigos open source o el recurso a productos comerciales, con y sin el auxilio del emplazado apoyo topográfico, es ilustrado en la fig. 37. Una primera prueba ha previsto la elaboración del set de tomas fotogramétricas utilizando códigos open source disponibles en red. En particular, para la elaboración de la nube de puntos ha sido implementado el software PMVS (Patch Múltiples Stereovision View), también empleando otras aplicaciones para la generación de la ortofoto final. La decisión final en esta primera elaboración ha sido generar expeditivamente el modelo 2D sin utilizar los GCP, también al objetivo de poder luego conducir ulteriores estudios y consideraciones. En las figuras. 38 pueden observar, la ortofoto integral de las aplicaciones open source y un detalle suyo. Sucesivamente, la ortoimagen ha sido importada en CAD, en el mismo sistema de referencia de los GCP, calculando los errores entre los puntos topográficos y los correspondientes centros de las tarjetas fotogramétricas así como visibles sobre la ortofoto. Los errores en las direcciones X y Y están representados en la Tabla 1; el error medio en el plano XY resulta estar a unos 10 cm, con un máximo en correspondencia del punto A4.

Una segunda elaboración de los datos ha sido en entorno Agisoft PhotoScan, versión 1.2.4 build 2399, que explota la tecnología SFM (Structure from Motion) Los algoritmos SFM son conocidos por su capacidad de engendrar modelos tridimensionales de una secuencia de imágenes bidimensionales, con aplicaciones en el campo de las técnicas fotogramétricas que se han desarrollado a partir de finales del siglo pasado, llegando a ser utilizados en estudios geológicos y sucesivamente en arqueología, arquitectura, agricultura e

ingeniería. En Agisoft PhotoScan el proceso de restitución se basa en cuatro conocidos step: Align Photos, Build Dense Cloud, Build Mesh y Build Texture.

En la fase de Align Photos son calculados los parámetros interiores de la cámara (largo focal, posición del punto principal, distorsiones radiales y tangenciales) junto a las determinaciones de las posiciones espaciales y la generación del Sparse Cloud. En la siguiente fase están reproyectados, para cada cámara alineada, un número mayor de pixel generando la que es la Denso Cloud; después, en la fase de Build Mesh, los puntos de la nube son sometidos a algoritmos de triangulación para tener un modelo poligonal sujeto a proyección de la textura en la relativa fase de Build Texture. En la fase de Align Photos han sido programados los parámetros: Accuracy = High, Key point limit = 40000, Tie point limit = 0, consiguiendo 2.192.020 puntos. En cambio, en la realización del Denso Cloud los parámetros utilizados han sido: Quality = High, Depth filtering = Moderadas, restituyendo 374.946.009 puntos. De la completa elaboración de las tomas fotogramétricas en este entorno software ha sido generado el modelo 3D de la entera Via di Nocera. El GSD medio del modelo fotogramétrico es igual a 1,80 mm, mientras que la altura media del suelo de las tomas fotogramétricas es de 15,9 m. En fig. 41, están representadas las vistas de la Dense Cloud siendo generada en Agisoft PhotoScan.

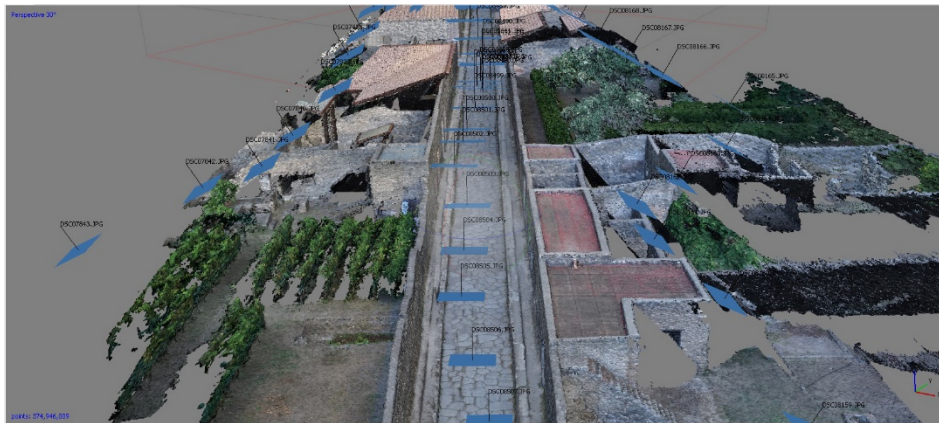


Figura 36: Distribución y configuración espacial de las tomas fotogramétricas.

El procedimiento para el cálculo de los errores sobre los individuales GCP tiene previsto la colimación de los mismos de parte del restituidor: solo señalando cada GCP en al menos 3 fotos, para un algoritmo de Bundle Adjustment, si es capaz de calcular el error entre el pixel haciéndolo coincidir manualmente por el operador y aquel calculado a causa del paradigma fotogramétrico, garantizando la verificación métrica del modelo generado.

Los errores de los GCP están representados en la Tabla 7 y 8. En función de los análisis sobre los errores de reproyección de los GCP utilizados para el proceso de orientación absoluta, se ha observado que la media de los errores fue inferior a los 2 cm, respetando las tolerancias del grado de resolución relativa para las representaciones a las escalas requeridas (1:50 o superior).

Se puede notar, además, que el máximo error sobre el plano XY es de 1 cm en correspondencia del punto de control A7, mientras que largo Z los errores en elevación son medianamente más grandes - ligeramente más de lo previsible a cada modo, el error medio de los tres ejes del modelo 3D no supera nunca los 2 cm.

Al final del proceso de Structure from Motion, extrayendo las informaciones sobre los errores de reproyección en el Sparse Cloud, se puede notar que el error máximo está alrededor de los 10 mm.

Ploteando un histograma en cuyas abscisas encontramos el error de reproyección y en las ordenadas el número de puntos comprendido en aquella clase, y además asumiendo una distribución de Gauss, podemos extraer el valor medio de la desviación estándar del error de reproyección (respectivamente μ_{er} e s_{er}). Los valores estimados por la modalidad de levantamiento efectuada son $\mu_{er} = 0.94$ mm y $s_{er} = 0.90$ mm.

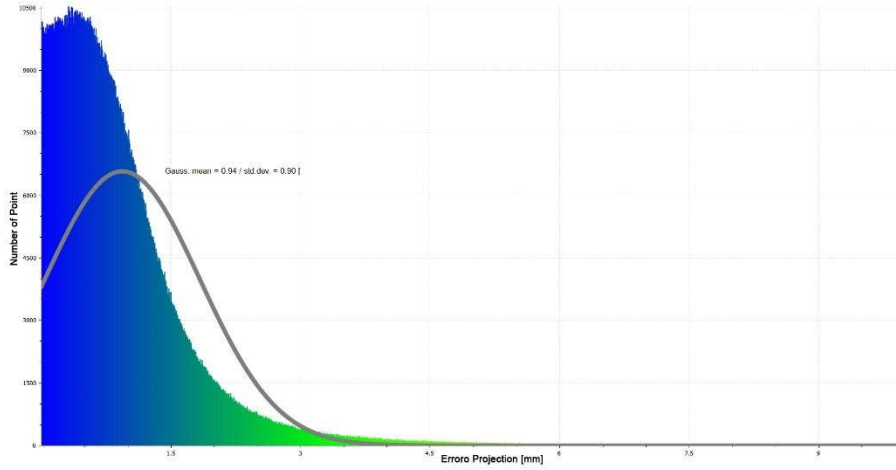


Figura 37: Histograma de los errores de reproyección para cada punto del Sparse Cloud.

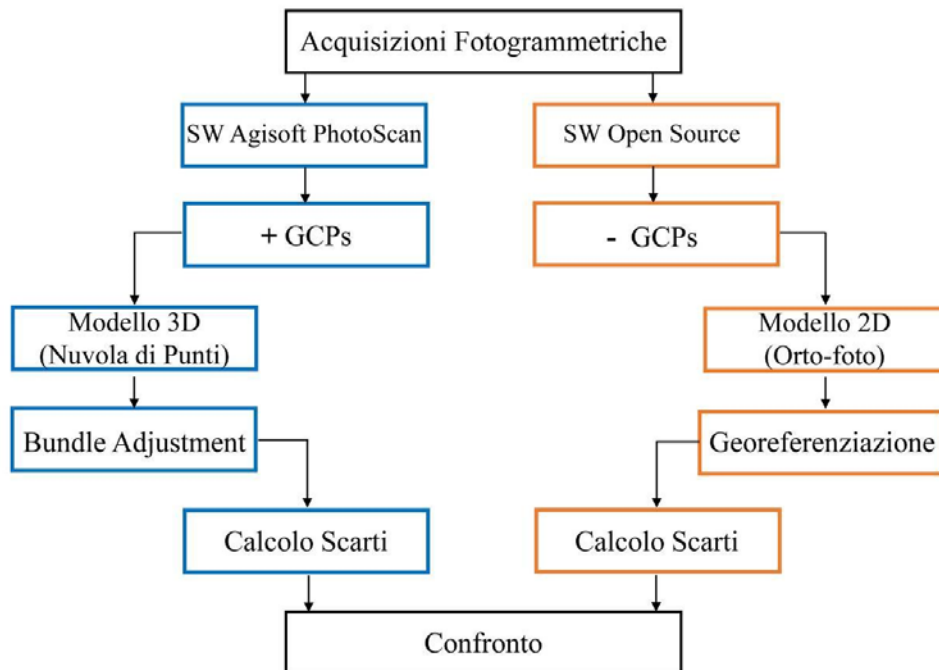


Figura 38: Flow-chart.

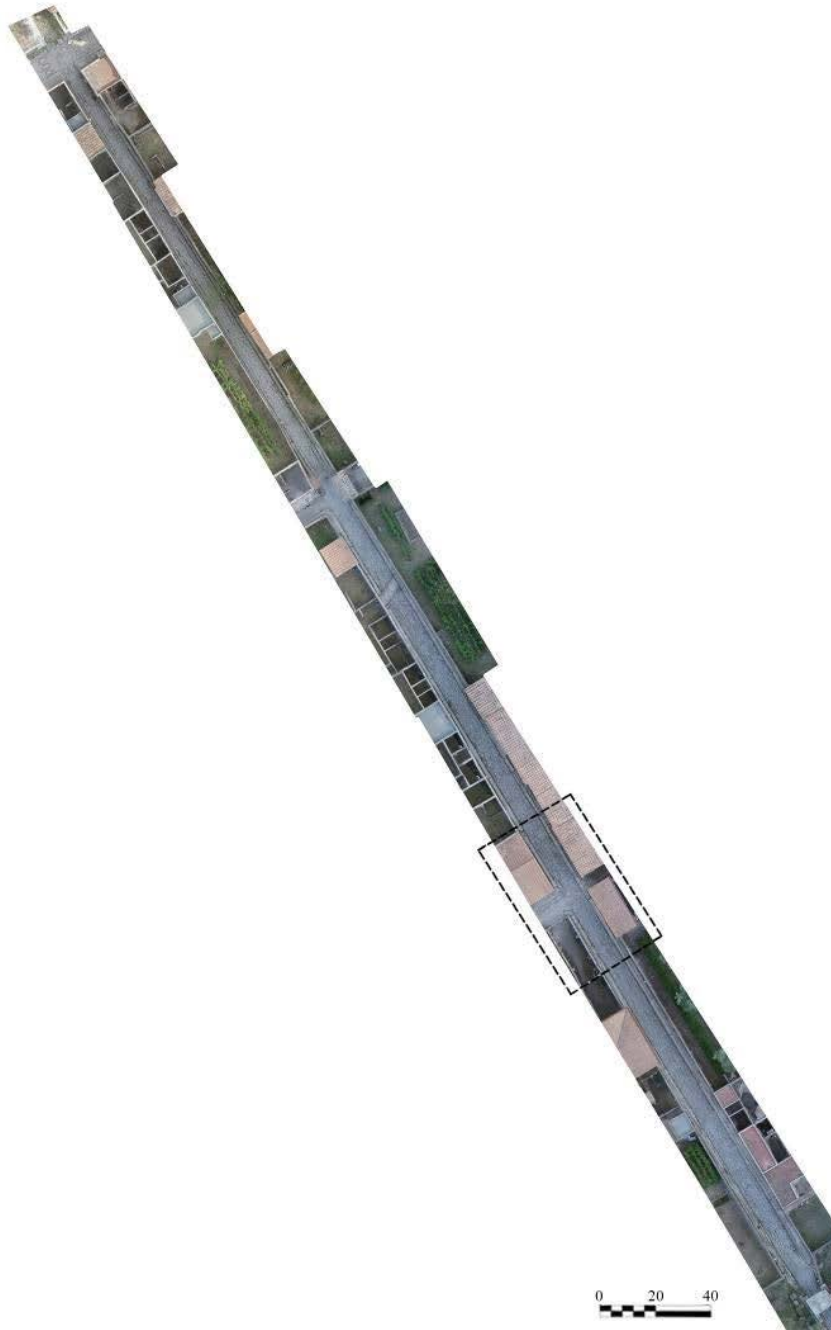


Figura 39: Ortofoto de Via di Nocera.



Figura 40: Detalle de la ortografía producida con el recurso aplicativo open source.



Figura 41: Visualización de la Dense Cloud en Agisoft PhotoScan.

Tabla 7: Cálculo de los errores de reproyección (ortofoto de aplicaciones open-source).

<i>GCP</i>	<i>X/East</i>	<i>Y/North</i>	<i>Z/Altitud</i>	<i>Error X (m)</i>	<i>Error Y (m)</i>	<i>Error Z (m)</i>
A1	2477243,992	4511088,678	15,451	0,0868	0,0703	0,1117
A2	2477235,898	4511092,650	16,796	0,0821	0,1440	0,1658
A3	2477211,900	4511144,217	18,419	-0,1081	0,0380	0,1146
A4	2477182,636	4511182,207	19,493	0,1542	0,0703	0,1695
A5	2477154,702	4511236,475	20,543	-	-	-
A6	2477144,816	4511247,843	20,851	0,0940	0,0425	0,1032
A7	2477142,627	4511258,026	21,305	-0,0753	-0,0478	0,0892
A8	2477134,208	4511271,642	21,894	-0,0739	-0,0585	0,0943
A9	2477109,663	4511304,036	23,147	0,0844	0,0645	0,1062
A10	2477103,848	4511317,733	23,047	-0,0705	0,0372	0,0797
Mean absolute error (m)				0,0064	0,0047	0,0179

Tabla 8: Cálculo de los errores de reproyección (en Agisoft PhotoScan).

<i>GCP</i>	<i>X/East</i>	<i>Y/North</i>	<i>Z/Altitud</i>	<i>Error X (m)</i>	<i>Error Y (m)</i>	<i>Error Z (m)</i>
A1	2477243,992	4511088,678	15,451	0,0150	0,0002	0,0063
A2	2477235,898	4511092,650	16,796	0,0024	0,0024	0,0100
A3	2477211,900	4511144,217	18,419	0,0040	0,0050	0,0240
A4	2477182,636	4511182,207	19,493	0,0090	0,0060	0,0100
A5	2477154,702	4511236,475	20,543	0,0150	0,0007	0,0110
A6	2477144,816	4511247,843	20,851	0,0050	0,0062	0,0180
A7	2477142,627	4511258,026	21,305	0,0020	0,0110	0,0190
A8	2477134,208	4511271,642	21,894	0,0080	0,0050	0,0280
A9	2477109,663	4511304,036	23,147	0,0010	0,0020	0,0023
A10	2477103,848	4511317,733	23,047	0,0030	0,0090	0,0500
Mean absolute error (m)				0,0064	0,0047	0,0179

4.6 CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo se propuso como objetivo secundario aquel de probar un hexacoptero ensamblado por parte del grupo de *ricerca* del Laboratorio Modelo de la Universidad de Salerno y valorar los resultados métricos obtenibles para un proceso fotogramétrico de tipo Structure from Motion, con el empleo de códigos open source y en entorno Agisoft PhotoScan, con y sin apoyo topográfico. También en ausencia de un plan de vuelo, con la adquisición de las tomas en modalidad manual y capturas en time-lapse, el sistema y la metodología han permitido la adquisición y la restitución de un correcto proceso fotogramétrico. Al término de las elaboraciones, el output con apoyo topográfico o bien el modelo 3D, respetó a las tolerancias atadas al grado de resolución relativa para una representación en la escala requerida (1:50); sea del punto de vista del máximo error de reproyección sobre los individuales puntos de la nube, sea sobre el error medio sobre los individuales GCP. De otra manera, el modelo 2D sin apoyo topográfico (como fue banal observar), solo presentó errores medios sobre el plano horizontal válido para representaciones gráficas rápidas y escalas notablemente más pequeñas. El caso de estudio expuesto demuestra, por lo mucho, una vez más, que con la metodología fotogramétrica, implementada a través de una instrumentación experimental con tiempos relativamente breves, de adquisición (unos 24 minutos) y de post-procesos (unas 48 horas) se pueden conseguir restituciones y productos gráficos métricamente correctos, siempre que se lleve todo a un enfoque técnico-científico.

La documentación para la conservación y la posible mejora del elemento detectado será efectiva si se determina en total conformidad con el paradigma fotogramétrico, dónde la exigencia de mediciones no puede ser limitada a la sola fase de escalado de los modelos. El empleo de sistemas UAV en fotogrametría, en efecto, caracterizará correctamente la próxima producción cartográfica a elevadas escalas de detalle operando con un real control sobre la propagación de los errores, como se ha tratado de hacer en el caso en examen; de lo contrario, será solo una moda a perseguir la última tecnología, un juguete que va más allá de cualquier contexto teórico.

5 GEOREFERENCIACIÓN DE LOS DATOS FOTOGRAMÉTRICOS CON VANT POR MEDIO DE DATOS DE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE: EL ANFITEATRO ROMANO DE POMPEYA

5.1 INTRODUCCIÓN

En el campo del levantamiento arquitectónico la integración entre los diferentes métodos de adquisición digital tridimensional permite compensar los límites de los enfoques individuales para obtener modelos cada vez más completos, a partir de los cuales extraer una cantidad de información útil para diferentes análisis. A menudo en efecto, si nos encomendamos a la sola técnica fotogramétrica, algunas zonas de la manufactura a levantar, por ejemplo en total o parcial ausencia de luz, serían difícilmente detectables por la sola vía fotogramétrica. Nace la necesidad de integrar el trabajo fotogramétrico con instrumentación a luz estructurada, como por ejemplo un TLS; el láser escáner en efecto, clasificable notoriamente en la clase de los sensoriales activos, no necesita luz natural, que influencia esencialmente sólo a la fase de la toma del color (si es necesaria). Este caso de estudio presenta una metodología de levantamiento integrada entre instrumentos activos y pasivos, aplicados a tierra (TLS) y de VANT, para conseguir un modelo multi-resolución completo, apto a diferentes escalas de estudio y de visualización. El caso de estudio objeto de la experimentación es en el conocido Anfiteatro romano de Pompeya, donde se tuvieron a disposición una nube TLS georeferenciada y una adquisición aerofotogramétrica con drones. La prueba ha utilizado como GCP para la fase de orientación absoluta de la nube fotogramétrica, puntos naturales medidos directamente de la nube TLS. El procedimiento de alineación ha sido refinado a través del algoritmo ICP, para minimizar los descartes métricos entre la nube de puntos fotogramétrica y TLS. Las desviaciones entre las nubes han sido comparadas desde el punto de vista estadístico, verificando cuales puedan ser los errores obtenidos del procedimiento ejecutado.

5.2 ANÁLISIS TÉCNICO ESTRUCTURAL: EL ANFITEATRO ROMANO DE POMPEYA

La importancia histórica del anfiteatro romano de Pompeya no reside solamente en el hecho de que representa el ejemplo más relevante y mejor guardado de este tipo de edificio, pero sobre todo, en ser el espejo de acontecimientos y aspectos de la historia romana local.

El anfiteatro surge en un área marginal de la ciudad, en el rincón sudeste de la muralla. Esta zona de la ciudad antigua, como revelan excavaciones recientes, fue ocupada anteriormente por edificios de carácter privado, probablemente casas, que datan del siglo III y II A.C.

El edificio explota el *aggere* de las paredes a Sur y a Este, en un área donde ya debieron haber caído en desuso después del asedio de las 89 a.C; el resto del terraplén de la *cavea* fue realizado sobre los lados Norte y Oeste acumulando la tierra conseguida por la excavación de la arena con cerca de 6 m de profundidad. La arena presenta una forma alargada y sus ejes principales miden respectivamente 66,8 x 34,5 m; está separada por la *cavea* con un podio de alto 2,18 m originariamente decorado con murales imitando losas marmóreas. La fachada del edificio está constituida por grandes arcadas ciegas revestidas por paramentos murales en *opus*, caracterizado por bloques de piedra lava con la añadidura de bloques de caliza en las esquinas de los *pedritti* y en los sofitos de los arcos. Dos grandes pasillos ubicados a las extremidades de los ejes principales permitieron el acceso a la arena del Norte y Sur; junto a las dos puertas monumentales, están situados dos entornos convertidos (*cárceles*) abiertos sobre las galerías de entrada por puertas individuales. Otras dos galerías vueltas, situadas en el sector occidental, desembocan en un pasillo anular cubierto con bóvedas de cañón que va a constituir una *crypta* subdividida en cuatro sectores. Tal ambulatorio permite alcanzar el podio y el *ima cavea* a través de graderías a tramo individual, y la *media cavea* a través de las aberturas que conducen a una profunda trinchera dotada con escalinatas a doble tramo. A lo largo del tambor externo se encuentran seis grandes escaleras, dos dobles y dos individuales, por los que se llega a una galería abierta abastecida de cuarenta arcadas que conducen a la *summa cavea*. En el sector occidental, un estrecho paso convertido conduce a las *tribunas*, y a un pequeño entorno que pudiera ser interpretado como un *spoliarium*.

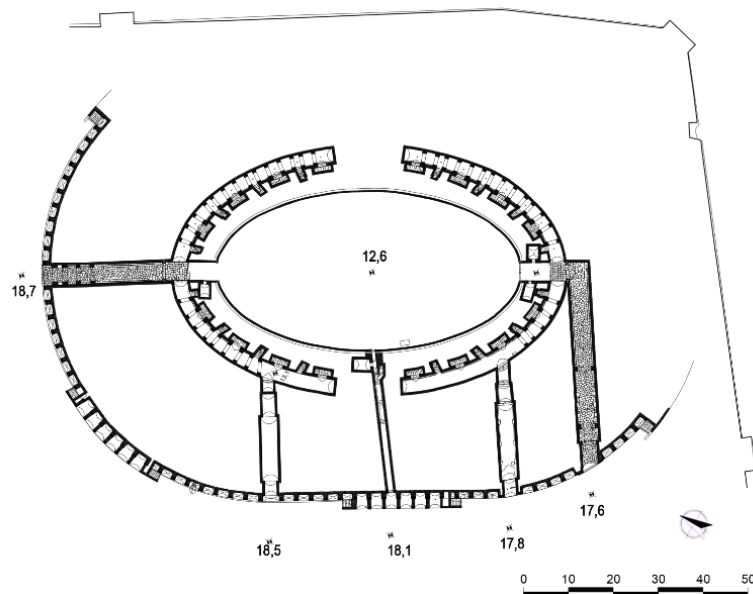


Figura 42: Plan Arena nivel, Anfiteatro de Pompeya.

5.3 ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS DATOS

El medio utilizado fue el hexacoptero en parte ensamblado por el equipo del Laboratorio Modelo del DICIV - Universidad de Salerno, ya utilizado para el levantamiento de la “Via di Nocera” (Pompeya), equipado con una cámara mirrorless Sony Alpha 6000 con sensor APS CMOS Exmor de 24 megapíxeles (6000 x 4000 pixel, 23,5 x 15,6 mm, píxel size 3,91 μm). La captura de las tomas fotogramétricas ha previsto la generación de un plan de vuelo en DJI Ground Station para la adquisición imágenes nadirales (para un total de 197), y además una captura en modalidad de pilotaje manual para la adquisición de las tomas fotogramétricas oblicuas internas (para un total de 197), así de poder también devolver las “formas” para la reconstrucción 3D del entero Anfiteatro. Sea la adquisición fotogrametría del plano de vuelo que aquella manual ejecutadas a través de time lapse con intervalo de 2 segundos. Las imágenes han sido

procesadas en Agisoft PhotoScan (versión 1.3.2 build 4164). El workflow ha sido ejecutado: en la fase de Align Photos han sido programados los parámetros: Accuracy = High, Key point limit = 4000, Tie point limit = 4000, el Sparse Cloud conseguido es de 124.965 puntos, RMS error de 0,142 (1,08 pixel). En la realización del Dense Cloud los parámetros utilizados han sido: Quality = High, Depth filtering = Moderadas, restituyendo un Dense Cloud de 43.694.902 puntos. En el Build Mesh los parámetros programados son Surface Type: Arbitrary; Source data: Dense Cloud; Face Count Medium, generando un Mesh con 8.738.926 triángulos y 6.628.271 vértices. Al final, en el Build Texture los parámetros programados son: Mapping Mode: Generic; Blending Mode: Mosaic; Texture size: 8192 x 8192, (activando Enable hole fitting). Del completo proceso fotogramétrico, el GSD medio es igual a 8.5 mm, mientras la altura media de vuelo de las tomas fotogramétrica es igual a 36.7 m. Para georeferenciar la nube de puntos fotogramétricos, se tuvo a disposición una nube de puntos TLS del enterero Anfiteatro romano de Pompeya, comprendido más allá del exterior, también las galerías y subterráneos. La Nube TLS ha sido generada con la participación de la Universidad de Salerno al Gran Proyecto Pompeya “Piano della conoscenza – servizi di diagnosi e monitoraggio dello stato di conservazione di Pompei”, vencedora de los servicios de levantamiento del LOTTO 2 “Regio II e Extra Moenia”.

La nube TLS cuenta con 580 barridos, cerca de 40 días de actividad de campo, con resolución máxima de la nube de 1,6 mm a 10 m. Para la grabación y el georeferenciación de los barridos han sido utilizados tarjetas esféricas de alta reflectividad, clavos topográficos (solo sobre superficies vegetales) y sistemas de minimización de los desplazamientos de las tarjetas (imanes topográficos, tarjetas fijas enclavadas al terreno a través de clavos, etc). La nube de puntos TLS final ha sido georeferenciada de la medición de la estación total de algunos centros de esfera a través de un mini-prisma, que alojado sobre las bases de las esferas, coincide perfectamente con el centro de la esfera, permitiendo ejecutar una grabación veloz y esmerada de las esferas para la georeferenciación. La nube de puntos TLS final cuenta con cerca de 800 millones de puntos. Se ha procedido por lo tanto a la medición de los GCP, necesarios para la orientación absoluta y georeferenciación de la nube fotogramétrica, de la misma nube TLS, yendo a localizar puntos bien visibles sobre la nube (por ejemplo bordes de las gradas), sacando de ello las coordenadas espaciales. Fueron medidos 16 GCP de puntos

naturales y no de tarjetas fotogramétricas, pertenecientes al *ima cavea*, o bien a la primera gradería por encima del plano de la arena, y sucesivamente integrados dentro del proceso fotogramétrico. Las coordenadas y los errores procedentes del algoritmo de bundle adjustment, implementados en Agisoft Photoscan, están representados en la Tab. 9, mientras que la colocación espacial de los GCP está ilustrada en la fig. 45. El error medio calculado sobre los GCP es de unos 9 cm, con errores máximos en correspondencia del punto P9, unos 14 cm. Se subraya que el error medio mayor es provocado por dos tipologías de errores sistemáticos: la primera está sobre la individuación del punto directamente sobre la nube de puntos TLS, procedimiento que también se comporta como un error relativo con densidad de barridos elevados en este caso de estudio, la segunda es el error instrumental del TLS, que aumenta al aumentar la distancia de la estación a la toma. Se verificó por lo tanto que, en la prueba efectuada, sobre todo en la medición de los GCP, el procedimiento de registración manual, o bien a través de puntos de control, no es la mejor solución, teniendo a disposición una entera nube de puntos procedentes de TLS. Al final del proceso de Structure from Motion, extrayendo las informaciones sobre los errores de reproyección sobre el Sparse Cloud, se puede notar que el error máximo de reproyección está alrededor de los 35 mm.

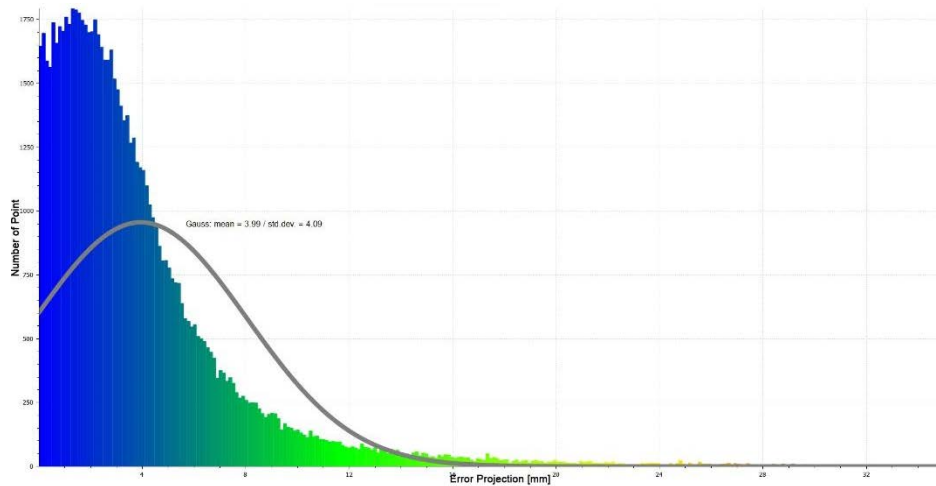


Figura 43: Distribución de los errores de reproyección de la Sparse Cloud.



Figura 44: Plano de vuelo para la adquisición nadiral.

Tabla 9: Residuo de los GCP medidos de la nube TLS.

GCP	X/East	Y/North	Z/Altitud	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error 3D (m)
P1	2477401.658	4511294.530	15.254	0.93	2.68	0.60	2.90
P2	2477378.248	4511306.601	14.862	1.21	4.47	-11.02	11.95
P3	2477379.346	4511310.923	15.789	4.02	0.77	2.96	5.05
P4	2477371.994	4511279.041	14.303	10.38	-0.13	7.39	12.74
P5	2477388.968	4511307.311	14.832	0.86	-1.77	6.13	6.44
P6	2477396.464	4511306.176	16.436	3.49	-11.76	-3.96	12.89
P7	2477403.668	4511297.960	15.212	1.05	4.73	-7.21	8.69
P8	2477417.354	4511297.960	15.212	1.28	4.87	-8.01	9.47
P9	2477417.354	4511272.365	15.221	4.47	3.39	13.13	14.28
P11	2477419.953	4511255.476	15.956	2.18	4.15	-5.94	7.56
P12	2477409.045	4511245.188	14.593	1.73	1.93	-3.61	4.45
P13	2477398.181	4511244.739	15.316	0.93	2.68	0.60	2.90
P13	2477398.181	4511244.739	15.316	0.20	0.65	3.64	3.70
P14	2477394.154	4511241.325	15.564	3.49	7.84	4.19	9.55
P15	2477377.839	4511263.859	14.581	1.61	2.05	3.32	4.22
P16	2477368.442	4511299.643	15.451	0.58	0.27	3.49	3.55
Mean absolute error (m)				7.83	3.72	4.19	9.63

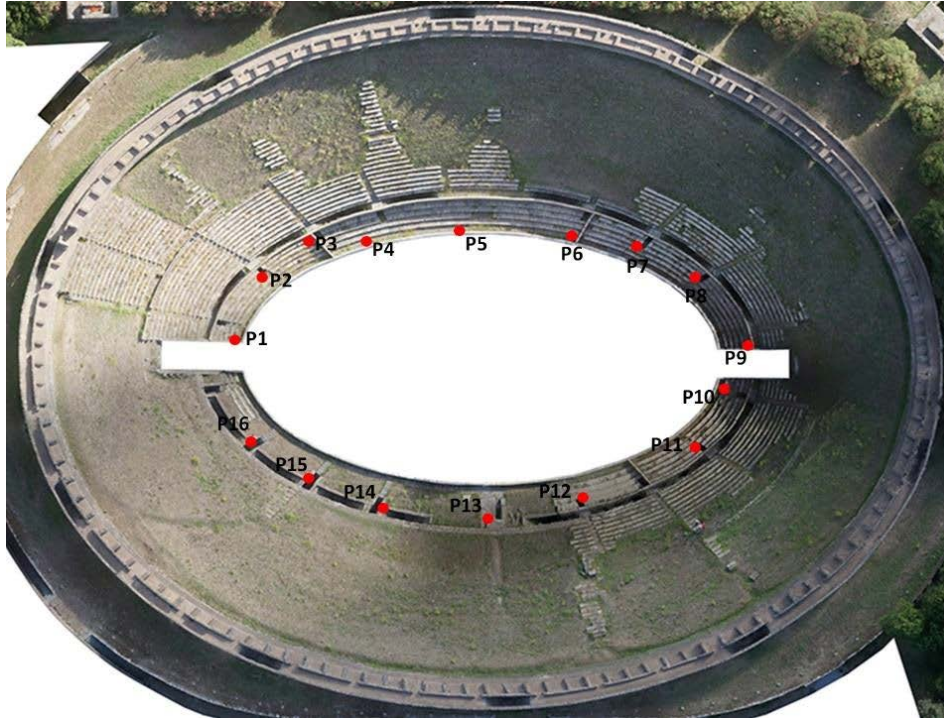


Figura 45: Distribución de los GCP en la *ima cavea*.

Ploteando un histograma en cuyas abscisas encontramos el error de reproyección y en las ordenadas el número de puntos comprendido en aquella clase, y además asumiendo una distribución de Gauss, podemos estimar el valor medio y la desviación estándar del error de reproyección (respectivamente μ_{er} y σ_{er}). Los valores estimados para la modalidad de levantamiento efectuado para el anfiteatro de Pompeya son $\mu_{er} = 3,99$ mm y $\sigma_{er} = 4,09$ mm.

La necesidad en los últimos años de alinear centenares o a veces también millares de barridos, han hecho posible el desarrollo de algoritmos que hacen de la grabación un proceso veloz y automático cuando los input en juego son nubes de puntos; entre estos, el algoritmo de minimización entre nubes de puntos más utilizadas del campo del levantamiento es indudablemente el Iterative Closest Point (ICP). El algoritmo ICP es el procedimiento que permite alinear y unir las individuales adquisiciones en una única nube de puntos según un determinado sistema de referencia, local o global. Ello permite alinear las partes comunes de

barridos adyacentes por la minimización de la distancia entre ellas, a veces también por el auxilio de puntos de control materializado a través de tarjetas artificiales. Debe ser subrayado que la precisión obtenible a través de algoritmos *surface matching* como el ICP, en general, es mejor que la que se puede obtener sólo a través de puntos de control. EL ICP fue presentado por Besl en el 1992. Este algoritmo permite encontrar interactivamente una matriz de rototraslación óptimo entre dos nubes de puntos $p_i \in P$ y $q_j \in Q$, minimizando el error entre las áreas superpuestas. La estructura del algoritmo puede ser subdividida en cuatro fases: la primera es llamada de *Selection*, donde es extraído un subconjunto de puntos para las dos nubes; la siguiente es *Correspondence Estimation*: dónde son calculadas las correspondencias entre las nubes P y Q; la tercera fase es aquella de *Correspondence Rejection*: dónde son descartados los outsiders y por fin la fase de *Transformation Estimation*: dónde son calculados y asignados los parámetros de transformación que minimizan la distancia entre las dos nubes P y Q. Mientras la fase de *Selection* es efectuada una única vez durante el desarrollo del algoritmo, los últimas tres son repetidos interactivamente. Típicamente el resultado converge a una transformación óptima deseada, con un mínimo global. Puede suceder en la optimización del ICP que si las nubes de puntos son parcialmente superpuestas, el algoritmo puede converger a un mínimo local inexacto llevando así a una alineación incorrecta. Por esto son necesarios métodos para descartar las falsas correspondencias de modo de evitar mínimos locales y mejorar la convergencia. Además si la nube ya está alineada de modo crudo, el ICP a menudo resulta un algoritmo eficiente y robusto para refinar la alineación entre nubes de puntos. Para los datos a disposición o bien una nube TLS y una nube aerofotogramétrica, se pensó maximizar el resultado métrico para la nube fotogramétrica, un ICP utilizando entre las dos, poniendo como barrido fijo la entera nube TLS y flotante la entera nube aerofotogramétrica. Se quiere subrayar que las dos nubes son fuertemente no homogéneas por cantidad y densidad de puntos, por esto la nube TLS ha sido diezmada antes de la exportación, directamente del software propietario (Scene) de un factor 16, conserva 1 punto cada 4 por cada fila y columna de la matriz. Importando las dos nubes en Cloud Compare es posible calcular las diferencias métricas entre las nubes a través del mando "Cloud to Cloud". En una primera instancia, el histograma es calculado entre las dos nubes sin el empleo del ICP, sólo con la alineación de la nube fotogramétrica y de los GCP medidos por la nube TLS. En esta comparación,

asumimos por comodidad una función de tipo gaussiana para aparentar el curso del histograma, yendo así solo a comparar los valores de media de las desviaciones (μ) y desviación estándar (σ). Dado que el levantamiento TLS y el levantamiento aerofotogramétrico han sido efectuados en períodos diferentes, la vegetación presente en la parte superior al *ima cavea*, puede influenciar el histograma de las distancias entre las nubes; por esto la comparación ha sido calculada para el *ima cavea*, único anillo del anfiteatro sometido a pequeñas zonas de vegetación (a diferencia del *summa cavea*, por la mayor parte cubierta por vegetación). En la comparación entre las nubes sin el empleo del ICP, el gaussiana que mejor aproxima el curso del histograma tiene parámetros $\mu=0,0918$ m y $\sigma= 0,069$ m qué con el empleo del algoritmo ICP modifica su media en $\mu = 0,0735$ m manteniendo la dispersión constante ($\sigma=0,069$ m). Sucesivamente la misma comparación ha sido reducida a la esquina Norte-este del *ima cavea*, así de averiguar qué cosa sucede en total ausencia de vegetación.

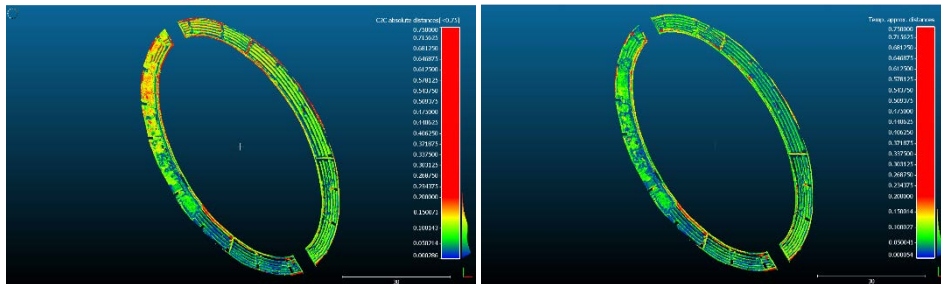


Figura 46: Comparación de nubes de puntos antes y después de ICP solo en la *ima cavea*.

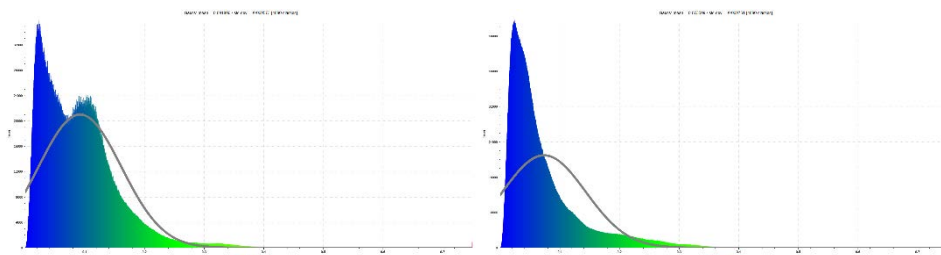


Figura 47: Comparación “cloud to cloud” de la ima cavea antes (sx) y después ICP (dx).

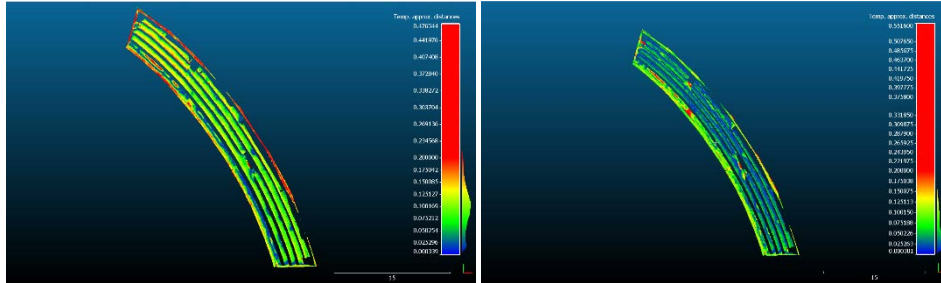


Figura 48: Comparación entre nubes de puntos antes y después ICP solo en una *cuña*.

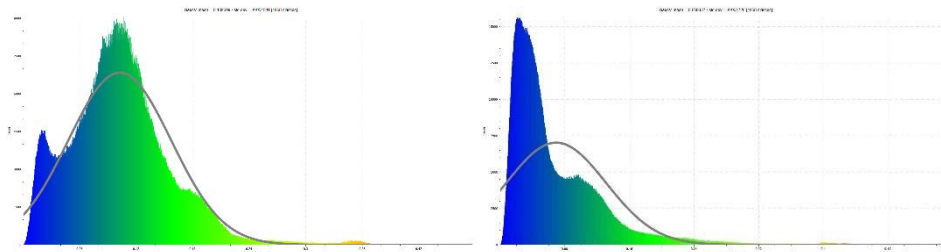


Figura 49: Comparación “cloud to cloud” de la *cuña* antes (sx) y después ICP (dx).

De la comparación de las nubes de puntos de la esquina, el gaussiana que mejor aproxima el curso del histograma tiene parámetros $\mu = 0,1026$ m e $\sigma = 0,054$ m, que con el empleo del algoritmo ICP modifica su media en $\mu = 0,0693$ m e $\sigma = 0,0617$ m. Los parámetros de rototraslación calculados por esta comparación entre las nubes de puntos han sido utilizados para la entera nube de puntos fotogramétricos. Otro parámetro tomado como referencia para la alineación ICP es RMS (Root Mean Square), o bien la raíz cuadrada del cuadrado medio de los errores, conocido también como media cuadrática. Los valores conseguidos en los dos casos del empleo del ICP son: RMS ima cavea = 0,147 m e RMS cuneo = 0,108 m. La aerofotogrametría de medios a pilotaje remoto, permite conseguir resultados métricos y cromáticos, (al menos del exterior del anfiteatro), cercanos a aquéllos conseguidos por TLS, con menos horas de levantamiento en campo y en la fase siguiente de gestión de la nube. Viceversa, para espacios cerrados, o difícilmente alcanzables por VANT, o con condiciones de luz que hacen difícil el empleo de la fotogrametría, el TLS todavía produce resultados difícilmente conseguibles por instrumentaciones image-based. De aquí nace la idea de la integración de los dos sistemas, utilizando al uno donde el otro no logra o lo logra con mayores esfuerzos.

Para la generación del modelo tridimensional total del anfiteatro de Pompeya, visto los datos a disposición, es posible extraer de la nube TLS, las informaciones de las galerías y escaleras interiores, mientras para todo aquello exterior y visible por drones, es posible utilizar el modelo fotogramétrico (fig. 51). La ventaja es que la nube de puntos final tendrá una cantidad de puntos notablemente inferior, al menos por la parte externa, pero el modelo 3D estará en todo caso completo, y de seguro empleado para fines de visualización y documentación. El empleo de nubes procedentes de sensores diferentes también permite la integración, esta vez a la nube fotogramétrica, la parte faltante y no relevada. Para engendrar el entero modelo 3D de aerofotogrametría, habría sido necesario también retomar el exterior del anfiteatro con un vuelo manual. Este no ha sido posible por el poco tiempo concedido para el vuelo fotogramétrico (desde las 7:00 a las 9:00 horas).



Figura 50: Vista de la nube de puntos fotogramétricos.



Figura 51: Integración de los datos TLS (galería) con datos de VANT (externo).



Figura 52: Vista de la nube de puntos producida con aerofotogrametría.



Figura 53: Vista de la nube de puntos producida con laser scanner.



Figura 54: Vista de la unión de la nube de puntos TLS y aerofotogrametría.

5.4 CONSIDERACIONES FINALES

La experimentación realizada sobre el anfiteatro romano de Pompeya ha permitido principalmente poner en comparación diferentes metodologías de levantamientos 3D, basadas sobre el empleo de sistemas fotogramétricos y láser escáneres, y valorando de ello la autenticidad del punto de vista métrico. En particular el análisis ha permitido valorar el nivel cualitativo que puede ser actualmente alcanzado por los sistemas fotogramétricos integrados con técnicas de Structure From Motion, sobrepuestos a una escala arquitectónica para un caso de estudio complejo. La experimentación mostró cómo el uso integrado de técnicas basadas en las técnicas image based y range based pueda llevar a la construcción de un modelo tridimensional completo y multi-escalar, capaz de proveer informaciones de tipo heterogéneo, conformes a diferentes exigencias de análisis. La posibilidad de producir restitution gráficas muy diferentes a partir de un único modelo tridimensional además permite conducir análisis cruzados de datos caracterizados por un nivel de complejidad variable y, de poner en relación fenómenos diferentes que interesan al entero complejo arquitectónico, con evidentes ventajas, por ejemplo, en el caso de investigaciones de tipo diagnóstico y en la planificación de eventuales intervenciones de restauración. El empleo de GCP medido directamente en la nube TLS, comporta una mayor incertidumbre sobre la nube aerofotogramétrica, con respecto del tradicional empleo de las tarjetas (verificada en los muchos casos de estudio alrededor de los 2 cm). El error de reproyección sobre la nube de puntos esparcida tiene valores medios parecidos a aquellos calculados en otros casos de estudios (que seguirán), de una georeferenciación por medios técnicos GNSS en modalidad nRTK. La verificación métrica a través de una comparación entre nubes de puntos o porciones de ellas, es el instrumento que mejor representa las diferencias métricas sobre el entero objeto levantado entre las diferentes técnicas utilizadas; en este caso, vista la compatibilidad de las salidas, el algoritmo ICP puede ser un útil instrumento para minimizar el error métrico entre las dos. Se evidencia que las desviaciones máximas de las nubes están presentes sobre los paramentos verticales, sea sin que con el auxilio del ICP. Los resultados conseguidos demuestran las grandes potencialidades de la metodología de integración entre sistemas ToF (Time of Fly) con la técnica fotogramétrica SFM, confirmando una vez más que la vía vencedora en el levantamiento arquitectónico de los Bienes Culturales, es la integración de las diferentes técnicas.

M. Limongiello - Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas

6 INTEGRACIÓN DE DATOS FOTOGRAMÉTRICOS DE VANT Y TLS PARA LA MAPIFICACIÓN DETALLADA. EL CASO DE ESTUDIO DEL TEMPLO DI NETTUNO (PAESTUM)

6.1 INTRODUCCIÓN

En el campo de los Bienes Culturales, un levantamiento reality-based es hoy día un instrumento necesario para el conocimiento, la documentación y el análisis preliminar de cualquier trabajo de catalogación, restauración y/o conservación. Cuando el grado de detalle requerido es muy elevado, a menudo es necesario la integración de muchas instrumentaciones, que varían de la image - based al range - based. El objetivo de este trabajo es la integración de diferentes técnicas e instrumentaciones de adquisición 3D para obtener un modelo detallado tridimensional del elemento símbolo del Parque arqueológico de Paestum o bien el Templo di Nettuno, del cual extraer elaborados gráficos/métricos (como orto-imágenes) por exigencias arqueológicas, de conservación y políticas de gestión. La protección del patrimonio cultural existente de agentes causantes del deterioro o hasta su pérdida, es un tema cada vez más actual y de vital importancia; los productos 3D realizado podrán ser utilizados para informaciones detalladas y óptimas para la documentación y conservación digital como base para siguientes estudios arqueológicos o arquitectónicos, de análisis estructurales, de reconstrucción virtual, restauración, réplicas físicas, aplicaciones de realidad virtual y aumentada, exhibiciones museísticas multimediales y visitas virtuales (también on-line). En julio del 2017, el despacho técnico del Parque arqueológico de Paestum, a través de la figura del responsable doctora Antonella Novillo, ha solicitado un levantamiento fotogramétrico por medio de SAPR, del entero Templo di Nettuno, con la posibilidad de llegar a un grado de detalle sobre el

basolato del mismo Templo cerca de los 2 cm. Ha nacido por lo tanto la idea de integrar dos técnicas de levantamiento: un levantamiento aerofotogramétrico del entero templo de donde extraer todas las orto-imágenes y el modelo 3D del entero Templo y un levantamiento TLS para el basolato, planeado de modo tal de obtener resoluciones subcentimétricas.

6.2 ENCUADRAMIENTO HISTÓRICO DEL TEMPLO DI NETTUNO

La antigua ciudad de Paestum conserva ruinas de orígenes griegas y romanas, en particular tres templos dóricos muy bien conservados. Paestum es uno de los más importantes sitios arqueológicos en Italia y es incluido en la lista del patrimonio mundial de la Unesco en el 1998. El Templo di Nettuno es considerado como el ejemplo más perfecto de la arquitectura dórico templario en Italia y en Grecia. La dedicación tradicional a Poseidón / Neptuno es de fantasía, y le fue otorgada en referencia al nombre de la ciudad, que constituyó ciertamente el edificio de mayor relevancia; algunos manantiales y datos arqueológicos hacen hipotizar una dedicatoria a Apolo o a Zeus. El edificio, de orden dórico, fechable con buena aproximación alrededor de la mitad del V siglo a. C., es un gran *tempio periptero esastilo*, es decir con la celda circundada de una vuelta de columnas y con un número de seis columnas sobre el frente principales. Mide cerca de 25 x 60 m y surge sobre un alto crepidoma constituido por tres terraplenes, que lo levanta del plano de campo y aumenta la grandeza. La columnata, presenta 6 columnas sobre los lados cortos y 14 sobre aquellos largos; la celda (*naos*) del templo está constituida por un compartimento dividido en tres naves por dos expedientes de 7 columnas sobre dos órdenes (amplio el espacio central, más estrechos los laterales); dos escaleras situadas a los lados de la entrada, de las que quedan pocas huellas, permitieron el acceso a las partes altas del templo, probablemente en función de las operaciones de manutención. La entrada del *naos* está precedida por un pronao en *antis* (constituido es decir de la prolongación de los muros laterales de la celda y de dos columnas interpuestas, que encierran un espacio que sirve de vestuario a la celda misma); una estructura análoga (*opistodomo*) está colocada, simétricamente, sobre el lado opuesto del *naos* (Oeste) accesible sólo desde el ambulatorio interior a la columnata. Excepcionalmente íntegra está, en

cambio, el peristilo externo del templo; las 36 columnas dóricas, altas unos 9 metros, presenta un fuste muy macizo y un adelgazamiento del diámetro del cilindro desde abajo hacia arriba muy marcado: las columnas tienen en efecto un diámetro de unos 2 metros en la base y un metro y medio arriba. El entasis (engrosamiento del cilindro cerca de un tercio de la altura) está menos marcada con respecto de otros edificios dóricos del período. Quedan pocas huellas de los elementos de cobertura y la policromía originaria del edificio, que debió presentarse a los contemporáneos completamente revestidos por una capa pictórica de colores vivaces. Una espesa serie de ulteriores medios ópticos y elaborados cálculos matemáticos para las proporciones hacen de este templo una obra maestra de la arquitectura y una de las máximas expresiones de la cultura y la civilización griega. Delante de la fachada principal (este) surgen los restos de dos grandes altares para los sacrificios, uno simultáneo al templo, el otro fechable en edad tardo-republicana (I siglo A.C).

6.3 ADQUISICIÓN DE LOS DATOS FOTOGRAMÉTRICOS

La actividad de levantamiento fotogramétrico ha sido desarrollada totalmente por drones. Se adoptó, sobre la base de las experiencias ya desarrollada en Pompeya y en Avella, una adquisición fotogramétrica mixta: las imágenes nadirales han sido adquiridas a través de la generación de un plano de vuelo (en entorno DJI Ground Station) mientras para las imágenes oblicuas, necesarias para la reconstrucción 3D del entero Templo, ha sido adoptado la modalidad de pilotaje manual. Para ambas fases, la adquisición ha sido ejecutada en time-lapse automático (intervalo 2 seg).

El medio utilizado es un hexacoptero ensamblado con un gimbal a 3 ejes (el mismo utilizado para el anfiteatro romano de Pompeya) con alojamiento de una cámara Sony Alpha 6500 (dimensión del sensor 23,5 x 15,6 mm, 6000 x 4000 pixel, Pixel Size 3,92 μ m, focal 16 mm). En fig. 55 está representado el plano de vuelo generado en entorno DJI Ground Station¹⁸, mientras en fig. 57 está representada una fase de la adquisición fotogramétrica.

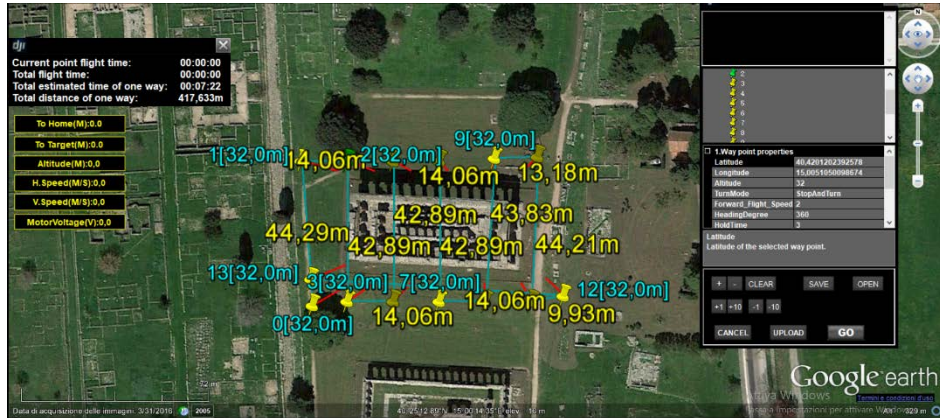


Figura 55: Plano de vuelo para adquisiciones nadirales.

En total, del único plano de vuelo, han sido adquiridas 185 imágenes en nadir. El vuelo manual para las imágenes oblicuas, ha sido planeado ejecutando dos pases por cada lado del templo: uno con cámara a 45° que retomara la parte superior del templo y para la parte restante externa de las columnas, la otra a altura inferior, con eje óptico de la cámara horizontal, y que tuviera cierta superposición con las imágenes adquiridas en el primer pase de las imágenes oblicuas (variable entre el 60 y 80%). Al final, han sido sacadas ulteriores imágenes oblicuas con altura superior a aquella programada por el plano de vuelo, de modo de favorecer el matching en la fase de elaboración. Las imágenes elaboradas para la generación del modelo 3D son 923 (185 en nadir, 723 oblicuo).

6.4 ELABORACIÓN DE DATOS

Las imágenes han sido procesadas en Agisoft PhotoScan (versión 1.3.2 build 4164). El workflow ha sido ejecutado: en la fase de Align Photos han sido programados los parámetros: Accuracy = High, Key point limit = 4000, Tie point limit = 4000, consiguiendo un Sparse Cloud de 139.039 puntos. En la realización del Dense Cloud los parámetros utilizados han sido: Quality = High, Depth filtering = Disable, restituyendo un Dense Cloud de 26.150.877 puntos. En el Build Mesh los parámetros programados son Surface Type: Arbitrary; Source Data: Dense Cloud; Face Count Medium, generado un Mesh con

5.230.012 triángulos y 2.919.918 vértices. Al final, en el Build Texture los parámetros programados son: Mapping Mode: Generic; Blending Mode: Mosaic; Texture size: 4096 x 1 (activando Enable hole fitting). Del completo proceso fotogramétrico, el GSD medio es igual a 7,8 mm, mientras que la altura media de vuelo de las tomas fotogramétricas es igual a 36.2 m. Para georeferenciar y verificar métricamente el modelo, ha sido proyectada una red GNSS constituida por 7 Ground Control Points (GCP) y 4 Check Point para la georeferenciación y la valoración de la precisión del modelo generado. Los puntos de control han sido materializados en tierra a través de tarjetas fotogramétricas, (formato A3) y clavos topográficos. El sistema de referencia adoptada es UTM/ETRF00 con alturas elipsoidales. La precisión alcanzada en planimetría es medianamente subcentimétrica mientras en altimetría se acerca a cerca de 1.0 cm. La distribución espacial de los puntos de control está representada en fig. 59. Es de evidenciar que ninguna tarjeta ha sido puesta sobre el plano del basolato para conseguir un completo reconocimiento de este último. Al final del proceso de Structure from Motion, extrayendo las informaciones sobre los errores de reproyección del Sparse Cloud, se puede notar que el error máximo de reproyección está alrededor de los 35 mm. Poteando un histograma en cuyas abscisas encontramos el error de reproyección y en las ordenadas el número de puntos comprendido en aquella clase, y además asumiendo una distribución de distribución de Gauss, podemos estimar el valor medio y la desviación estándar del error de reproyección (respectivamente μ_{er} y σ_{er}) Los valores estimados en la modalidad de levantamiento efectuada para el Tempio di Nettuno son $\mu_{er} = 3,99$ mm y $\sigma_{er} = 4,00$ mm. De la completa elaboración de las tomas fotogramétricas en Agisoft PhotoScan ha sido engendrado el modelo 3D del entero Templo, del cual han sido extraídas las ortofotos representantes: los 4 cuadros laterales (resolución 1 cm) una vista de lo alto (resolución 1 cm) y un DEM (resolución 3 cm)

Localizando sobre las individuales fotos las tarjetas fotogramétricas, es posible por el algoritmo de Bundle Adjustment, verificar métricamente el modelo fotogramétrico por los puntos de control. El error de retro-proyección medio sobre las tarjetas fotogramétricas es cercano a 0.12 pixel, con un error medio estimado sobre el plano campo de 1.92 cm sobre los GCP y 3.62 cm sobre los Check Point.

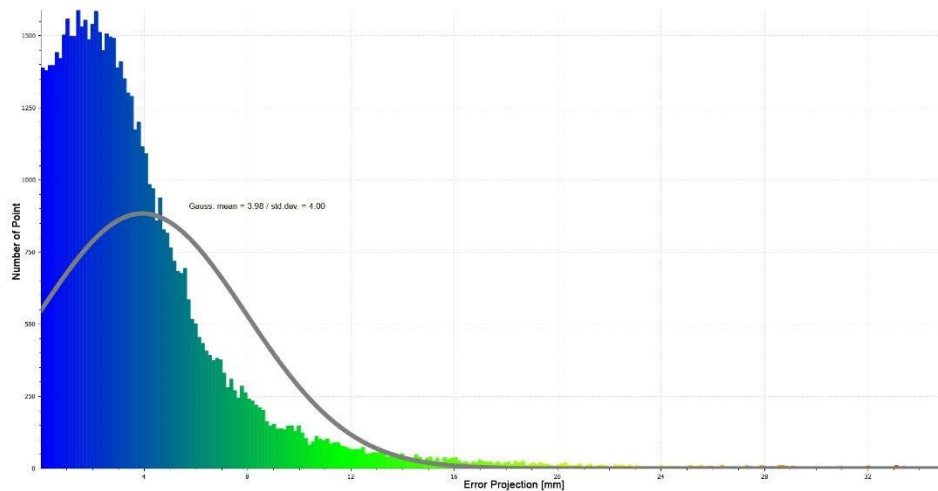


Figura 56: Distribución de los errores de reproyección de la Sparse Cloud.

En Tab. 10 están representados los errores de retro-proyección para cada miembro de cada GCP y Check Point utilizado. A integración del modelo fotogramétrico, en el mismo día de la adquisición fotogramétrica, ha sido ejecutado un levantamiento TLS para el basolato. El proyecto del levantamiento ha previsto el empleo de un láser escáner Faro Focus Cam 3D 330 X, con paso medio entre los barridos de unos 3 m (en totales 24 barridos, con características medias de los barridos de 5 mm y 10 m, resolución $\frac{1}{4}$, calidad 4x). La alineación de los barridos ocurrió en entorno Faro Scene 6.0 a través del reconocimiento de tarjetas esféricas reflectantes; las “tensiones” o bien las tolerancias calculadas por el software para la superposición en barridos diferentes de las tarjetas esféricas homólogas, están en el orden de los 5 -10 mm.

La nube de puntos por TLS cuenta en totales con 701 millones de puntos; seleccionando y eliminando las partes de la nube TLS que no interesan, el basolato cuenta con cerca de 410 millones de puntos. La nube de puntos TLS ha sido integrado al modelo fotogramétrico a través del apoyo topográfico, utilizando las coordenadas de las tarjetas fotogramétricas, visibles en la mayor parte de los barridos.

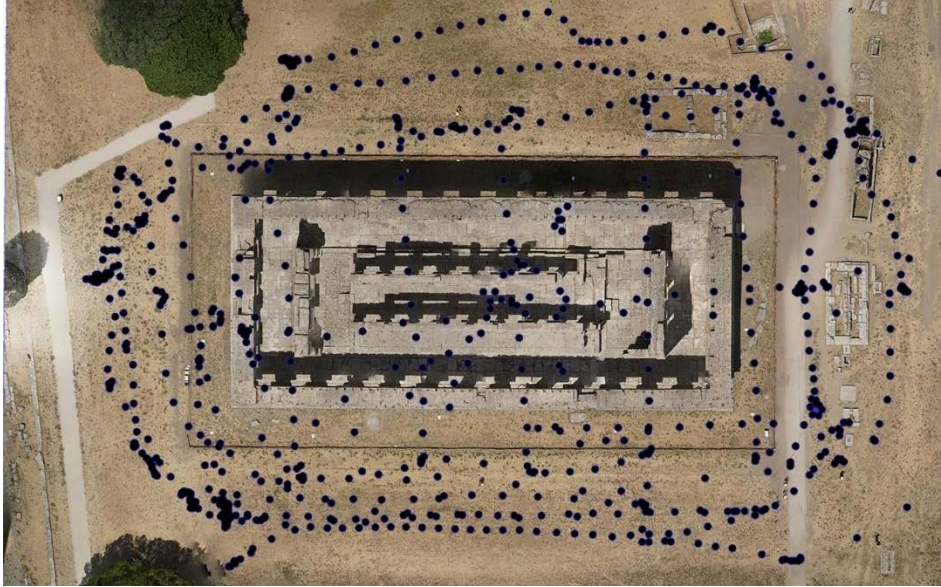


Figura 57: Disposición espacial de las “Cameras Position”.

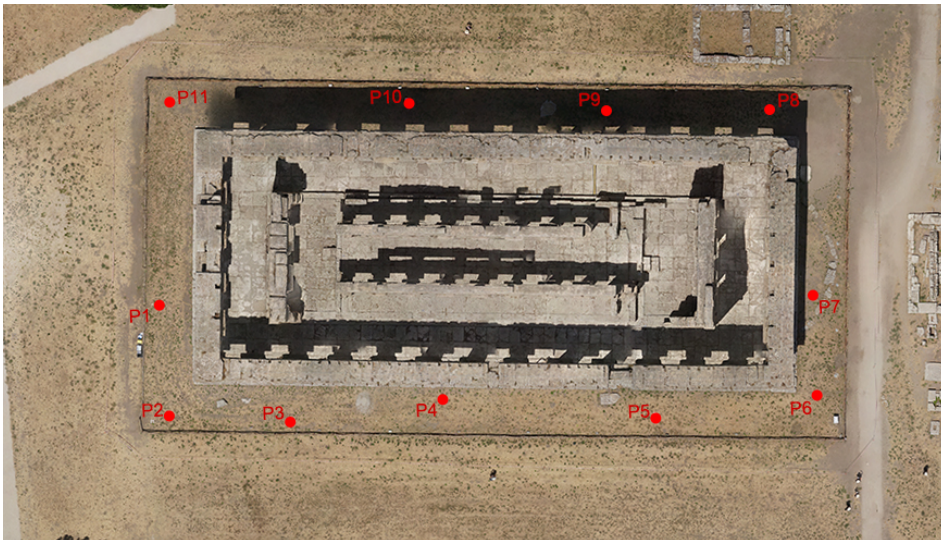


Figura 58: Distribución espacial de los GCP.

Posicionando las dos nubes (aquella TLS relativa al basolato y aquella fotogramétrica para el entero modelo 3D), en el mismo sistema de referencia, se ha conseguido un único modelo de nube de puntos que contempló una doble ventaja: el basolato de la nube TLS, tiene una densidad de puntos por superficie muy superior a aquella del modelo fotogramétrico, así de poder representar a una resolución mayor (subcentimétrica) su estado de deterioro (cosa que interesó principalmente a la Sovrintendenza, próximamente el piso del templo estará sujeto a obras para la construcción de una pasarela de acero), y en el caso de las investigaciones que no necesitan una resolución muy detallada (sobrecentimétrica), el único modelo fotogramétrico representa la justa solución de donde extraer las informaciones necesarias. En fig. 60 están representadas las posiciones de estación para el levantamiento láser escáner (en rojo), y la ortofoto procedente del modelo TLS del basolato. La diferencia de barridos entre el lado Sur y el lado Norte es debido al limitado tiempo que la Dirección ha concedido al cierre del templo para la ejecución del levantamiento (4 horas), además del hecho de que los lados sur y este serán de interés para intervenciones estructurales para la realización de la pasarela de acero.

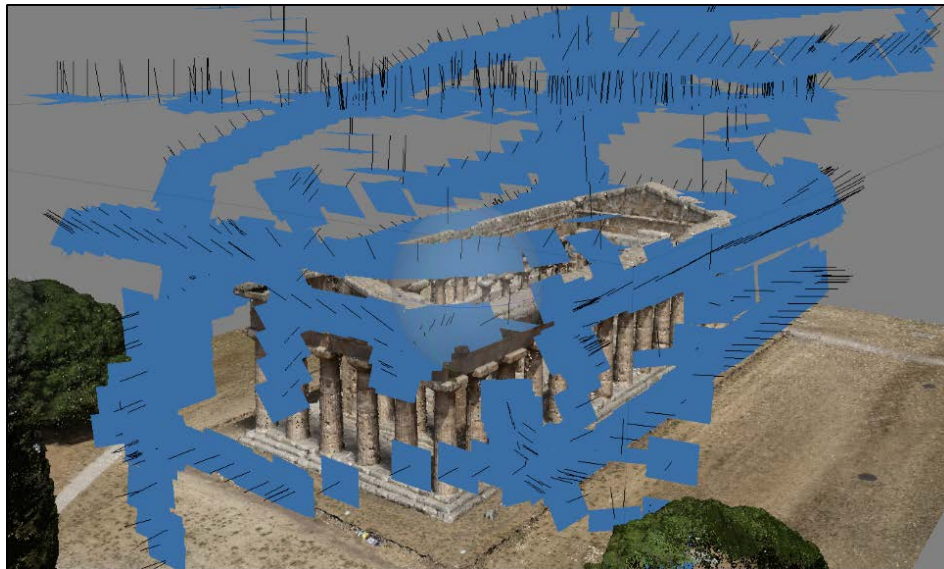


Figura 59: Representación de la modalidad de adquisición.

Tabla 10: Errores de los GCP (P2, P3, P4, P6; P8, P9, P11) y Check Point (P1, P5, P7, P10).

<i>GCP</i>	<i>X/East</i>	<i>Y/North</i>	<i>Z/Altitud</i>	<i>Error X (m)</i>	<i>Error Y (m)</i>	<i>Error Z (m)</i>	<i>Error 3D (m)</i>
P1	500422.911	4474361.313	63.858	0.033	-0.029	0.004	0.04
P2	500423.399	4474350.033	63.795	0.012	-0.001	-0.002	0.01
P3	500435.777	4474349.037	63.871	0.026	-0.006	0.025	0.00
P4	500451.372	4474350.603	64.137	0.026	-0.003	-0.011	0.03
P5	500472.901	4474347.963	64.019	0.029	0.000	0.029	0.04
P6	500489.735	4474349.180	63.957	0.019	-0.004	0.013	0.02
P7	500489.447	4474359.611	63.667	0.053	0.034	-0.001	0.06
P8	500485.886	4474378.682	63.665	0.017	0.016	0.002	0.02
P9	500469.123	4474379.183	63.942	0.014	0.004	-0.013	0.02
P10	500448.870	4474381.061	63.995	0.024	0.024	0.000	0.03
P11	500424.952	4474381.802	63.883	0.016	-0.007	-0.014	0.02
Mean absolute error (m)				0.024	0.012	0.011	0.028

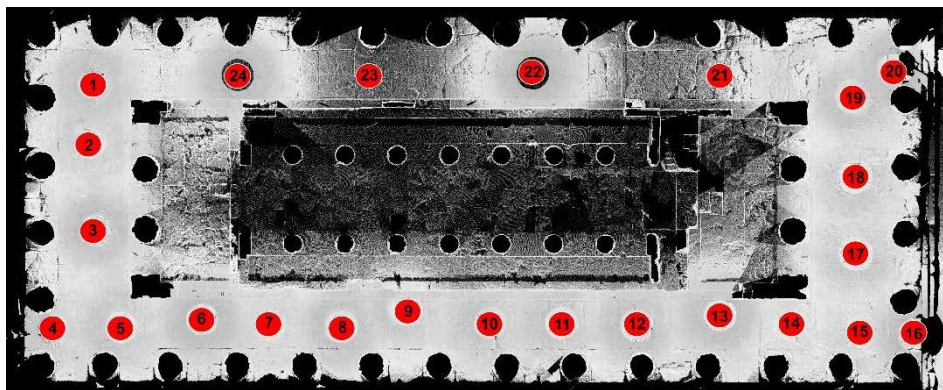


Figura 60: Ubicaciones de las estaciones para el levantamiento TLS.

6.5 PRODUCTOS GRÁFICOS

El procedimiento efectuado ha permitido generar en un único expediente un modelo multi-escala, debido a la integración de un modelo aerofotogramétrico del entero Tempio di Nettuno y un modelo tridimensional procedente de TLS para el basolato. La integración de las nubes de puntos, o en todo caso más en general del modelo 3D, permite la extrapolación de muchas informaciones y/o elaborados, con resoluciones diferentes según el grado de detalle diverso. Por ejemplo del modelo aerofotogramétrico estando completo y por la calidad de la textura, es posible extrapolar las ortofoto de los 4 laterales, con precisión estimada ya en el párrafo 6.3, y con resolución centimétrica. Estos trabajos pueden ser un útil instrumento para un campo de monitorización del Templo, por ejemplo controlando los efectos del deterioro atmosférico. Un ejemplo de ortofoto del templo obtenida del modelo aerofotogramétrico está representado en fig.61. Al final de la campaña de levantamiento, el despacho técnico ha solicitado una estima volumen de relleno de las depresiones presentes sobre el basolato. A tal propósito, para el cálculo del volumen de relleno, necesario para la realización de una pasarela de acero, ha sido utilizado el modelo fotogramétrico. La elección del modelo fotogramétrico para el cálculo del volumen es debida a las siguientes motivaciones: la nube láser escáner, por la cantidad de puntos que posee, tiene una carga computacional elevada, y difícilmente de una nube tan densa es posible generar un modelo poligonal, necesario para el cálculo del volumen. Además en el entorno software dónde se ha elaborado el modelo fotogramétrico (Agisoft Photoscan), existen tool dedicados justo al cálculo del volumen. Generado el plano de fit, a la altura establecida (65,40 m), el software es capaz de calcular el volumen por arriba y por debajo el plan generado Es de precisar que se ha verificado (sea de la nube láser escáner que de las mediciones en el sitio), que el basolato del Templo está en ligera inclinación (cerca de 12 cm sobre los 57 m del lado mayor). El plano de fit engendrado es un plano horizontal, por lo tanto en la consideración del volumen también re-entrará el volumen de nivelación horizontal del basolato. La consideración propuesta por lo tanto, es indudablemente una consideración por exceso del único relleno de las depresiones del basolato. El volumen estimado mediante el procedimiento arriba descrito para el tramo que interesará realizar la instalación de la pasarela de acero es de 2,3 m³. La pasarela que se quiere realizar compone el lado corto del templo

al este el lado largo al oeste y una tarima de apoyo para acceso a la celda (de forma cuadrada). El curso de la pasarela está representado en fig. 62. De la nube TLS M, por la cantidad de puntos que este posee, se ha decidido generar un DEM del basolato en falsos colores, que representará la posición espacial de las depresiones respecto al mismo plano de fit.



Figura 61: Ortofoto del lado Sur (arriba) y Norte (abajo) del Tempio di Nettuno.

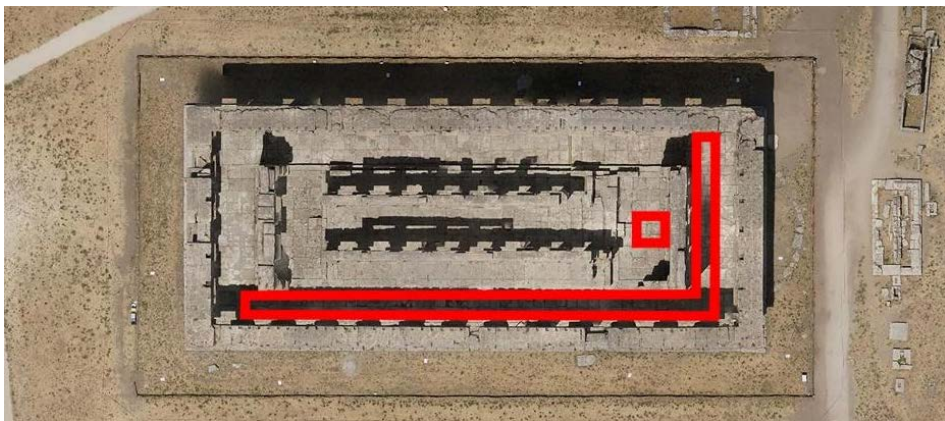


Figura 62: Tramos interceptados a la estima del volumen para la realización de una pasarela.

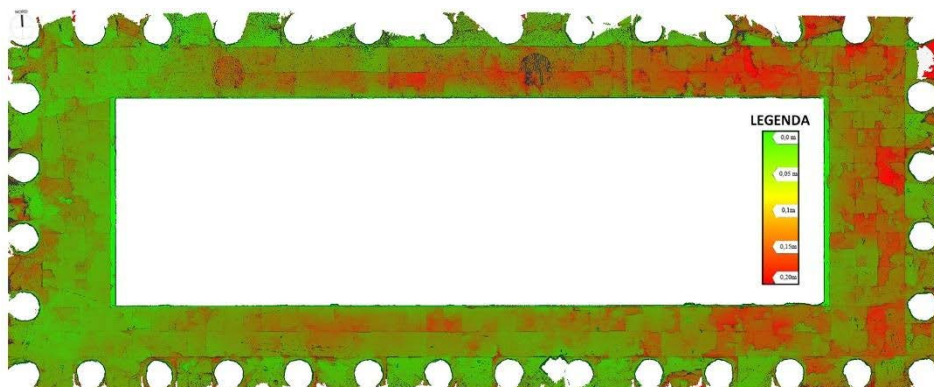


Figura 63: DEM de nube TLS para la representación de las depresiones.

Se recuerda que la nube TLS como aquella fotogramétrica está georeferenciada, por lo tanto cada depresión está en coordenadas topográficas y la cota relativa respecto el plano de fit está representado por los falsos colores. Sobre todo esta tipología de elaborado semeja ser aquella más apta para las varias figuras técnicas que se realizarán en los trabajos. Se quiere subrayar que el mismo DEM pudiera ser realizado por la nube aerofotogramétrica, pero con resolución menor.

6.6 CONCLUSIONES

Para la representación del Templo de Neptuno fue solicitado un modelo multi-escala capaz de proveer elaborados de detalle para el mapeo del estado de deterioro del basolato, y de la otra una documentación a escala arquitectónica foto-realista del entero Templo. El estudio demuestra que la integración de datos procedentes de TLS e imágenes aerofotogramétricas puede coexistir para una representación de detalle. En particular, de la nube TLS se ha podido elaborar un DEM con resolución sub-centimétrica, en la cual cada depresión del basolato está georeferenciada y la misma altura está representada por una representación a falsos colores. El modelo 3D fotogramétrico, en cambio, permite extraer elaborados foto-realistas como los cuatro laterales y la vista desde lo alto. Del análisis sobre el error de reproyección, es posible afirmar que la tipología de levantamiento efectuada, o bien la modalidad de adquisición de las imágenes y el

relativo apoyo topográfico en tierra a través de técnicas GNSS en modalidad nRTK, no permite representaciones a escalas menores del 1:100 (el error máximo de reproyección es de cerca de 3.5 cm).

El modelo multi-escala está conseguido por un traslado rígido de los modelos procedentes de los diferentes sensores en el sistema topográfico de referencia; pues, el apoyo topográfico, a través de GCP utilizado para la fotogrametría y también para la nube láser escáner, tienen que tener un detalle tal de no comprometer las restituciones de los elaborados finales (subcentimétrica). Los errores medios sobre los GCP del modelo fotogramétrico no superan los 2 cm, mientras que las tensiones sobre las tarjetas esféricas utilizadas para alinear los barridos TLS en una única nube de puntos, están en el orden de los 3 mm.

El enfoque utilizado demuestra una vez más, como en el levantamiento y en la conservación en el campo de los Bienes Culturales, el único enfoque hoy posible es un enfoque multi-escala, derivado de sensores image-based y range based.

M. Limongiello - Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas

7 INFLUENCIA DE LOS GCP EN LAS ADQUISICIONES AEROFOTOGRAMÉTRICAS: EL CASO DE ESTUDIO DEL ANFITEATRO DE AVELLA

7.1 INTRODUCCIÓN

El caso de estudio que presentamos tiene el objetivo de confrontar entre ellos diferentes técnicas de georeferenciación para las nubes de puntos producidas por fotogrametría a través de UAV (Unmanned Aerial vehicle). El empleo de UAV para el levantamiento siempre está en constante aumento, por dos principales motivos: los algoritmos de Structure from Motion disponibles cada día pueden generar nubes de puntos significativamente densas (a menudo comparables a nubes de puntos procedentes de sensores Lidar); segundo motivo, no secundario, es la velocidad de adquisición de las tomas fotogramétrica, adquiridas a menudo de planos de vuelo automáticos. Problema que se pone en la fase de georeferenciación es aquel de la medida de los Ground Control Point (GCP), en particular de la disposición, del instrumento y/o de la modalidad de empleo de estos últimos para conseguir la máxima precisión sobre el modelo. La precisión, y por lo tanto la autenticidad del modelo en efecto, puede influenciar mucho la escala de restitución de los elaborados, invalidando la densidad del dato o bien Ground Sample Distance (GSD); un GSD subcentimétrico con una precisión del modelo en el orden de los centímetros, perjudica fuertemente la escala de restitución final. Las adquisiciones de las tomas fotogramétricas se realizaron con dos tipologías de medios: un hexacóptero con cámara mirrorless, con un peso cerca de 2,8 Kg y un medio comercial “ligero” con un peso de 1,3 Kg, un DJI Phantom 3 Professional (sea en modalidad foto que vídeo). El área de prueba ha sido sometida a la adquisición de los GCP en diferentes modalidades, utilizando sea tarjetas fotogramétricas, que puntos naturales bien visibles en las imágenes. La medición de los GCP ha sido realizada a través de instrumentación GNSS, en

modalidad estática que nRTK. Las nubes de puntos producidas han sido comparadas métricamente entre ellas sobre los GCP, con un enfoque estadístico sobre la desviación de las nubes de puntos.

7.2 EL MARCO DEL ANFITEATRO DE AVELLA

El anfiteatro de Avella¹¹ está situado en el rincón sureste de las paredes de la antigua ciudad romana, y se orienta con el eje mayor en dirección Sur-Oeste/Norte-Este alejándose de la antigua instalación ortogonal. El edificio utiliza en parte paredes (ángulo sudeste) y en parte (lado oeste) la orografía natural; justo sobre este lado se mantiene parte del muro de contención del terraplén en *opus reticulatum*, construido como infraestructura de la suma grada, mientras al sur el monumento está sustentado por estructuras en obras cementadas. La instalación del anfiteatro, constituido externamente de dos estructuras semicirculares unidas por muros a ángulo recto, e interiormente, de una estructura en forma ovalada, presenta la arena de 63,6 x 34,3 m; las dimensiones generales documentan un edificio de dimensiones reducidas con respecto del anfiteatro de Pompeya, aunque el cálculo sobre las dimensiones generales pueda ser falseado porque el área más externa de los sectores septentrionales y orientales están en mal estado de conservación.

La estructura muestra una grada con tres órdenes: la *ima cavea*, la *media cavea* y la *summa cavea*. Hoy no quedan todas sino pocos restos de la *summa cavea*, predominantemente sobre el lado Sur y Este.



Figura 64: El anfiteatro romano de Avella.

El anfiteatro está entre los más antiguos presentes en Campaña, muy parecido por composición y dimensión a aquel de Pompeya pero diversamente de los anfiteatros recientes como el Coliseo de Roma o el anfiteatro Flavio de Pozzuoli, no están presentes los túneles y subterráneos.

Tiene dos puertas monumentales con un corredor abovedado en obra de cemento colocado en lados opuestos del eje principal: la Porta Triumphalis (Norte) y la Porta Libitinensis (sur) ambas pavimentadas con losas de piedra. Junto a las dos entradas principales hay dos galerías más pequeñas (vomitoria) que permitieron el acceso público a la cavea.

En el sector meridional, estas galerías no se disponen de manera perfectamente simétrica con respecto de la Porta Triumphalis en cuanto, al Oeste de esta última, hay un sistema doble de arcos, el más cercano a la entrada no constituye una entrada simple a la cavea, pero permite alcanzar un entorno abovedado de forma rectangular. También a lo largo del lado oeste hay una tercera puerta menor en la cual, cerca del podio, se encontró la posición privilegiada del monumento que consiste en un asiento simple y ancho (subsellium), reservado a los jueces o a los personajes de mayor respeto¹⁴. Inmediatamente a espalda del muro del podio se extiende un estrecho pasillo que permitía el desplazamiento del público en el sector del *ima cavea* o bien, durante los espectáculos, del personal de servicio. Pocos restos de gradas de toba son visibles en el extremo noreste de la cavea, cerca de la porta monumentale.

Las otras aberturas en el podio están muy atrás de la construcción del monumento: la documentación arqueológica indica que son establos para los animales que se pueden fechar, sobre la base de las excavaciones llevadas a cabo alrededor del siglo IV d.C. En la actualidad, el anfiteatro ha sido equipado para hospedar acontecimientos culturales y espectáculos musicales, realizando una gradería de acero sobre el lado este, para incrementar el conocimiento y las visitas al edificio romano, también a través de reinterpretaciones históricas y actuaciones musicales.

7.3 CAMPAÑA DE LEVANTAMIENTO

Se apoyó la adquisición fotogramétrica y se combinó con técnicas de posicionamiento GNSS. En esta experimentación, los objetos naturales y artificiales se midieron de tres formas diferentes:

- estático-rápido de una red constituida por 8 tarjetas naturales bien distribuidas y escalonadas altimetricamente;
- nRTK de una red constituida por 18 tarjetas naturales;
- nRTK de una red constituida por 22 tarjetas fotogramétricas artificiales planas apoyadas a tierra.

Los ocho puntos medidos en modo estático son comunes con los puntos medidos en modo nRTK (de A1 a A9). La medición estática-rápido se enmarcó en el sistema UTM/WGS84 conectándose a dos estaciones permanentes (AVEL y ROBS) ubicadas dentro de un radio de 10 km desde el área de prueba y hasta una estación maestra de aproximadamente 5 horas ubicada en las cercanías, de la red de 8 puntos. El proyecto ha previsto la medición utilizando dos receptores, uno para la medición de cada tarjeta con una frecuencia de adquisición de 5 sec y un tiempo de adquisición de 30 minutos sobre cada tarjeta, el otro ha sido utilizado para la estación maestra. La instrumentación utilizada para medir cada objeto consiste en una antena con receptor integrado a GeoMax Zenith 25, para la medición de la estación maestra en su lugar se utilizó una antena Zenith con un receptor Trimble separado. La elaboración de las mediciones GNSS en modo estático se llevó a cabo utilizando el software "Geomax Geo Office". En la fig. 65 se muestra la disposición espacial de los GCP y una fase de medición usando técnicas GNSS in situ.

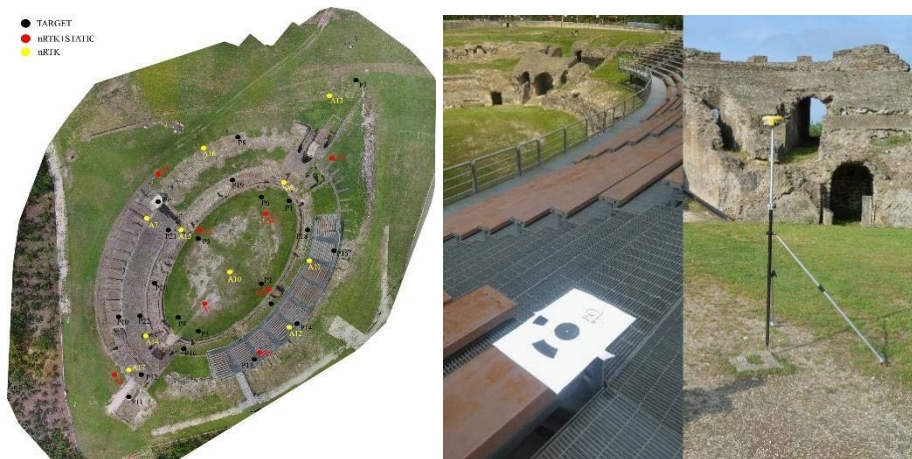


Figura 65: Distribución espacial de los GCP, mediciones y materializaciones.

7.4 ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE DATOS FOTOGAMÉTRICOS CON HEXACOPTERO

Un primer levantamiento aerofotogramétrico ha sido realizado con un hexacóptero con un peso neto del sensor aproximado de 2,3 kg y payload máximo de 1 kg (el medio es el mismo ya descrito para el caso de estudio de Via di Nocera). La cámara utilizada en esta aplicación es un mirrorless, una Sony Nex 7 con sensor APS-C de 24 megapíxeles (6000 x 4000 píxeles, formato 23,5 x 15,6 mm, tamaño del píxel de 4 μm) y una lente fija E-Mount de Sony (16 mm focal, FOV 83°) alojada en un gimbal a tres ejes. Para la adquisición de las tomas fotogramétricas se ha optado por un modo de captura doble: uno primero mediante un plan de vuelo automático para la adquisición de las tomas fotogramétricas nadirales y una segunda en modalidad manual y eje óptico de la cámara inclinada de unos 45°, para retomar los paramentos verticales y eventuales socavaduras presentes. Han sido adquiridas en modalidad time-lapse (intervalo de 2 segundos), 626 imágenes en totales, de las cuales 435 por plan de vuelo automático y cámara en nadir y a continuación 191 imágenes con un vuelo en modalidad manual y eje óptico de la cámara inclinada 45° respecto a la posición horizontal. El vuelo nadir se ha desarrollado de Noroeste a Sureste, con una altura media de vuelo de 32 m sobre el plano de la arena, el que comportó en un “solape” de los fotogramas de 47 x 31,2 m. El vuelo manual con cámara fotográfica inclinada, con una altura media de vuelo igual a 21 m, ha producido una trayectoria “elipsoidal”, no garantizando un solape de los constantes fotogramas, variable entre el 60 y 80%. El objetivo del vuelo interno manual es el de agrupar los paramentos interiores, a menudo no visibles solo desde el vuelo nadiral.

Para comprender mejor la distribución espacial de las tomas fotogramétricas, en fig.70 se muestra un detalle de la Camera positions. La elaboración de los datos se realizó en Agisoft Photoscan, versión 1.3.2 build 4164. Para la realización de las nubes de puntos, han sido programados los siguientes parámetros: en la fase de Align Photos, Accuracy = High, Key point limit = 4000, Tie point limit = 4000, En la realización del Dense Cloud los parámetros utilizados han sido: Quality = High, Depth filtering = Disable, De la completa elaboración de las tomas fotogramétricas ha sido generado el modelo 3D

texturizado del anfiteatro de Avella, utilizado para la realización de las ortofotos. Del completo proceso fotogramétrico, el GSD medio es igual a 9,96 mm, mientras que la altura media de vuelo de las tomas fotogramétricas es igual a 30 m. Insertando los puntos de control, identificados sobre las mismas imágenes y por el mismo operador, a través del algoritmo de Bundle Adjustment, han sido calculados los errores métricos, utilizando las tres configuraciones de GCP descritas anteriormente. Es de evidenciar que, también utilizando los mismos parámetros en la generación de la nube densa y el mismo dataset de foto, solo modificando las coordenadas de los GCP, está claro que la cantidad de puntos generados para la nube densa es mayor al disminuir los GCP utilizados (Tab.11). Viceversa, en los errores de los GCP se observa que, también utilizando como GCP puntos con mediciones a tierra principalmente detallados, como ocurre para una medición estática-rápida, los errores mínimos se observan en aquellas configuraciones con GCP en mayor número, o bien con tarjetas (22), mientras que la configuración de los GCP que presenta errores medios mayores es justo aquella con mediciones estáticas. En primera instancia, eso demuestra en parte que, el factor preponderante sobre la orientación absoluta, no es la precisión de la medición sino el número de puntos utilizados. Los errores para cada GCP en las muchas configuraciones están representados en la Tab. 12.

Al final del proceso de Structure from Motion, extrayendo las informaciones sobre los errores de reproyección del Sparse Cloud para cada una de las tres modalidades de georeferenciación anteriormente expuestas, se puede notar que el error máximo de reproyección es aproximadamente de 25 mm. Sucesivamente, ploteando un histograma en el que sobre las abscisas encontramos el error de reproyección y sobre las ordenadas el número de puntos comprendido en aquella clase, y además utilizando una distribución de Gauss, es posible estimar el valor medio y la desviación estándar del error de reproyección (respectivamente μ_{er} y σ_{er}), debido a aquella modalidad de georeferenciación sobre la nube de puntos.

Los valores estimados para la modalidad de levantamiento efectuada para el anfiteatro de Avella son respectivamente: para la medición en modalidad estático rápido $\mu_{er} = 2,78$ mm y $\sigma_{er} = 2,37$ mm, para la medición en modalidad nRTK sobre puntos naturales $\mu_{er} = 3,74$ mm y $\sigma_{er} = 3,28$ mm, y al final para la medición en modalidad nRTK sobre tarjetas artificiales $\mu_{er} = 2,97$ mm e σ_{er}

= 2,47 mm. Se puede observar luego que el error de reproyección sobre la nube de puntos es mínimo para la modalidad de georeferenciación con menor número de puntos pero con mayor precisión métrica, mientras si comparamos las modalidades nRTK entre ellas, el empleo de tarjetas en el plano fotogramétrico mejora la precisión métrica de la nube de puntos.

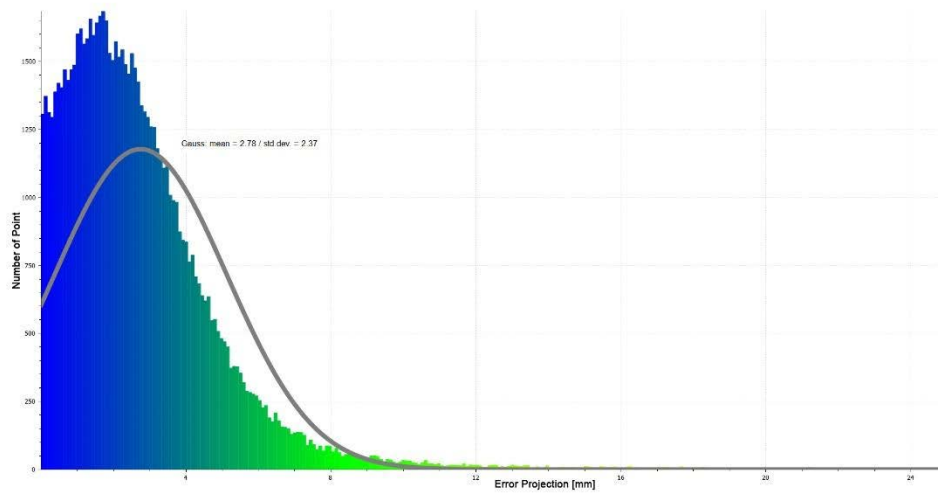


Figura 66: Distribución de los errores de reproyección, modalidad Estático-Rápida.

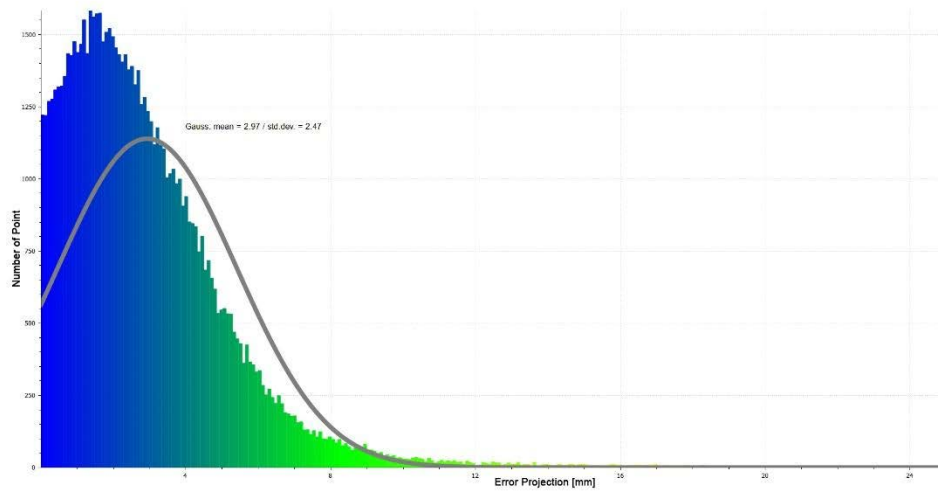


Figura 67 Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre tarjetas.

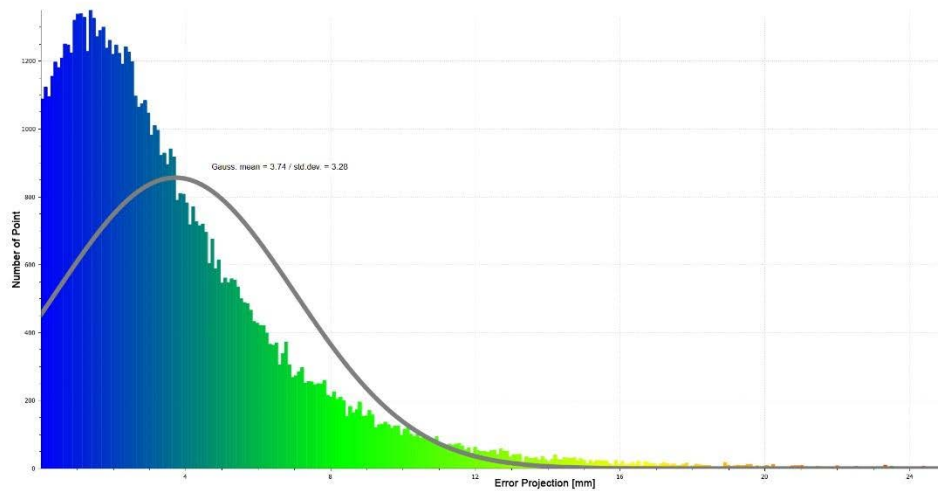


Figura 68: Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre puntos naturales.

Por lo tanto, para el caso específico, el bundle adjustment sobre los GCPs en general tiende a disminuir a medida que aumenta el número de GCPs utilizados, mientras que el error de reproyección es mínimo para la configuración en la que el número de GCP es más bajo, pero más preciso. En fig. 72, se muestra una vista en perspectiva del Dense Cloud generada en Agisoft PhotoScan.



Figura 69: Plano de vuelo para la adquisición en nadiral.

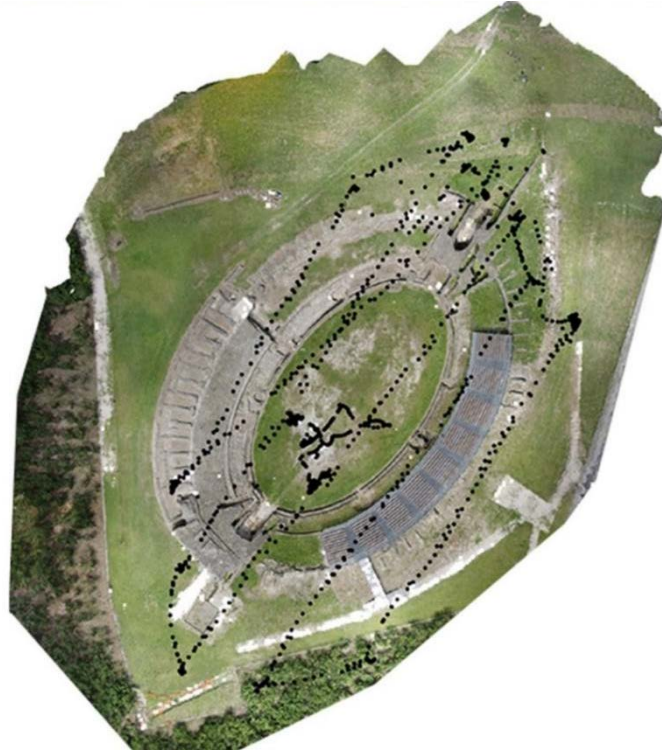


Figura 70: Toma fotogramétrica por el hexacoptero.



Figura 71: Vista en perspectiva de la Dense Cloud.

Tabla 11: Número de puntos de la nube esparcida y densa generada con las diversas configuraciones de GCP.

	Tarjeta (22 p.)	nRTK (18 p.)	Estático (8 p.)
Sparse Cloud (pt)	170.135	170.135	170.135
Dense Cloud (pt)	17.982.366	18.137.750	18.408.636

Al final, el error de reproyección también ha sido calculado por los mismos sistemas de georeferenciación, pero eliminando las imágenes oblicuas. Desarrollando el procedimiento de SFM, se demuestra que por las imágenes nadir, los errores medios de reproyección sobre la nube de puntos aumentan. En particular modalidad estático rápido $\mu_{er} = 3.14$ mm y $\sigma_{er} = 2.38$ mm, para la medición en modalidad nRTK sobre puntos naturales $\mu_{er} = 3.92$ mm y $\sigma_{er} = 3,16$ mm, y al final para la medición en modalidad nRTK sobre tarjetas artificiales $\mu_{er} = 3.33$ mm y $\sigma_{er} = 2.52$ mm.

7.5 ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DE DATOS CON MEDIOS ‘LIGEROS’

Junto al vuelo fotogramétrico con hexacoptero, se ha decidido utilizar un medio no profesional, para valorar las potencialidades de medios comerciales bajo el peso total de 2 kg, visto también la apertura del reglamento ENAC¹⁶ para esta tipología de aeronaves en áreas críticas, áreas donde a menudo hay presencia de bienes arqueológicos.

Con la publicación de las líneas guías LG 2016/003-NAV - Ed. n.1, ENAC definidos los criterios a seguir para conseguir la clasificación de inofensividad para un dron que pesa más que 300 gramos (regidos por otros artículos del reglamento) y menos que 2 kg. Sin entrar demasiado en el mérito, un dron inferior a los 2 kg para ser declarado inofensivo tiene que respetar muchos parámetros: la energía Cinética al impacto (ECI) máxima tiene que ser inferior a los 66 J. Además del ECI, tiene que satisfacer los criterios cualitativos n. 2,3,4,6 de la línea guía, o bien: tienen que ser construidas las partes principales (2) con material a baja densidad y una alta deformabilidad que absorba el golpe del impacto; el

revestimiento (3) tiene que ser capaz de transmitir la deformación del choque al material de abajo sin oponer resistencia; no puede presentar partes expuestas puntiagudas / cortantes (6) hélices, rotores o partes del dron que podrían chocar directamente a una persona tienen que ser redondeadas; las partes rotatorias o bien las hélices, tienen que ser entubadas o constituidas por material blando (ENAC, 2016). Es de subrayar que el medio en cuestión respecto al LG 2016/003-NAV no puede definirse inofensivo, en cuanto no respeta las características de inofensividad indicadas en las líneas guías. La prueba tiene que verificar las potencialidades que un medio con peso dentro del límite máximo de los 2 kg, pueda tener para el propósito final fotogramétrico en el campo arqueológico.

Considerando las características arquitectónicas y las condiciones generales del anfiteatro, más allá de la importancia de un levantamiento de un edificio (ausente por una escala de detalle), se consideró particularmente necesario desarrollar técnicas rápidas de adquisición de datos que pudieran replicarse fácilmente con el tiempo, de manera tal a garantizar una monitorización constante y eficaz del monumento. Pues, también visto la abertura de la normativa para medios ligeros, las investigaciones sobre el anfiteatro han sido realizadas con la ayuda de un SAPR de tipo comercial, en particular un DJI Phantom 3 Professional, (peso de despegue 1,3 kg), con el objetivo final de devolver una ortofoto del anfiteatro. El avión adoptado es un cuadricóptero capaz de tomar fotografías y vídeo en 4K, con 30 fotogramas al segundo, y transmitir la señal a tierra con dispositivos exteriores a través de una App (DJI Go). La cámara está dotada de un sensor Sony CMOS Exmor con 12,4 megapíxeles (dimensiones 6,3 x 4,7 mm, tamaño del píxel 0,155 μm) con una lente gran angular, distancia focal 4 mm y FOV 94°. La cámara está integrada en el gimbal para maximizar la estabilidad de las imágenes durante los movimientos.

Para el estudio del anfiteatro han sido probadas dos diferentes metodologías de adquisición fotogramétrica: una más clásica, con vuelo partidario en modalidad manual y una adquisición codificada a través de vídeo, siguiendo un plan de vuelo que puede ser definido “circular uniforme” con respecto al centro de la arena, con altura y radio constantes y, otro vuelo, con un curso “roto-translacional” o sea un vuelo cenital con una rotación que aumenta con la altitud. Las imágenes capturadas en la primera modalidad están caracterizadas por una resolución de 12 Megapíxeles, mientras que la resolución del vídeo es de 4096 x 2160 píxeles. El vuelo fotogramétrico tiene previsto la captura de 75 imágenes nadir en modalidad

manual con una superposición aproximada del 70%, a una altura constante de 33 m del plano de la arena; de otra manera el primer vuelo “videogramétrico”, de tipo nadiral, se realizó con una altura máxima de 95 m, mientras en el vuelo a 360°, se ha utilizado la modalidad “Point of interest”, programables desde la App, trabajando a un radio de 45 m respecto al centro de la arena y una altura constante de 52 m. En la fig. 75 se muestran los trayectos de los tres diferentes vuelos. La elaboración de los datos fotográficos se realizó en Agisoft PhotoScan, con los mismos parámetros utilizados en la elaboración de las tomas fotogramétricas con el hexacoptero (indicadas en el párrafo anterior). Del completo proceso fotogramétrico, el GSD medio es igual a 11,3 mm, mientras que la altura media de vuelo de las tomas fotogramétricas es igual a 30 m. También en este caso, como en el vuelo con el hexacoptero han sido verificadas las diferencias métricas y computacionales, al variar la configuración de los GCP utilizados. Los errores calculados de los GCP para las fotos procedentes de medios ligeros, son máximos para la configuración de los GCP en nRTK sobre puntos naturales, mientras que resulta mínima para la configuración de los 8 puntos medidos en modo estático. En la georeferenciación con puntos naturales en nRTK, estando el bloque fotogramétrico compuesto solo por foto en nadir, permite la individualidad del punto en muchas menos fotos respecto a la adquisición con cámara mirrorless, y de manera precisa (debida a la menor resolución de la cámara). El bloque fotogramétrico, estando generado por un número decididamente inferior de imágenes respecto a la adquisición con cámara mirrorless, se comporta mejor con pocos puntos medidos con mayor precisión, como ocurre en el caso de la configuración de los GCP en modalidad estática, y de manera similar, cuando el punto es bien identificable a través de las tarjetas fotogramétricas (caso de apoyo topográfico con tarjetas). Extrayendo las informaciones sobre los errores de reproyección del Sparse Cloud, para las tres modalidades de georeferenciación de la nube fotogramétrica procedente de medio ligero, y utilizando la función de Gauss para la consideración de los parámetros de la distribución, se puede notar que el error de reproyección máximo es de unos 35 mm, mientras que el valor medio de la desviación estándar del error de reproyección en las muchas modalidades de georeferenciación son: para la medición en modalidad estático rápido $\mu_{er} = 6,04$ mm e $\sigma_{er} = 4,47$ mm, para la medición en modalidad nRTK sobre puntos naturales $\mu_{er} = 6,09$ mm e $\sigma_{er} = 4,48$ mm, y al final para la medición en modalidad nRTK sobre tarjetas artificiales $\mu_{er} = 6,04$ mm e $\sigma_{er} = 4,50$ mm.

Luego a diferencia del levantamiento con hexacoptero, utilizando un medio con sensor más pequeño y con solo tomas fotogramétricas en nadir, un apoyo con mayor número de puntos en modalidad nRTK o un número menor de GCP pero medidos en modalidad estático-rápido, no comporta cambios sobre la distribución y la consideración del error de retroproyección.

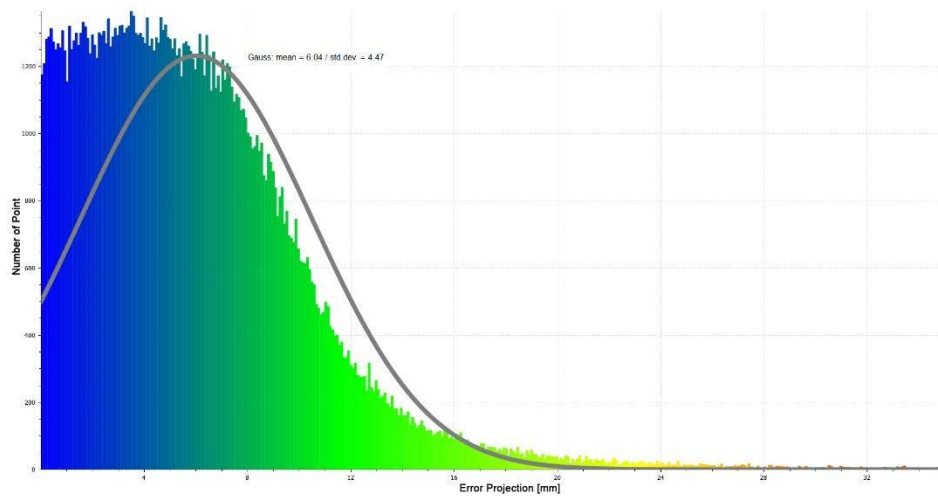


Figura 72: Distribución de los errores de reproyección, modalidad Estático-Rápida.

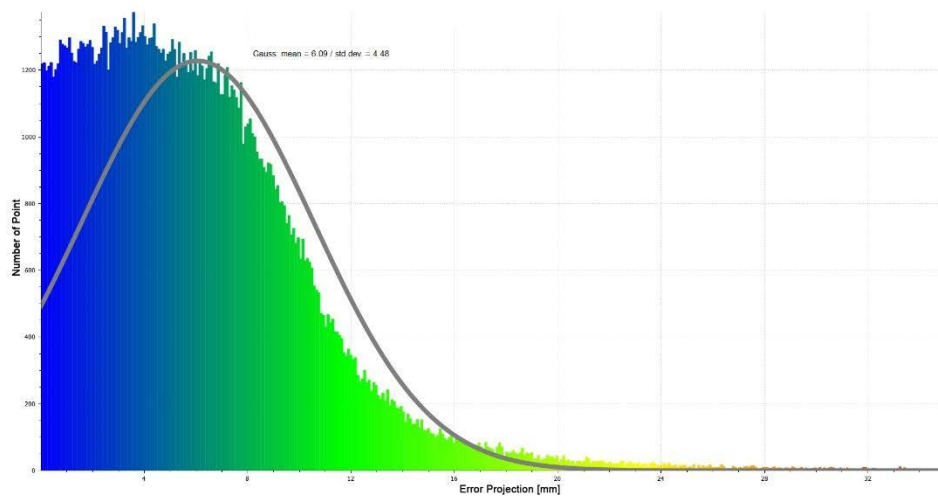


Figura 73: Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre puntos naturales.

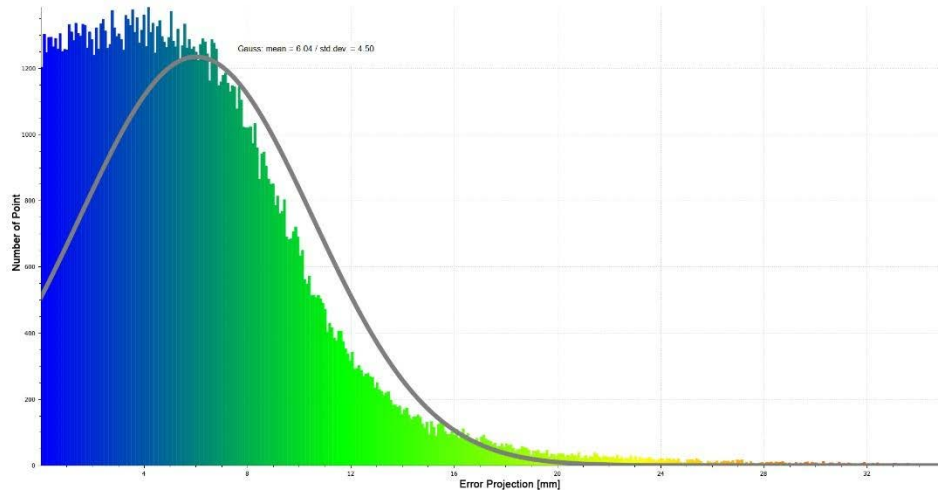


Figura 74: Distribución de los errores de reproyección, modalidad nRTK sobre tarjetas.

Para la elaboración de los datos de vídeo se usó el software Pix4Dmapper en la versión 2.2.25. El diagrama de flujo de Pix4mapper, como ya descrito en el capítulo 2, está basado en tres fases: una fase inicial de elaboración con orientación interior y exterior de la cámara y la creación de una nube esparcida de puntos; en segunda fase, una nube de puntos y un mesh con la creación de una espesa nube de puntos y un modelo de la estructura poligonal; y por último, la creación de un DSM (Digital Surface Model), un ortomosaico y un índice. En esta última fase es posible generar el ortofoto con la resolución solicitada por el usuario. En las últimas versiones del programa es posible insertar en input en cambio de imágenes, también formato de vídeo. Una vez importado el vídeo, el usuario puede programar el intervalo entre los cuadros: mientras más pequeño es tal intervalo, mayor será la superposición entre los fotogramas extraídos. Una vez extraídos los individuales cuadros, el proceso de elaboración de las imágenes es parecida a aquel fotogramétrico; sin embargo, es de señalar que, con el procesamiento de un formado vídeo, todos los parámetros interiores de la cámara resultan desconocidos (total ausencia de los datos EXIF), por esto la fase computacional de la orientación interior se vuelve más costosa con respecto a la clásica fotogrametría aérea. De tal forma, para conseguir un overlap aproximadamente del 80%, las elaboraciones derivadas del vídeo tienen previsto

la extracción de 397 cuadros para el vuelo nadiral y 1117 para el vuelo así llamado a 360°. En todos los proyectos desarrollados, el número de puntos localizados ha aumentado a 15.000 y, al mismo tiempo, el número pares de cada foto se ha aumentado a tres. Con esta configuración, el software se alinea para el procesamiento del vídeo, 224/397, 56%, para el vuelo nadir y 1014/11178, 91%, para el vuelo a 360°. Para la consideración de los errores métricos sobre los GCP, para las elaboraciones de vídeo han sido utilizados 6 GCP pertenecientes al área de la arena y marcados por tarjetas fotogramétricas. El motivo de esta elección es que, vista la reducida resolución del formato de vídeo y la mayor altura de vuelo, la identificación de los puntos naturales y algunas tarjetas no ha sido posible; los únicos puntos que tuvieron un contraste cromático y una resolución en tierra tal que pudieran ser caracterizados han sido los situados sobre el área de la arena. Los puntos GCP han sido utilizados para regular la calibración de la cámara y estimar un valor medio del error RMS (Root Mean Square). En la segunda fase, para la construcción del Dense Cloud, ha sido utilizado un factor de escala para las imágenes de 1/4. La nube densa generada cuenta con un número de puntos 3D respectivamente de: 912.372 para el vuelo nadir y 3.666.206 para el vuelo a 360°. Los errores sobre los GCP están representados en la Tab.13, se puede observar que el procesamiento de vídeo presenta errores mayores respecto a un enfoque aerofotogramétrico a partir de imágenes tomadas por el mismo medio. De acuerdo con estas aplicaciones, en efecto, la desviación media máxima fue aproximadamente de 74 cm, calculada sobre la coordenada Z del vuelo con vídeo nadiral (error que se origina en el mismo modo de captura, siendo casi nula la línea base entre las posiciones sucesivas de la cámara, que de hecho hace dificultosa una correcta triangulación fotogramétrica).

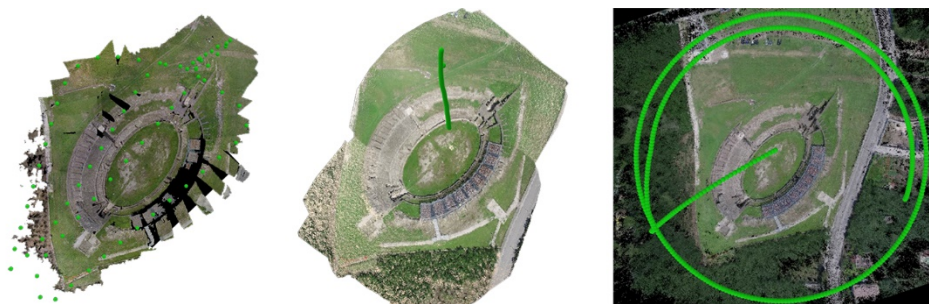


Figura 75: Adquisiciones fotogramétricas y videogramétricas desde un medio 'ligero'.

Tabla 12: Errores de los GCP en la adquisición de los dos medios, en modalidad nRTK en las tarjetas.

GCP	Hexacopter - Oblique Images				Phantom 3 Pro - Nadir Images			
	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)
P1	-0.13	-0.61	-0.76	0.99	-0.14	1.12	0.93	1.47
P2	0.09	0.36	0.56	0.67	0.37	0.28	0.49	0.67
P3	-0.11	0.46	0.34	0.58	0.18	0.10	0.49	0.53
P4	-0.11	0.25	0.77	0.82	-0.01	-0.06	0.10	0.12
P5	-0.34	0.82	-0.29	0.94	-0.32	-0.18	-0.37	0.52
P6	-0.20	-0.01	0.03	0.21	0.33	0.18	0.33	0.50
P7	-0.32	-0.04	0.39	0.51	0.23	-0.26	0.13	0.37
P8	-0.09	0.50	-0.08	0.52	-0.06	-0.31	0.13	0.35
P9	-0.25	0.18	0.24	0.39	-0.09	-0.23	-0.02	0.25
P10	0.01	0.28	0.22	0.36	0.06	-0.20	-0.24	0.32
P11	-0.08	-0.08	0.06	0.13	0.21	-0.34	-0.53	0.66
P12	0.17	-0.01	-0.16	0.24	0.05	-0.17	0.00	0.18
P13	0.28	-0.77	-1.04	1.32	0.12	-0.04	-0.33	0.36
P14	0.59	0.10	-0.29	0.66	-0.22	-0.16	0.10	0.29
P15	0.52	-0.11	0.83	0.98	0.37	0.15	-0.25	0.47
P16	0.16	-0.47	-0.20	0.53	-0.07	0.65	0.14	0.67
P17	-0.17	-0.55	0.23	0.62	-0.45	0.62	2.06	2.19
P18	-0.24	-0.42	-0.32	0.58	-0.75	-0.16	-1.00	1.26
P19	-0.13	-0.08	-0.39	0.42	0.11	-0.28	0.00	0.31
P20	0.05	-0.03	0.18	0.19	-0.41	-0.24	-0.80	0.93
P21	0.16	-0.17	0.00	0.24	-0.04	0.36	-0.89	0.96
P22	0.27	-0.06	0.05	0.28	0.42	-0.70	-0.69	1.07
Mean (cm)	0.20	0.29	0.34	0.55	0.23	0.31	0.46	0.66

Tabla 13: Errores de los GCP en la adquisición de los dos medios, en modalidad estático-rápido.

GCP	Hexacopter - Oblique Images				Phantom 3 Pro - Nadir Images			
	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)
A1	-0.19	0.13	0.15	0.28	-0.33	-0.90	-2.07	2.28
A2	0.54	-0.10	-0.07	0.55	1.17	2.54	2.11	3.51
A3	-1.09	1.94	0.86	2.39	0.75	0.98	-1.08	1.64
A4	-1.59	2.08	1.24	2.90	-0.94	0.24	0.64	1.16
A5	-0.42	0.62	0.94	1.20	6.81	1.01	1.20	6.99
A6	-0.12	-0.21	-0.07	0.25	-1.96	-3.89	-1.45	4.59
A8	-0.07	-0.08	0.14	0.17	-0.89	1.66	3.67	4.13
A9	-0.03	0.01	-0.08	0.08	-4.93	-0.29	-3.19	5.88
Mean (cm)	-0.37	0.55	0.39	0.98	2.22	1.44	1.93	3.77

Tabla 14: Errores de los GCP en la adquisición de los dos medios, en modalidad nRTK en los puntos naturales.

GCP	Hexacopter - Oblique Images				Phantom 3 Pro - Nadir Images			
	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)
A1	-0.11	0.13	-0.01	0.17	-4.05	-1.72	-0.56	4.44
A2	-0.28	0.04	-0.03	0.28	-2.75	-0.32	-1.50	3.15
A3	0.03	-0.28	0.01	0.28	0.90	-7.22	1.32	7.39
A4	-0.25	0.03	0.05	0.25	1.75	-1.92	1.41	2.95
A5	0.52	-0.15	-0.09	0.55	-3.54	-3.85	-3.40	6.24
A6	-0.01	0.01	0.09	0.09	11.49	-3.85	-2.64	12.40
A7	-0.03	-0.06	0.03	0.07	3.15	-6.81	4.90	8.96
A8	-0.02	0.10	0.01	0.10	-2.99	2.12	4.99	6.20
A9	-0.04	0.00	0.05	0.06	-9.55	-1.97	-1.84	9.92
A10	-0.06	0.03	0.00	0.06	22.02	30.86	1.60	37.94
A11	-0.07	-0.27	-0.02	0.28	-2.08	3.65	-0.45	4.23
A12	0.03	0.30	-0.20	0.36	-4.97	1.19	-0.82	5.18
A13	-0.07	-0.06	-0.10	0.14	-2.80	4.56	0.73	5.40
A14	0.07	-0.01	-0.02	0.08	-3.73	-6.66	0.63	7.66
A15	0.02	0.14	0.06	0.16	-1.25	-1.46	-3.28	3.80
A16	0.03	0.03	-0.07	0.09	1.37	-5.13	2.04	5.69
A17	0.15	0.01	0.00	0.15	-3.06	-1.83	-2.39	4.30
Mean (cm)	0.10	0.10	0.05	0.19	4.79	5.01	2.03	7.99

Tabla 15: Errores de los GCP en la adquisición del video.

GCP	Phantom 3 - Video Nadir				Phantom 3 - Video 360°			
	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z(cm)	Error 3D (m)
P1	-2.70	-2.20	10.50	11.06	8.10	1.10	7.30	10.96
P2	3.10	-3.80	18.20	18.85	8.20	19.30	4.20	21.39
P3	-6.80	7.20	22.60	24.67	13.20	15.40	1.20	20.32
P4	1.90	5.10	7.80	9.51	14.10	16.20	3.10	21.70
P5	2.10	1.20	9.10	9.42	22.10	9.20	-2.30	24.05
P6	4.90	19.50	74.70	77.36	5.10	-12.40	-5.20	14.38
Mean (cm)	3.58	6.50	23.82	25.15	11.80	12.27	3.88	18.80

7.6 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS 3D RESTITUIDOS

Una sucesiva verificación métrica ha implicado el análisis de las desviaciones entre las nubes de puntos producidas, sea en las muchas modalidades de georeferenciación de los productos realizados, sea de la elaboración de datos

procedentes de cada medio utilizado. Un primer análisis se centró en los errores producidos por adquisiciones de medios diferentes pero georeferenciados con el mismo esquema espacial de los GCP o bien las tres modalidades ilustradas en el párrafo 7.3). La comparación entre las nubes de puntos ha ocurrido en un entorno CloudCompare, mediante el tool *compute cloud/cloud distance*. En las figuras. 69-70-71 se muestran los ortomosaicos en falsos colores y debajo están representados los histogramas de desviación en las tres comparaciones efectuadas (georeferenciación en nRTK, estático y con tarjeta). Para las comparaciones derivadas de fotogrametría el color rojo ha sido programado por desviaciones calculadas entre las nubes mayores de 20 cm. Se puede notar que de las adquisiciones fotogramétricas las mayores desviaciones, independientemente del tipo de georeferenciación, siempre están colocadas sobre la gradería en metal. De bibliografía son bien conocidos los problemas de la fotogrametría para superficies reflectantes como la gradería en metal en el caso de estudio.

El empleo de mayores GCP sobre las graderías, como ocurrido para georeferenciaciones con puntos naturales en nRTK, no ha llevado a evidentes mejoras sobre el ruido. Además de la gradería metálica, las desviaciones mayores están colocadas sobre los paramentos verticales, mientras sobre los planos horizontales están presentes desviaciones menores (en particular sobre el plano de la arena y de la summa-cavea). La distribución de las desviaciones está atada ciertamente a la modalidad de adquisición nadiral proveniente de medios ligeros, que no facilita el matching en las paredes verticales. En las figuras 77 y 78 se muestran las comparaciones de las nubes producidas por el mismo dataset (hexacoptero o medio ligero), pero georeferenciados con modalidades diferentes. Analizando en paralelo las comparaciones, se puede notar que el curso de la distribución de los errores está influenciado fuertemente por la distribución de los GCP; en efecto en las comparaciones homólogas, se puede observar que en la comparación entre nRTK y estático, en ambas adquisiciones están presentes los errores mínimos en las nubes, para el hexacoptero $\mu=3,9$ cm y para el medio ligero $\mu=5,1$ cm, mientras en la comparación de la nube procedente de la georeferenciación de tarjetas con las restantes, se tienen distribuciones de los errores y valores parecidos entre ellos.

En la Tab. 16 se muestran los valores de μ y σ para todas las comparaciones entre las nubes de puntos producidas.

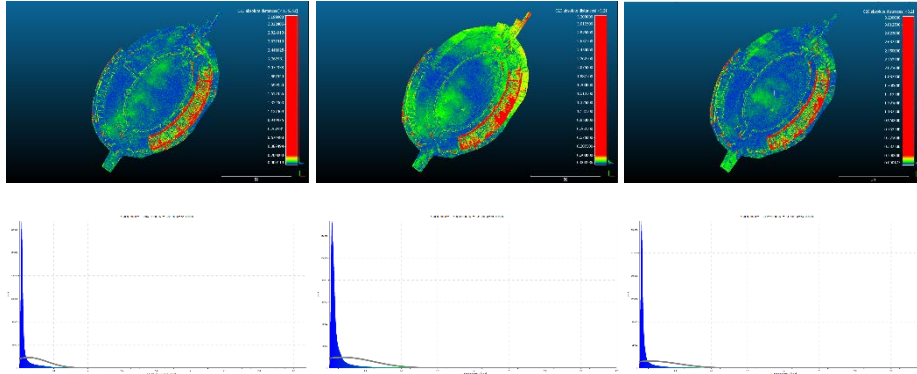


Figura 76: Comparación entre las nubes producidas por el hexacoptero y el medio 'ligero': nRTK (sx) Estático (centro), tarjetas (dx).

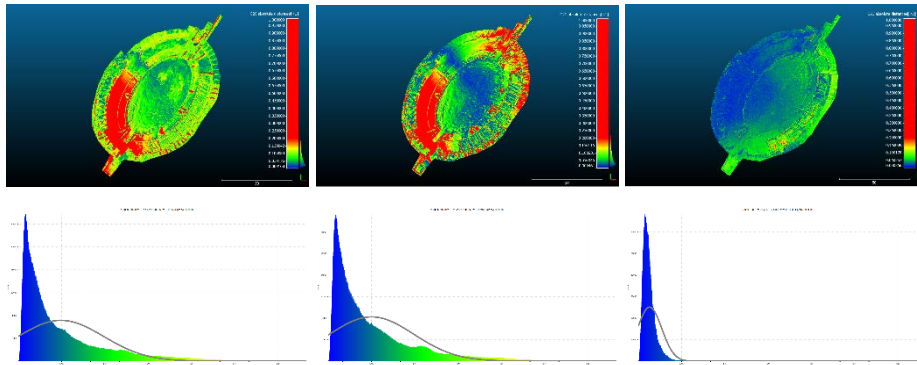


Figura 77: Comparación de las nubes producidas con el hexacoptero: Tarjetas vs Estático, Tarjetas vs nRTK, nRTK vs Estático.

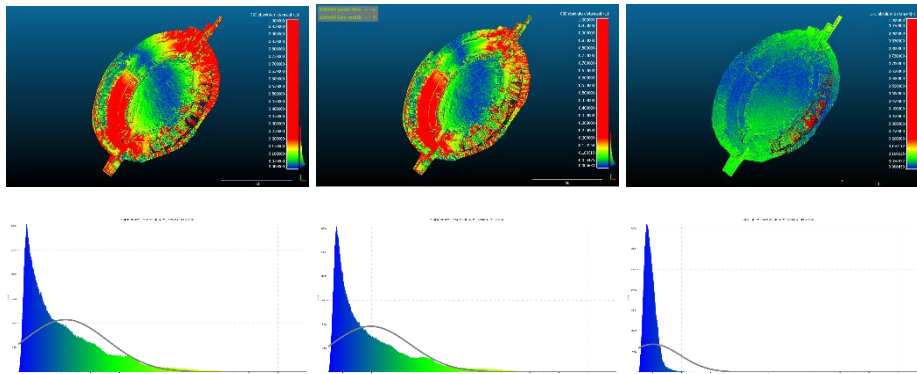


Figura 78: Comparación de las nubes producidas con el Phantom 3 Professional: Tarjetas vs Estático, Tarjetas vs nRTK, nRTK vs Estático.

Al final, las adquisiciones de vídeo han sido confrontadas, para tener un término de comparación sobre su fiabilidad, con la nube fotogramétrica procedente del hexacoptero y georreferenciada con tarjetas fotogramétricas o bien la nube mayormente densa que presenta menores errores medios sobre los GCP. El ortomosaico en falsos colores ha sido generado colocando el color rojo a desviaciones mayores de 1.5 m.

Como se puede observar en la fig. 79, para la adquisición de vídeo nadiral, las desviaciones mayores están colocadas sobre el lado oeste del anfiteatro, mientras sobre la gradería, los errores son mínimos, como sobre la mayor parte de los paramentos verticales. En la comparación con la nube procedente del vídeo en modalidad Point of Interest, en cambio, las desviaciones mayores están colocadas justo sobre los planos horizontales, y resultan mínimas sobre los paramentos verticales. Para la adquisición de vídeo en modo nadir, definida anteriormente, para la modalidad de adquisición, es decir, la variable base solo a lo largo de la altura de vuelo, la triangulación fotogramétrica ocurre con muy alta tolerancia, debido a la dificultad de triangulación entre los fotogramas, generando resultados métricos distantes sobre gran parte del anfiteatro.

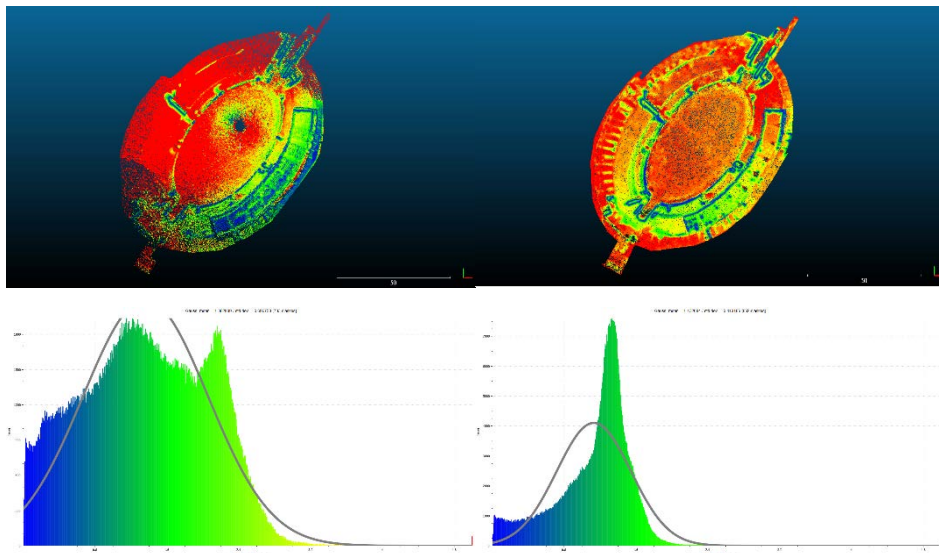


Figura 79: Comparación entre las nubes producidas en modo de vídeo y la nube fotogramétrica con hexacoptero con tarjetas fotogramétricas: vuelo nadir (sx), vuelo 360° (dx).

Para el caso de la adquisición a 360° con cámara inclinada, la nube producida por adquisición de vídeo, utilizando cuadros menos definidos con respecto a las imágenes fotográficas pero con una división corta de los cuadros y, por lo tanto, con un alto solapamiento, compensa la menor resolución respecto a una clásica adquisición fotogramétrica; la cantidad de cuadros y su solapamiento elevado permite tener resultados métricos comparables a aquellos fotogramétricos sobre los paramentos verticales, mientras para la modalidad de adquisición efectuada, sobre los paramentos horizontales los errores resultan ser aún elevados. En la comparación entre la nube fotogramétrica procedente del hexacoptero y aquellas generadas por vídeo, asumiendo la función de Gauss para la consideración de los parámetros de desviaciones métricas se consigue; para la comparación con el vídeo en nadir, $\mu = 1,36 \text{ m}$ $\sigma = 0.69 \text{ m}$, para el video a 360° $\mu = 1,13 \text{ m}$ $\sigma = 0.41 \text{ m}$. en la fig. 80 se muestran las ortofotos conseguidas por el medio ligero. Se muestran las ortofotos conseguidas en las muchas modalidades de elaboración; es obvio observar como el empleo de la clásica técnica fotogramétrica ha llevado a mejores resultados, sea desde un punto de vista métrico, como ya argumentado, sea desde el punto de vista infográfico, relativo a la generación de la textura.

Tabla 16: Matriz sinóptica de las desviaciones entre las nubes de puntos producidas.

			Hexacoptero			Phantom 3 Pro		
			Tarjetas	nRTK	Estático	Tarjetas	nRTK	Estático
Hexacoptero	Tarjeta	μ	1	0.1502	0.1474	0.124	0.152	0.164
		σ	1	0.1466	0.148	0.317	0.155	0.148
	nRTK	μ		1	0.039	0.199	0.1046	0.053
		σ		1	0.042	0.196	0.2201	0.078
	Estático	μ			1	0.144	0.053	0.149
		σ			1	0.147	0.101	0.342
Phantom 3 Pro	Tarjeta	μ				1	0.1473	0.1632
		σ				1	0.1365	0.145
	nRTK	μ					1	0.051
		σ					1	0.093
	Estático	μ						1
		σ						1



Figura 80: Ortofoto restituida con medio 'ligero':fotogrametrico, vídeo en nadir y vídeo 360° (dx).

7.7 CONCLUSIONES

El trabajo tuvo el objetivo de verificar la precisión de un levantamiento fotogramétrico utilizando muchas modalidades de adquisición y distribución espacial de los GCP, sobre un elemento arquitectónico complejo como un Anfiteatro romano. En la configuración de las tomas fotogramétricas del hexacoptero, dónde han sido procesadas imágenes nadir e imágenes oblicuas, la mínima desviación de las coordenadas de los GCP ocurre por la configuración topográfica con mediciones en nRTK (error medio aproximado de 1 cm). Analizando los errores de reproyección sobre la nube esparcida en las tres modalidades de apoyo topográfico, la medición estática produce resultados medianamente mejores respecto a los dos restantes. La estabilidad del bloque fotogramétrico que presenta imágenes nadir e imágenes oblicuas, se comporta mejor métricamente con un número menor de GCP pero medidos con mayor precisión, modalidad estático-rápido. Utilizando modalidad de mediciones nRTK, el error de reproyección medio es menor para mediciones efectuadas sobre tarjetas planas con respecto a puntos naturales y tiende a disminuir al aumentar el número de GCP. La adquisición desde medios ligeros, cuyo objetivo fue el de generar un ortofoto desde lo alto, por lo tanto sólo imágenes nadir, presenta menores errores con el menor número de GCP pero medidos con mayor precisión (modalidad estática). El error de reproyección calculado sobre la nube de puntos en las tres modalidades de georeferenciación, no varía prácticamente al variar la

modalidad de medición topográfica en tierra. Eso permite decir que un bloque fotogramétrico producido solo con imágenes nadirales, presenta comportamientos similares tanto con mediciones repetidas en modo nRTK, que con pocas mediciones en modo estático-rápido. La comparación estadística entre las nubes de puntos ha demostrado en cambio que, con diferentes medios y técnicas de adquisición, el factor relevante en la precisión métrica de la nube es la distribución de los GCP; en efecto el curso y el valor de los errores procedentes del mismo medio de adquisición pero con diferentes georeferenciaciones, han producido resultados parecidos, en la distribución y en los valores, sea por el hexacóptero que por el medio ligero. Analizando en cambio la igualdad de metodología de georeferenciación, en las nubes producidas por sensores diferentes, se notan elevadas diferencias (> 20 cm) sobre la gradería en metal. El empleo de formatos de vídeo de alta resolución ha resultado ser una interesante vía a desarrollar y perseguir, demostrando la ventaja de una mayor velocidad en la fase de adquisición y de un cierto overlap entre los fotogramas, con restituciones métricamente adecuadas para una fase inicial de adquisición de datos. Puede considerarse una técnica innovativa capaz de responder de manera adecuada a las necesidades de poner en campo técnicas rápidas de documentación del monumento objeto de estudio.

Tabla 17: Recapitulación de los parámetros estimados en los muchas configuraciones

	Hexa TARG ET	Hexa NRTK	Hexa STATI C	Phantom TARGET	Phantom NRTK	Phantom STATIC
min_{photo}	2	2	2	2	2	2
max_{photo}	98	98	98	20	20	20
μ_{photo}	5.14	5.14	5.14	2.95	2.95	2.95
σ_{photo}	6.52	6.52	6.52	1.74	1.74	1.74
N_{photo}	627	627	627	75	75	75
μ_{height [m]}	30	30	30	30	30	30
GSD [mm]	9.96	9.96	9.96	11.3	11.3	11.3
E_{max [mm]}	25	25	25	35	35	35
μ_{er [mm]}	2.47	3.28	2.78	4.5	4.48	4.47
σ_{er [mm]}	2.47	3.28	2.37	4.5	4.48	4.47

Se puede observar que los vuelos fotogramétricos siempre presentan errores más bajos con respecto de las elaboraciones de videogrametría, en los que los errores medios de las coordenadas de los individuales puntos se manifiestan con un orden de tamaño mayor. La experimentación de vídeo de un medio por debajo de los 2 kg, con cámara integrada tiene, en cualquier caso, productos producidos para la escala métrica solicitada para la documentación y el estudio de la geometría del anfiteatro, no para un estudio de detalle del mismo producto. Desde el punto de vista de la escala métrica, el caso de estudio demuestra que en las modalidades de adquisición fotogramétrica con imágenes oblicuas y nadirales, la nube procedente de una georeferenciación en modalidad estática permite una máxima escala de representación del anfiteatro a escala 1:50, mientras las modalidades de georeferenciación en nRTK, sean sobre tarjetas o sobre puntos naturales, no alcanzan la precisión métrica para la misma escalas.

8 SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO EN PRESENCIA DE LÍMITES REGLAMENTARIOS

8.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se discutió en el capítulo 1, las operaciones críticas especializadas son operaciones que no cumplen con los requisitos establecidos en el Artículo 12 del Reglamento ENAC. En este caso, una simple declaración no es suficiente, pero es necesario solicitarle a la ENAC una “autorización” específica (art 10 c.2 Reg ENAC); la institución evalúa el nivel de seguridad en el que se llevarán a cabo las operaciones en el caso específico y decidirá si otorga o no la autorización; en cualquier caso, la autorización nunca se otorga cuando las actividades prevén el sobrevuelo de reuniones de personas (desfiles, eventos deportivos, formas de entretenimiento) incluso si el vuelo tiene lugar en espacios cerrados (Artículo 10 c.7 y c.8 Reg. ENAC). Por razones de exhaustividad se recuerda que en el caso de drones que pesan 2 kg o menos, las operaciones especializadas siempre se consideran no críticas siempre que el dron satisfaga el requisito de inofensividad tal como se describe en las directivas ENAC (artículo 12 c. 1 Reg. ENAC).

Cuando el VANT no tiene las características técnicas adecuadas para garantizar el nivel de seguridad necesario para realizar operaciones críticas (falta de redundancia de motores, componentes electrónicos, falta de terminador de vuelo, etc.), es posible optar por operaciones especializadas de acuerdo con el Criterio de escenarios mixtos con la identificación de una zona libre, de tamaño adecuado para permitir la terminación del vuelo dentro de esta zona en caso de mal funcionamiento del sistema. El mismo nivel de seguridad se puede lograr mediante el uso de medios de retención física, generalmente cables que, al fijar la APR al suelo, no permiten el escape de la zona libre (especialmente cuando no hay posibilidad de definir un área de amortiguación). Una restricción, la del cable, limita fuertemente la dinámica del vuelo y hace que el VANT parezca una especie de polo telescópico o un globo aerostático curvado. La no aplicabilidad de la regulación a aeronaves como los globos de frenado ha abierto la experimentación

de nuevos vehículos de transporte de sensores, especialmente cuando la regulación es difícil de aplicar para los VANT, es decir, en áreas críticas y en escenarios mixtos. En la actualidad, los límites impuestos por la regulación no se refieren específicamente al vuelo de papalotes y globos frenados, sino que genéricamente son cualquier obstáculo de tierra que puede perforar la superficie de aproximación de la aeronave durante el aterrizaje o el despegue. Por lo tanto, las cometas y los balones con frenos se consideran cuando no puedan superar una torre o cualquier artefacto que de acuerdo con las reglamentaciones de ENAC excedan los 40 metros sobre el suelo (los rumores dicen que pronto se publicará una circular que traerá este límite a 100 metros).

Existen numerosos ejemplos de estudiosos o operadores simples, que han experimentado con el uso de bolas de frenado, postes telescópicos o cometas en aplicaciones fotogramétricas en escenarios críticos. Las ventajas de estos sistemas son numerosas: por ejemplo, una transmisión de datos extremadamente rápida, una batería potencialmente infinita, la máxima seguridad para sí mismos y para los que no estén en el grupo de trabajo. Además, un elemento que podría parecer secundario, la propia imagen del cable (en el caso de la pelota frenada) combinada con la certeza del propietario, en realidad demuestra un aspecto muy tranquilizador para las personas que están fuera del trabajo.

8.2 ORTOFOTO DE FACHADAS ARQUITECTÓNICAS CON EL SISTEMA “3D EYE”

El sistema fotogramétrico 3DEye (creado y comercializado por la empresa Microgeo) permite el uso de fotogrametría tridimensional en altura, donde las limitaciones ambientales, paisajísticas y regulatorias dificultan las actividades relevantes del VANT. Consiste en una varilla telescópica (altura máxima de 10 m) en fibra de carbono, en la parte superior hay un estabilizador electromecánico, compuesto de motores brushless (gimbal), dentro del cual se aloja una cámara de alta resolución equipada con óptica Zeiss (SONY DSC-QX30, resolución 5184 x 3456 px, distancia focal de 4 a 129 mm), para amortiguar las fuertes oscilaciones, que pueden afectar la calidad gráfica y geométrica de las fotografías tomadas. El sistema está controlado por una tablet en el suelo, con un sistema operativo

Android en el que se instala la aplicación 3Deye Control, desarrollado por la empresa italiana de software 3DFlow. Con la aplicación 3Deye Control es posible definir la secuencia de proyecto del levantamiento y verificar las adquisiciones en tiempo real, estableciendo las dimensiones del objeto topográfico y la distancia que se debe tomar. La aplicación le permite ver la escena de la cámara en el modo *Live View*, y cada toma muestra el nivel de calidad de la imagen y el grado de superposición con la toma anterior. Por ejemplo, al ingresar las dimensiones de la fachada a detectar, la aplicación devuelve la distancia necesaria para obtener la superposición establecida por el usuario (al menos 60%). Además, es posible elegir qué secuencia de disparo y configurarla para optimizar el proceso; Usando este asistente es posible adquirir todas las imágenes necesarias para poder procesar el área de estudio, optimizando lo que será la siguiente fase de post-procesamiento. Si hacemos un paralelo con lo visto anteriormente para las adquisiciones fotogramétricas por drones, el sistema 3Deye es un sistema exento de legislación, que tiene el mismo principio de operación de una VANT; es importante subrayar la enorme diferencia en el tiempo de adquisición (con el mismo tamaño del levantamiento), entre el sistema telescópico y un VANT.

La aplicación 3Deye Control no es más que el equivalente de un software para programar un vuelo fotogramétrico, usando las mismas ecuaciones para calcular las posiciones de los disparos fotogramétricos, para un GSD asignado.



Figura 81: Cámara fotográfica estabilizada a través del gimbal con dos ejes.

La ventaja de utilizar un poste telescópico, en el caso de fachadas arquitectónicas, es sin duda la distancia entre los agarres: cuanto menor es la distancia, menor es el GSD, y por lo tanto, la resolución del modelo 3D.

8.3 PORTAL DE LA IGLESIA DE SANT'ELIGIO

Se ha elegido como el objeto a levantar una parte de la fachada sur de la iglesia de Sant'Eligio Maggiore en Nápoles, en particular el portal de entrada de la iglesia, se caracteriza por una parte del propio edificio con portal de acceso adyacente y una parte de la esquina de los muros perimetrales. La iglesia de Sant'Eligio Maggiore se oculta entre los callejones de la Via Umberto y del puerto, cerca de la Piazza Mercato en el centro histórico de Nápoles, y por consiguiente es una situación crítica en relación con el sobrevuelo de los sistemas VANT. Es la iglesia gótica más antigua de Nápoles, construida en 1270, fue encargada por tres poderosos de la corte de Carlos I de Anjou, que decidió flanquear a un hospital. A la entrada de la iglesia, nos encontramos con un portal abocinado de finales del siglo XIII, el único de su tipo en Nápoles, el trabajo de los trabajadores franceses es un ejemplo típico de la cultura transalpina, destacado por las gargantas profundas que degradan socavados, por zoomorfas y tallados elementos impresos en una fuerte proyección, de acuerdo con las mejores tradiciones de las catedrales góticas de más allá de los Alpes. En el interior, austera y desnuda, con una toba amarilla de mampostería y gris piperno, se caracteriza por una planta con tres naves, en el que se abren capillas laterales y un ábside poligonal. Con los años ha sido objeto de numerosas restauraciones, la última en el siglo pasado, tras el grave daño sufrido durante los bombardeos de 1943, que restauraron la apariencia original de la tradición gótica.

8.4 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El caso de estudio propuesto a continuación, realizado con el software fotogramétrico 3DF Zephyr Aerial 2.25, tiene como objetivo comparar la

reconstrucción fotogramétrica producida para la adquisición de los fotogramas con un poste telescópico y con un levantamiento con escáner láser.

Por lo tanto, queremos validar métricamente el modelo 3D proveniente de la fotogrametría telescópica y, al mismo tiempo, integrar las dos técnicas de levantamiento (image-based y range-based), explotando las ventajas mutuas en la restitución final.

Para el levantamiento fotogramétrico, se tomaron 56 tomas fotográficas a diferentes distancias y alturas para cubrir toda la superficie desde diferentes puntos y ángulos con el fin de obtener una cobertura homogénea del portal según la conformación del mismo.

La adquisición se realizó con la aplicación “3D Eye Control”

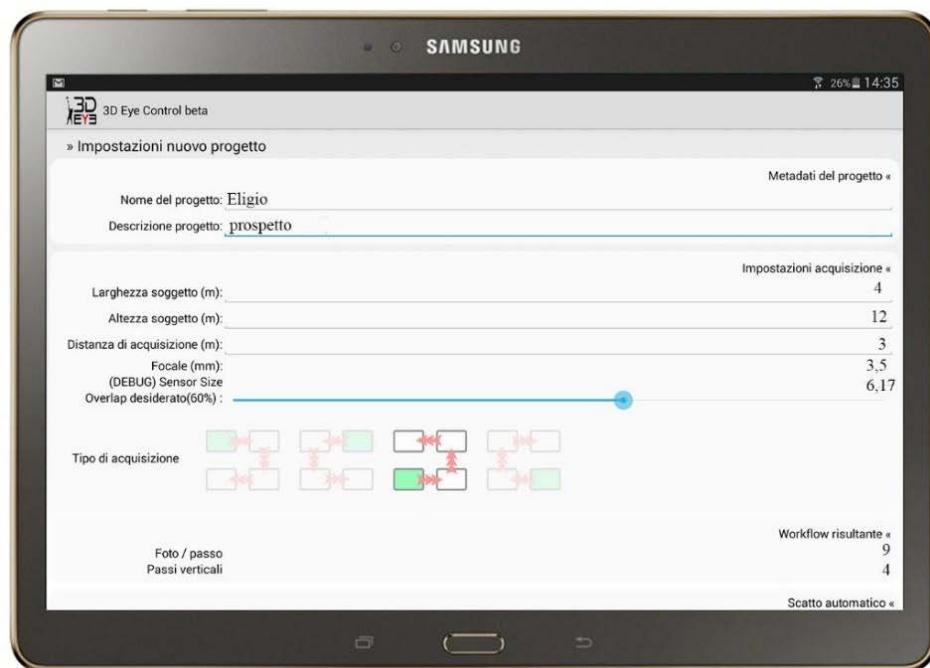


Figura 82: Plan de adquisición del portal de la Iglesia de Sant’Eligio.

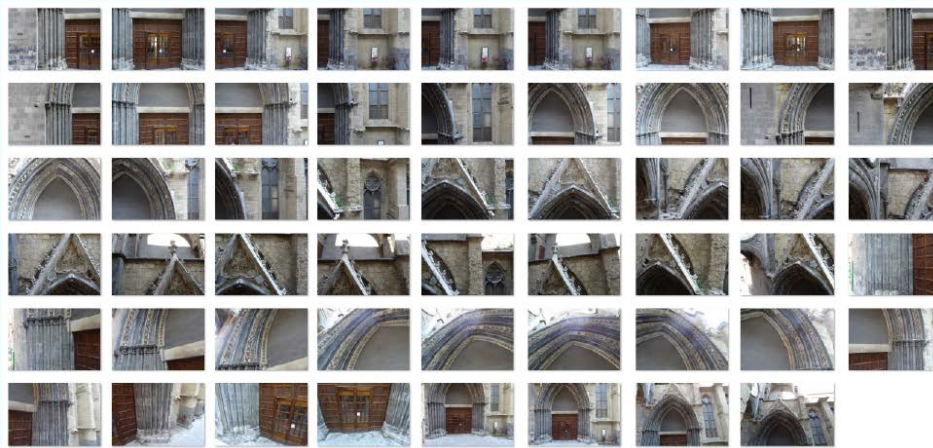


Figura 83: Imágenes tomadas desde un poste telescópico.

El plan de adquisición provisto por 3D Eye Control ha adquirido 45 imágenes, tomando 9 fotos por cada movimiento; además de las imágenes capturadas con la aplicación, se adquirieron otras 9 imágenes en modo manual y fuera de la aplicación, con diferentes distancias y orientaciones, para mejorar el postprocesamiento, la alineación y el matching de los keypoint.

Zephyr permite al usuario utilizar diferentes métodos de configuración de parámetros para la reconstrucción fotogramétrica 3D, que son:

- Categorías y ajustes preestablecidos: representa la forma más rápida de establecer los parámetros de reconstrucción; especialmente adecuado para quienes comienzan a acercarse a la fotogrametría;
- Avanzado: permite definir cada detalle de las fases de reconstrucción;
- Personalizado: le permite cargar un archivo XML en el que el usuario ya ha definido los parámetros ideales para el tipo de reconstrucción con el que debe lidiar (solo para usuarios expertos).

En la descripción de los parámetros utilizados, nos referiremos a las configuraciones que aparecen en la pantalla de los parámetros avanzados. Para conocer el significado de cada parámetro individual, consulte la guía de software adjunta en el apéndice.

Para la generación de la nube dispersa y la reconstrucción de la orientación interna y externa, los parámetros utilizados son: Densidad de punto clave: Alta, Tipo de coincidencia: Exacta, Fase de coincidencia de profundidad: Alta, Tolerancia Error de reproyección: Normal, Motor de reconstrucción: Compensación progresiva y progresiva: local y de contenido, Foto de clasificación: Escasa, restituyendo una nube dispersa de 24.056 puntos (RSM 1.077 píxeles, Varianza de referencia 1.183 píxeles). Para la generación de las nubes densas los parámetros utilizados son los siguientes: Tipo de salida: Optimizado, Número de cámaras cercanas: 3, Resolución: 80%, filtro de reducción de ruido: 10%, niveles jerárquicos de mapas de profundidad: 1, el nivel de discretización: Alto y Modelo de Voto: jerárquico, que genera una nube de puntos densos de 1.497.252. Antes de generar la malla, mediante la nube TLS, adquirida en un levantamiento anterior, se midieron 4 puntos de control para colocar la nube fotogramétrica con la nube TLS en el mismo sistema de referencia y escala. Al colocar en Zephyr coordenadas 3D de los puntos (fueron elegidos 4 puntos bien visibles en la nube TLS y en las fotos, programados sea como vínculo que como control, o como GCP) y el lanzamiento del algoritmo de compensación a la estrella perspectiva (o paquete de ajustes) con un peso del 50%, el error promedio calculado para los puntos de control es de aproximadamente 2.03 cm. Los GCP y TLS y las nubes fotogramétricas producidas se muestran en la figura 84, mientras que en la Tabla 18 se informan los errores para cada GCP. 3DF Zephyr es el único software de fotogrametría que actualmente le permite combinar datos de diferentes soluciones (láser y fotogrametría), por lo tanto, después de terminar la fase de la generación de la nube densa con tomas fotogramétricas y de haber orientado y escalado con los cuatro puntos de control, procedemos dentro de Zephyr Aerial para importar la nube de puntos obtenida con el escáner láser Faro Focus 3D X130; este último se caracteriza por aproximadamente 3,6 millones de puntos sin haber registrado los datos RGB, más del doble de la densa nube fotogramétrica lanzada a máxima densidad. Zephyr le permite importar la nube de puntos de láser dando la posibilidad de determinar cuál será el sistema de referencia en el que basar la alineación entre las nubes, y en este caso ha sido elegido como nube de referencia el TLS. Finalmente se decidió perfeccionar la alineación por medio de la ICP (Iterative Closest Point), que también permite conocer la estimación final de las desviaciones entre las dos nubes.

Tabla 18: Errores de los GCP.

GCP	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error 3D (cm)
P1	-10.291	-26.918	-3.617	1.48	1.04	0.97	2.05
P2	-6.988	25.919	3.649	1.44	0.93	1.46	2.25
P3	10.364	27.122	2.747	1.24	0.94	0.89	1.79
P4	6.838	26.052	2.764	1.19	0.82	1.37	2.00
Mean absolute error (cm)				1.34	0.93	1.17	2.02



Figura 84: Nube TLS (sx), nube fotogramétrica (dx) y puntos de control (en rojo).

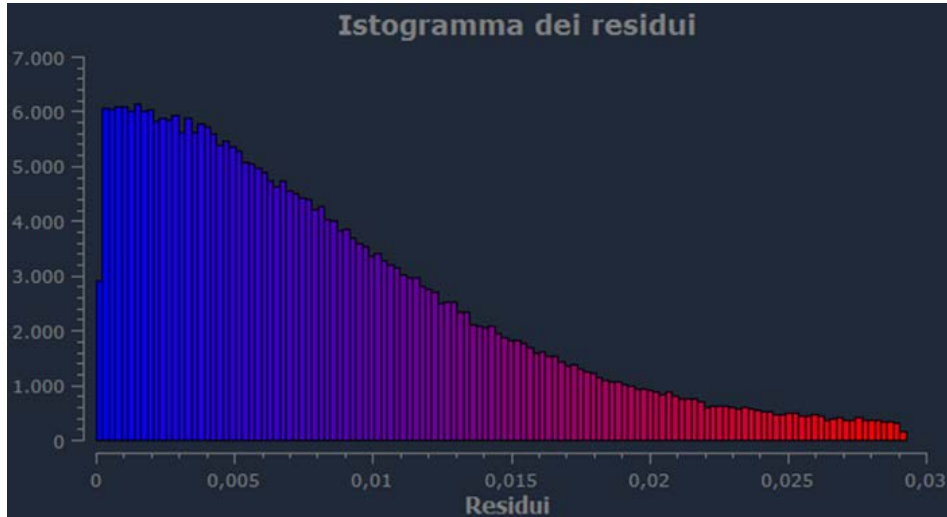


Figura 85: Rendimiento del IPC entre la nube TLS y la nube fotogramétrica desde un poste telescópico.

Mediante el algoritmo ICP, la distancia media (μ) entre las nubes de puntos se estima en 8,5 mm, con una varianza (σ) de 0,16 mm. El histograma de las diferencias calculadas con el ICP se muestra en la Figura 85. Una vez alineadas las nubes de puntos, las cámaras fotogramétricas estarán alineadas con la nube TLS, y por lo tanto es posible extrapolar la información de color de la toma fotogramétrica para verter la información RGB en la nube de escáneres láser. En la siguiente fase de malla, la nube que se transformará en un modelo poligonal será la nube TLS. La generación de la malla prevé como parámetros de la elaboración: número de polígonos: Enorme, nivel de suavizado de 15%, Tipo de Reconstrucción: márgenes suavizados, el número máximo de polígonos: 9.000.000, de optimización basado en la consistencia de fotos: Deshabilitado, generando un modelo poligonal de 1.99.0143. Por último, para la generación de la textura, el modelo de polígono generado, fue texturizado con los siguientes parámetros de entrada: Tamaño Textura 4096, el número máximo de vértices: 9.000.000, Máxima cámara fotográfica por triángulo: 1. En la figura 86 se muestra las ortofotos del portal generado por la nube TLS coloreada con tomas fotogramétricas.

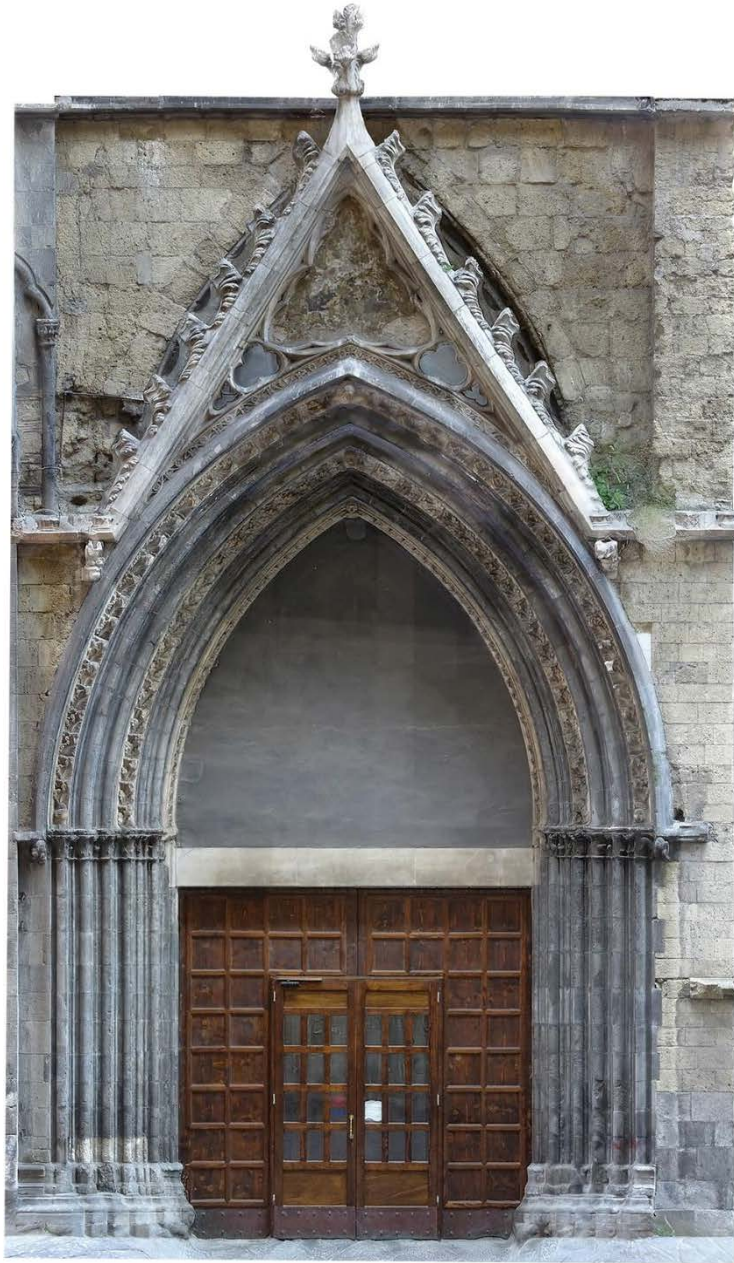


Figura 86: Ortofoto del portal de la Iglesia Sant'Eligio, obtenido mediante la integración de TLS y datos fotogramétricos del sistema "3D Eye".

8.5 LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO DESDE MEDIOS EXENTOS DE NORMATIVAS: EL BEECOPTER

La regulación de la ENAC en el art. 12, punto 5 del Reglamento actual (2ª edición, 3 enmiendas), establece que: “las operaciones especializadas realizadas con un APR de peso menor o igual a 0,3 kg con piezas giratorias protegidas contra impactos accidentales y con una velocidad máxima inferior o igual a 60 km. / h, [...] si consideran no críticos en todos los escenarios operativos El piloto, que no está obligado a mantener un Certificado de acuerdo con el siguiente artículo 21, debe en cualquier caso garantizar que las operaciones se lleven a cabo de conformidad con las normas de tráfico definidas en la Sección V. “En la misma línea permanece la FAA (Federal Aviation Administration), que eximió a los drones de 250 gr del registro obligatorio. La empresa Microgeo, en la primavera de 2015, presentó un innovador medio para la adquisición de imágenes de uso fotogramétrico, el BeeCopter es un medio con un peso neto de 248 g. y por el momento exento de la regulación ENAC¹⁷. Durante una prueba comercial de la compañía, celebrada en Roma, fue posible probar el vehículo en un vuelo fotogramétrico de un plano de vuelo. El vuelo involucró una porción de la carretera cerrada al tráfico, de la cual había un levantamiento TLS, realizado unos meses antes. Desde de la elaboración de las imágenes adquiridas y por medio de los puntos conocidos en el terreno, fue posible verificar las desviaciones métricas del modelo 3D fotogramétrico final; finalmente, la nube de puntos generada se comparó con la producida del levantamiento con escáner láser, para estimar las diferencias entre los dos productos.



Figura 87: Beecopter

8.6 ELABORACIÓN DE DATOS SACADOS CON EL BEECOPTER

El BeeCopter, que es un vehículo certificado de menos de 300 g, puede volar incluso por encima de los centros de población y, por lo tanto, también en escenarios críticos, respetando las reglamentaciones de la ENAC vigentes. Las principales características técnicas de Beecopter son: las dimensiones (160 x 160 x 100) mm, marco completamente en fibra de carbono, rango de vuelo de aproximadamente 10 minutos; transmisión terrestre de telemetría y plan de vuelo por medio de un notebook. En la carcasa de la cámara, integra un sensor de fotos de 1 / 2.3" de 12 megapíxeles con una lente con distancia focal de 35 mm modificada y calibrada; para evitar las fuertes distorsiones debidas a los lentes gran angular (como sucede por ejemplo en un Gopro). El sistema de adquisición se inclina, permitiendo una rotación de 90 ° para poder realizar adquisiciones a 45 °, acimut y nadiral. La electrónica integrada a bordo es un APM de 3DRobotics; con el que puede transmitir toda la telemetría de vuelo al suelo y activar la función RTH (Return to Home), que puede activarse por control de radio o automáticamente cuando se pierde la señal de radio. El Plan de vuelo es administrado por el software Mission Planner (también por 3DRobotics), un software para la programación de vuelos con herramientas fotogramétricas. Al igual que en la estación de tierra DJI, al establecer el tamaño del sensor y la altitud de vuelo, la ruta de adquisición y el cálculo del punto de referencia se crean automáticamente. En la adquisición del plan de vuelo, se tomaron 97 imágenes en nadir, con una altitud promedio de vuelo desde el nivel de la carretera de 29 m (la altitud de vuelo fue elegida para evitar posibles colisiones con edificios adyacentes). El recubrimiento en la sección de la carretera es de al menos 9 imágenes por cada punto, mientras que la resolución del terreno de diseño es de aproximadamente 8 mm. Las imágenes se procesaron en Agisoft PhotoScan (versión 1.3.2 compilación 4164). El flujo de trabajo realizado fue: en la fase Alinear Fotos se establecieron los parámetros: Precisión = Alto, Límite de punto clave = 4000, Límite de punto de enlace = 4000, obteniendo una Nube Esparcida de 26.025 puntos. En la realización de la nube densa, los parámetros utilizados fueron: calidad = alta, filtrado de profundidad = desactivado (para apreciar mejor la posible generación de ruido en la superficie), restituyendo una nube densa de 7.738.009 puntos. En Build Mesh, los parámetros establecidos son Tipo de

superficie: arbitrario; Fuente de datos: nube densa; Face Count Medium, generando una malla con 1.547.599 triángulos y 776,926 vértices. Finalmente, en Build Texture los parámetros configurados son: Modo de mapeo: genérico; Modo de fusión: mosaico; Tamaño de la textura: 4096 (al habilitar Activar el ajuste del agujero). En la reconstrucción de DEM, la resolución de suelo calculada es de aproximadamente 3 cm/píxel, con una densidad de nubes de aproximadamente 10 puntos/cm². A partir del proceso fotogramétrico completo, el GSD promedio es igual a 7.9 mm, mientras que la altura promedio del vuelo de las tomas fotogramétricas es igual a 29 m. El vuelo fue georreferenciado a través de seis puntos de control terrestre (GCP), materializados en el suelo utilizando tarjetas fotogramétricas y clavos topográficos. La posición de las tarjetas se midió con receptores GNSS en el sistema de referencia cartográfica UTM / ETRF00 con dimensiones elipsoidales. El error promedio estimado para los GCP en la superficie de la carretera es de aproximadamente 3,2 cm. En la fig. 88 se muestra la disposición espacial de los GCP, mientras que en la Tab. 19, se muestran los errores calculados de ellos en cada dirección. Si uno observa un detalle de la nube densa (Fig. 83), uno puede darse cuenta de que el modelo restituido se ve afectado por un ruido excesivo que aumenta la incertidumbre de la ubicación espacial exacta de la superficie de la carretera. Lo mismo está mejor representado de la visualización del DEM en la fig. 91. Al final del proceso Structure from Motion, al extraer información sobre los errores de reproyección de nube dispersa, se puede ver que el error máximo de reproyección se aproxima a 200 mm.



Figura 88: Distribución de los GCP en la carretera.

Tabla 19: Cálculo de los Errores mediante GCP.

GCP	X/East	Y/North	Z/Altitud	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error 3D (m)
101	289799.516	4636831.966	58.718	-0.021	0.031	-0.011	0.039
102	289829.267	4636826.516	58.688	0.007	-0.001	-0.015	0.016
103	289867.762	4636819.525	58.699	0.007	0.013	0.024	0.028
104	289871.685	4636807.024	59.155	-0.002	-0.001	-0.007	0.007
105	289840.999	4636813.559	58.775	-0.039	-0.007	-0.028	0.048
106	289811.781	4636819.303	58.733	0.048	-0.034	0.036	0.069
Mean absolute error (m)				0.021	0.015	0.020	0.032



Figura 89: Detalle de la nube densa de puntos.

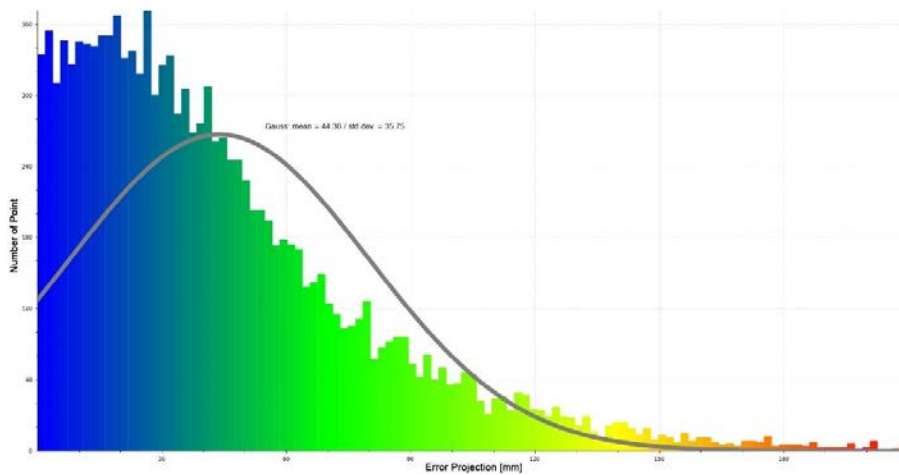


Figura 90: Distribución de los errores de reproyección por punto único de la nube dispersa.

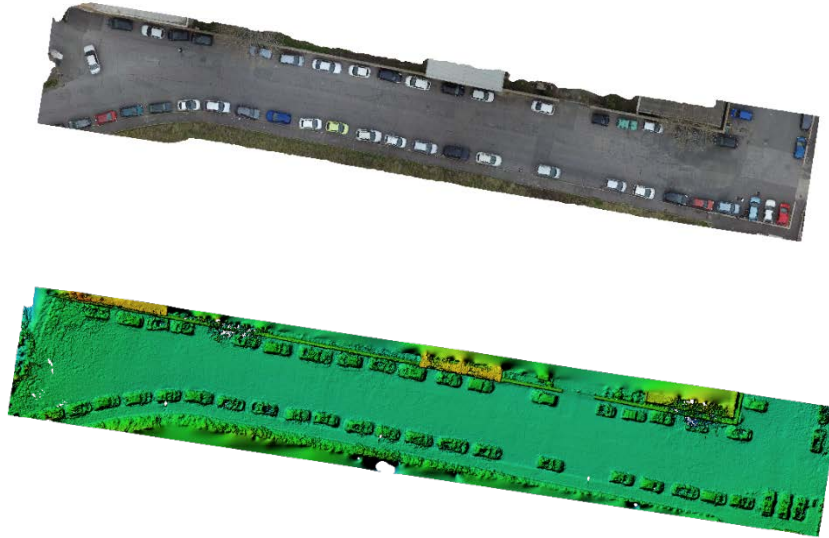


Figura 91: Ortofoto y DEM.

8.7 COMPARACIÓN ENTRE NUBES DE PUNTOS

La medición Lidar se realizó con un TLS Riegl VZ-400 desde tres estaciones fijas en un trípode. Para el registro y la georeferenciación de los escaneos, se utilizaron seis objetivos esféricos de alta reflectancia, montados en una varilla con un nivel esférico y bípodo. La posición de los objetivos es la misma que la de los GCP tomados por el receptor GNSS para el soporte topográfico aerofotogramétrico. Para obtener una estimación de las diferencias métricas entre las dos nubes de puntos, o sea la aerofotogramétrica y la TLS, las dos se importaron al software Cloud Compare (versión 2.9.1). Utilizando la herramienta “Compute Cloud / cloud distance”, se tomó como referencia la nube TLS y, en consecuencia, la nube desde la que se calculan las distancias es la nube fotogramétrica. Queremos subrayar que para hacer el cálculo más confiable y reducir la carga computacional, la comparación se hizo solo en la superficie de la carretera. Desde el recorte de las nubes hasta los puntos importados, la nube TLS tiene 5.617.749 puntos, mientras que la aérea solo 837.656.

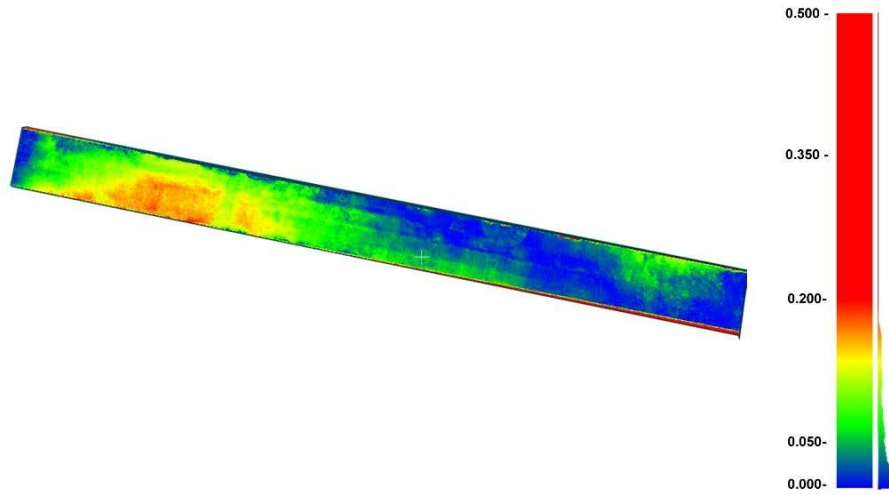


Figura 92: Superposición TLS vs aerofotogrametría.

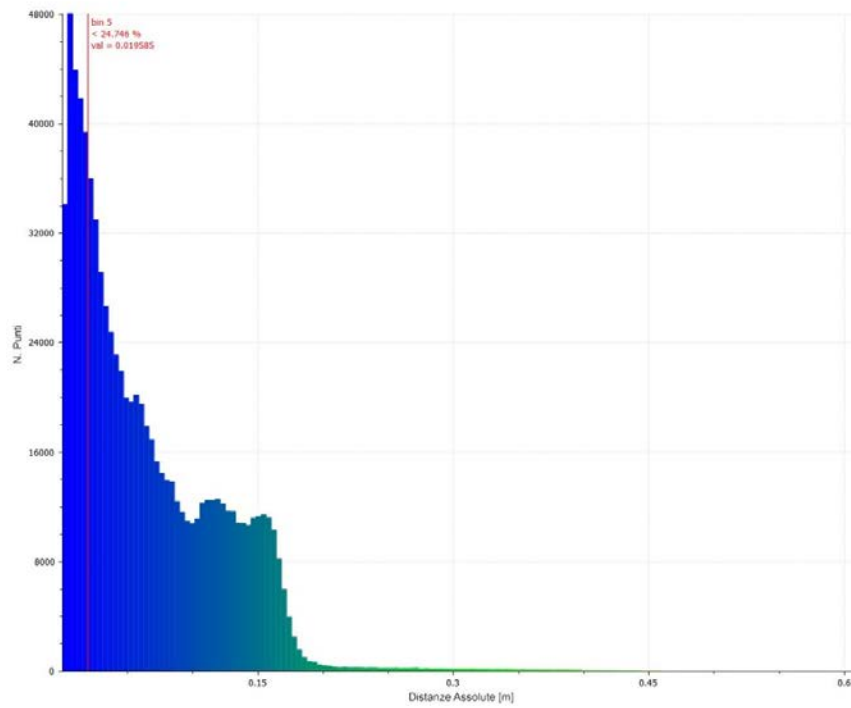


Figura 93: Comparación “nube a nube” entre TLS y nubes de puntos aerofotogramétricas.

A partir de la comparación estadística, es posible afirmar que el 98% de los puntos están dentro de los 20 cm de error, el 91% dentro de los 15 cm y solo el 50% está contenido dentro de los 5 cm de errores.

Si se supone que el valor máximo de error es de 2 cm (diferencia tolerable para una escala de representación, por ejemplo 1:50), el porcentaje de los puntos contenidos en este error se reduce a sólo el 25% (Figura 93). Asumiendo la forma del histograma a una función de distribución Gaussiana, la media de las desviaciones (μ) en las nubes es 0,065 m mientras que la desviación estándar (σ) es 0,056 m.

8.8 CONCLUSIONES

El objetivo principal del primer caso de estudio fue integrar la información geométrica detectada por el escáner láser con las procedentes de un sensor 2D (en este caso, una cámara en un poste telescópico).

El procedimiento ilustrado tiene una doble ventaja: la de usar una nube de puntos de escáner láser, con la densidad, cantidad y precisión mayor para cada único punto de la fotogramétrica, que tiene, sin embargo, como ventaja la información RGB, a menudo pobres en instrumentación range-based. El objetivo del trabajo fue verificar la aplicabilidad del sistema telescópico y los resultados métricos al compararlo con la nube del escáner láser del mismo portal levantado.

Los resultados métricos condujeron a errores mínimos; a partir de la alineación de las nubes con solo los GCP, el error promedio en el portal es de aproximadamente 2 cm, que con un enfoque estadístico y el uso del algoritmo ICP se aproxima a menos del centímetro. Probablemente, los pequeños errores también se deben al GSD alto del modelo fotogramétrico, dada la distancia de la adquisición fotogramétrica. La densidad de la nube de puntos, en la fase de malla, significa que los más pequeños detalles de la decoración del pórtico gótico pueden ser visibles mejor en la visualización en 3D, que se mejoró con la fase de mapeo de textura generada por la adquisición fotogramétrica. El efecto obtenido es notablemente realista y agradable; además, permite investigar con mayor precisión el estado de conservación del objeto.

El estudio de caso demuestra una vez más, y como se ha señalado por más autores, que por las innovaciones tecnológicas disponibles hoy, el mejor enfoque para un levantamiento tridimensional en el campo de la cultura, es la integración de los datos del escáner láser (TLS o Lidar) y fotogramétricos.

De otras maneras, el tratamiento de datos de Aerofotogrametría con un medio para pilotado remoto exentos del marco normativo de la ENAC, es decir, con un peso total de menos de 300 g., han producido resultados métricos con los errores GCP mayores de 3 cm. La comparación con la misma nube de puntos obtenida por medio de un levantamiento con TLS produjo resultados que no eran perfectamente congruentes. A partir del análisis estadístico de las distancias entre las nubes de puntos estadísticos, el error promedio entre (solo en el nivel de la carretera) es de aproximadamente 5 cm, lo que evidencia el ruido excesivo producido en la restitución fotogramétrica. Una posible motivación del ruido presente en la nube de puntos fotogramétricos se puede atribuir a la ausencia de un estabilizador electro-mecánico de la cámara, la textura homogénea de los suelos (que no facilita la búsqueda de los keypoint el sucesivo matching) durante el post-procesamiento y la excesiva altura de vuelo adoptada para la comparación que queríamos ir a conseguir en el plano de la vía (29 m). Incluso la reproyección derivada del procedimiento fotogramétrico ha medido error medios mayores de los 4,4 cm y desviaciones estándares mayores a 3.5 cm, con desviaciones máximas en el orden de los 20 cm.

El objetivo principal del trabajo fue probar una VANT no regulada para fines fotogramétricos; mientras que el procesamiento en datos TLS se utilizó exclusivamente para validar los resultados

Los problemas encontrados en el caso de estudio ciertamente se pueden evitar utilizando VANT con cámaras de mayor rendimiento alojadas en estabilizadores electromecánicos especiales, y por lo tanto medios más pesados que requieren regulación. En conclusión, se puede decir que medios con peso <300 g. presentan límites técnicos desde el punto de vista fotogramétrico que no siempre los hacen adecuados para el levantamiento urbano. A partir de la prueba realizada y el error medio calculado, se puede decir que el uso del llamado “trecentinos” todavía no

está listo para un mapeo detallado, pero requiere desarrollos tecnológicos y compromisos en términos de peso y calidad métrica de la cámara, aún no alcanzados. El uso con fines fotogramétricos de estos medios (hasta la fecha) permite la realización de modelos 3D fotorealistas, adaptados para la extrapolación de trabajos que no excedan la escala de representación gráfica de 1: 200 o incluso mayor.

M. Limongiello - Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas

9 CONCLUSIONES

Durante las actividades comprendidas en el trienio del doctorado, han sido analizados muchos aspectos relativos a la técnica de la fotogrametría aérea por medios con pilotaje remoto en el campo de los Bienes Culturales, localizando las ventajas, los límites y las potencialidades en la adquisición de imágenes por estos medios y la consecutiva elaboración en software de tipo Structure From Motion para la creación de modelos tridimensionales foto-realistas para el levantamiento y la documentación arqueológica. El principal objetivo de la búsqueda ha sido afrontar las problemáticas en la modalidad de adquisición de los datos conseguidos por VANT y de la siguiente elaboración con la finalidad de demostrar el gran potencial de estos sistemas para la fotogrametría aérea de proximidad en el campo arqueológico. Las varias pruebas efectuadas, han permitido definir los procedimientos de los levantamientos fotogramétricos con VANT más productivos en términos de optimización de los tiempos de adquisición y fiabilidad métrica del relieve, fiabilidad a menudo estimada por la comparación de datos redundantes pero procedentes de técnicas range-based, notoriamente más densas y precisas.

El caso Estudio de Villa di Giulia Feliz ha permitido valorar la precisión métrica de un relieve fotogramétrico de action camera, una Gopro Hero 3 Black en un espacio estrecho (máxima distancia de adquisición del objeto 90 cm). El dataset ha sido elaborado en diversos softwares comerciales del tipo Structure From Motion (Agisoft Photoscan, Pix4DMapper y 3DF Zephyr Aerial), utilizando 14 GCP distribuido sobre toda la pared perimetral, para valorar la precisión final del modelo. Las elaboraciones han permitido verificar que Agisoft PhotoScan restituye la desviación media máxima (3.5 cm), mientras Pix4Dmapper aquella mínima (2.18 cm). Confrontando las nubes de puntos georeferenciadas, Agisoft Photoscan y Pix4DMapper producen resultados muy parecidos (pico de la distribución a 1.5 mm) mientras la nube producida en 3DF Zephyr Aerial presenta un mayor ruido respecto a las otras.

El levantamiento de Via di Nocera, ha implicado un hexacoptero ensamblado con una cámara mirrorless (Sony alpha 6000) utilizada para una adquisición totalmente manual en time-lapse. La elaboración ha producido un error medio

sobre los 10 GCP, medidos a través de una estación total, inferior a los 2 cm; además forzando al máximo la fase de Densos Image Matching, la nube de puntos cuenta con más de 40 millones de puntos, comparable por densidad a un levantamiento de tipo Lidar. El error de proyección medio del levantamiento es de acerca 0.94 mm, mientras el error máximo está en unos 10 mm, volviendo extraíble del modelo 3D productos adaptados a una escala gráfica de 1:50.

El dataset fotogramétrico utilizado para el Anfiteatro romano de Pompeya, utilizó como GCP 16 puntos naturales, bien visibles medidos sobre una nube TLS del entero anfiteatro. El descarte medio entre el modelo fotogramétrico y aquel TLS resulta ser de unos 9 cm, que disminuye a unos 6 cm a través de la implementación de un ICP entre las nubes de puntos. El procedimiento efectuado tiene esencialmente dos ventajas: la nube de puntos finales es menos pesada con respecto a la sola nube TLS (vamos de centenares a decenas de GB), la fase de adquisición y elaboración de los datos fotogramétrico es mucho más rápida y el ortofoto nadir, del modelo integrado, tiene una calidad fotográfica notablemente mejor que el modelo precedente solo con el sensor activo. El procedimiento implementado permitió generar una nube de puntos procedentes de sensores diferentes: el exterior del anfiteatro está representado por la sola elaboración fotogramétrica, (más ligera y con posibilidad de exportar una ortofoto con mejor información RGB), mientras todos aquellos no levantables con VANT como las galerías, fueron conservado por la nube TLS.

Métricamente, analizando el parámetro del error de reproyección y utilizando los GCP derivados de la nube TLS, se observa que el error medio sobre la nube de puntos y el error máximo son comparables con aquéllos conseguidos en la otra experiencia con medición a tierra de puntos de apoyo en modalidad nRTK. Del conjunto de técnicas de levantamiento utilizados para el anfiteatro de Pompeya, la extrapolación de elaborados desde el modelo 3D es posible a una escala máxima estimada de 1:100.

Las pruebas conducidas sobre el dataset del anfiteatro romano de Avella, han permitido valorar las condiciones para el posicionamiento y el número de puntos de apoyo a utilizar en la fase de orientación del bloque fotogramétrico. En particular, el tamaño del sitio y una campaña topográfica meticulosa, nos han permitido verificar la influencia del número, la distribución y la precisión de la medición de los GCP, ya que puede influir en la orientación del bloque

fotogramétrico. Las pruebas han demostrado que los errores medios sobre los GCP son mayores al disminuir el número de GCP, aunque estos últimos sean medidos en modalidad estática – rápido (por lo tanto presumiblemente más precisos), con respecto a las configuraciones elaboradas utilizando un mayor número GCP medido en nRTK. Estos resultados confirman la necesidad de preparar sobre el área a sobrevolar una serie de puntos de apoyo en número suficiente y homogéneamente distribuidos, que permitan aumentar la estabilidad del bloque y minimizar los descartes métricos sobre el modelo. La diferencia de precisión entre una medición estática o nRTK del punto de control, no influye particularmente en la precisión del modelo final con los GCP. Además se ha notado que el empleo de tarjetas y clavos topográficos para los puntos de control, con respecto a puntos naturales mejora la precisión del modelo obtenido. Observando el parámetro del error de reproyección sobre el entero Anfiteatro, se nota en cambio lo inverso: el error de reproyección medio sobre la nube de puntos es menor para la configuración con apoyo topográfico en modalidad estática-rápido, mientras que en las configuraciones de georeferenciación en nRTK, el error medio de reproyección disminuye al aumentar el número de GCP. Las estimaciones de los máximos errores de reproyección sobre la nube de puntos son parecidas entre ellos en las tres configuraciones (unos 25 mm).

La prueba fotogramétrica realizada sobre el mismo anfiteatro y con la misma altura de vuelo con el medio comercial DJI Phantom 3 Professional, han restituido una ortofoto con precisiones menores al levantamiento conseguidos por el hexacóptero, en todas las configuraciones de georeferenciación. En particular se nota que el error medio de reproyección sobre la nube de puntos es invariante al variar la configuración de los GCP (valores de media y desviación estándar casi idénticos entre ellos); eso evidencia que la estabilidad bloque fotogramétrico de solo imágenes nadirales y con overlap mínimos para la restitución fotogramétrica, no se ve afectada por una mayor precisión que la medición estática, como ocurre en cambio para el levantamiento con hexacóptero que presenta imágenes nadirales y oblicuas. El error de reproyección máximo para la adquisición obtenida de medios ligeros, para las tres modalidades de georeferenciación está estimado en unos 35 mm. En fin, las pruebas de vídeo conducidas por el medio ligero generalmente presentan descartes con un orden de tamaño mayor sobre los mismos GCP utilizados para la fotogrametría (medias

sobre los 10 cm). Del caso de estudio es posible concluir que, el empleo de imágenes oblicuas, además de mejorar el número de matching entre las imágenes, mejora la estabilidad del bloque fotogramétrico, que se orienta con menores diferencias y un número menor de GCP, pero medidos a tierra de manera principalmente precisa. Viceversa, en la aerofotogrametría con medio ligero con solo imágenes nadirales, georeferenciar el modelo con más puntos medidos en nRTK o un número menor de puntos en modalidad estática-rápido, no mejora la calidad métrica del modelo. De los levantamientos desarrollados sobre el área de Avella visto medias estimadas sobre los GCP y sobre el error de reproyección, la máxima escala gráfica de restitución para el levantamiento con hexacóptero es de 1:50, mientras para el levantamiento con medio ligero es de 1:100.

En el parque arqueológico de Paestum, sobre el Tempio di Nettuno, ha sido experimentada una integración entre sensores activos y pasivos para la mapificación detallada en el ámbito arqueológico. En particular el levantamiento fotogramétrico con VANT realizado con modalidad mixta, vuelo automático en nadir y tomas fotogramétricas oblicuas en manual, con apoyo topográfico de 11 GCP, medidos en nRTK. Ha producido medias inferiores a los 2 cm. Un levantamiento TLS del basolato ha integrado el levantamiento fotogramétrico, georeferenciado a través de los mismos GCP utilizados por la aerofotogrametría. La integración ha permitido conseguir en un único modelo un modelo multi-escala necesario para el estudio multidisciplinario del Templo. Del modelo fotogramétrico, además, se estimó el volumen de relleno de las depresiones presentes sobre el basolato, necesario para la realización de una futura pasarela de acero. Analizando el error de reproyección del modelo fotogramétrico, se observa un el error medio sobre la nube de puntos acerca de 4 mm y el error máximo de unos 35 mm; la extrapolación de elaborados por el modelo 3D es posible a una escala máxima estimada de 1:100.

Algunos sistemas utilizados han sido probados en presencia de vínculos normativos, o bien dónde no es posible o es difícilmente posible el sobrevuelo con VANT. El primer sistema es 3DEye, un asta telescópica en fibra de carbono (h = 10 m) con una cámara fotográfica Sony QX - 30, integrada dentro de un estabilizador electro-mecánico, utilizado para el levantamiento del portal de la iglesia de Sant'Eligio. Para determinar la precisión del sistema, la toma

fotogramétrica ha sido integrada a un barrido TLS, para así de determinar las medias entre las nubes de puntos. Utilizando el algoritmo ICP entre las nubes fotogramétricas y TLS, la distancia media entre las dos resulta ser de unos 8 mm. El modelo final contempla las ventajas de los dos sensores utilizados: el modelo poligonal está generado de la nube TLS, mucho más densa que la nube fotogramétrica, mientras que la textura está proyectado de las tomas fotogramétricas capturadas por el sistema telescópico.

En fin, ha sido probado un dataset procedente de un medio a pilotaje remoto debajo del umbral normado del Reglamento ENAC, el Beecopter de la Microgeo, realizando el levantamiento fotogramétrico de un eje vial. Para la fase de orientación absoluta y georeferenciación del modelo, fueron medidos a tierra 6 GCP en modalidad estática, produciendo en la consideración del bloque fotogramétrico un error medio de unos 4 cm. A fin de valorar la precisión del sistema aerofotogramétrico, ha sido ejecutado sobre la misma área un levantamiento TLS. La comparación entre las nubes de puntos demuestra una media de unos 6 cm; los resultados conseguidos evidencian una buena calidad métrico-cromática de la ortofoto nadir, mientras la nube de puntos presenta un excesivo ruido sobre el plano de referencia, que aumenta la incerteza del modelo total, con una media de desviaciones sobre el plano de unos 6 cm. La fuerte incertidumbre del modelo está confirmada del análisis del error de reproyección fotogramétrico: el error de reproyección medio sobre la nube de puntos supera los 4 cm, mientras el error máximo hasta los 20 cm.

De las varias experiencias es posible afirmar que la modalidad de adquisición mixta realizada por plan de vuelo o manual para las adquisiciones en nadir, (no utilizando los waypoint pero si la modalidad time lapse), junto a la adquisición (también ella en time-lapse), de tomas oblicuas, ha producido los mejores resultados métricos para la generación de los modelos 3D. Los casos de estudio tratados han demostrado que, también variando la distancia de tomado hacia el objeto no se afecta la precisión de las orientaciones fotogramétricas, más bien, utilizando algunas tomas fotogramétricas juntas a distancias mayores con respecto a aquellas medias (por ejemplo del plano de vuelo), los softwares de tipo SfM aumentan el número de matching, también aumentando el número de tomas fotogramétricas alineadas. Las pruebas realizadas han demostrado que la

precisión del modelo final es proporcional, en principio, a la precisión métrica de los puntos de apoyo medido en tierra, y sucesivamente al número de GCP. Los mejores resultados se han conseguido a través de mediciones en tierra con estación total, caso estudio de Via di Nocera, dónde la escala de restitución máxima final está estimada en 1:50, mientras para las técnicas de medición GNSS en modalidad nRTK, es difícilmente posible una restitución a escala mayor de 1:100. En los casos de estudio analizados, utilizando diversas instrumentaciones y/o parámetros de vuelo (altura, baseline, GSD, etc), no es posible definir una ley común para el curso del error métrico del levantamiento fotogramétrico con UAV, pero es en todo caso posible definir una tendencia. En particular observando los datos procedentes de los diversos levantamientos (resumidos en Tab. 20) es posible afirmar que:

- la altura media de vuelo es proporcional al error de reproyección;
- el GSD medio es proporcional al error de reproyección;
- el número medio de fotos para la triangulación fotogramétrica de un punto es inversamente proporcional al error de reproyección del punto;
- el número máximo de fotos que triangula un punto de la nube es inversamente proporcional al error de reproyección.

Tabla 20: Resumen de los parámetros analizados en los varios casos de estudio.

Case Study	min _{photo}	max _{photo}	μ_{photo}	σ_{photo}	N _{photo}	E _{max} [mm]	GSD [mm]	μ_{er} [mm]	σ_{er} [mm]	μ_{height} [m]
Via Nocera	2	109	4.11	4.69	741	10	3.55	0.94	0.9	15.9
Tempio di Nettuno	2	119	3.95	4.01	923	35	7.79	3.99	4	36.2
Beecopter Asse Varió	2	38	3.98	3.72	97	200	7.89	44.36	35.75	29
Anfiteatro Pompei	2	83	3.49	2.99	394	35	8.5	3.99	4.09	36.7
Anf. Avella Hexa Target	2	98	5.14	6.52	627	25	9.96	2.47	2.47	30
Anf. Avella Hexa nRTK	2	98	5.14	6.52	627	25	9.96	3.28	3.28	30
Anf. Avella Hexa Static	2	98	5.14	6.52	627	25	9.96	2.78	2.37	30
Anf. Avella Phan. Target	2	20	2.95	1.74	75	35	11.3	4.5	4.5	30.1
Anf. Avella Phan. nRTK	2	20	2.95	1.74	75	35	11.3	4.48	4.48	30.1
Anf. Avella Phan. Static	2	20	2.95	1.74	75	35	11.3	4.47	4.47	30.1

CONCLUSION

During the activities undertaken during the three-year PhD course, various aspects related to the technique of UAV in the Cultural Heritage field were analyzed, identifying the advantages, limitations and potentials of the acquisition of images from these vehicles and the subsequent processing of Structure From Motion software for the creation of three-dimensional photo-realistic models for surveying and archaeological documentation. The main objective of the research was to address the problems of how to acquire data obtained by SAPR and the subsequent processing, with a view to demonstrating the great potential of these systems for aerial photogrammetry in the archaeological field. The various tests carried out, allowed to define the photogrammetric survey procedures by SAPR more productive in terms of optimization of time acquisition and metric reliability of the survey, reliability often estimated through the comparison of redundant data but coming from range-based techniques, notoriously denser and accurate.

The case study of Villa di Giulia Felice allowed us to evaluate the metric accuracy of a photogrammetric survey by an action camera, a Gopro Hero 3 Black in a narrow space (maximum acquisition distance from the object 90 cm). The dataset was elaborated in various commercial software such as Structure From Motion (Agisoft Photoscan, Pix4DMapper and 3DF Zephyr Aerial), using 14 GCP distributed on the whole perimeter wall, to evaluate the final accuracy of the model. The processing allowed to verify that Agisoft PhotoScan returns the maximum average difference (3.5 cm), while Pix4Dmapper the minimum (2.18 cm). By comparing the geo-referenced points clouds, Agisoft Photoscan and Pix4DMapper produced very similar results (distribution peak at 1.5 mm), while the cloud produced in 3DF Zephyr Aerial presented a greater noise than the others.

The survey of Via di Nocera involved an hexacopter assembled with a mirrorless camera (Sony alpha 6000) used for a totally manual time-lapse acquisition. The processing produced an average error of 10 GCP, measured by means of a total station, less than 2 cm; furthermore, by pushing the Dense Image Matching phase to the maximum, the point cloud counted over 40 million points, comparable by density to a Lidar-type survey. The average reprojection error of the survey was about 0.94 mm, while the maximum error was about 10 mm, making extractable from the 3D model an output suitable for a graphic scale of 1:50.

The tests conducted on the dataset of the Roman Amphitheater of Avella, allowed to evaluate the conditions for the positioning and the number of support points to be used in the orientation of the photogrammetric block phase. In particular, the size of the site and a redundant topographic campaign, allowed us to verify the number influence, the distribution and the measurement accuracy of the single GCP as it can influence the orientation of the photogrammetric block. Tests shown that average errors on GCPs were greater as the number of GCPs decreases, even if the latter were measured in a static - rapid mode (therefore presumably more precise), compared to the configurations processed using a higher GCP number measured in nRTK . These results confirm the need to arrange, on the overlooked area, a series of support points in sufficient and homogeneously distributed number, which allow to increase the stability of the block and minimize the metric deviation on the model. The difference in accuracy between a static or nRTK measurement of the single control point did not particularly affect the accuracy of the final model on the GCPs. Furthermore, it was noted that the use of topographic targets and nails for the control points, compared to natural points improved the accuracy of the final model. Observing the parameter of reprojection error on the entire Amphitheater, we noted the inverse: the average reprojection error on the point cloud was smaller in the configuration with topographic support in static-rapid mode, while in the georeferencing configurations in nRTK, the average reprojection error decreased as the number of GCPs increases. Estimates of the maximum reprojection error on the point cloud were similar to each other in the three configurations (about 25 mm).

The photogrammetric test carried out on the same amphitheater and with the same flight altitude with the commercial DJI Phantom 3 Professional, returned an orthophoto with minor accuracy compared to the survey obtained by the hexacopter, in all the georeferencing configurations. In particular, it was noted that the average reprojection error on the point cloud was invariant when the GCP configuration changed (mean and standards deviation values almost identical to each other); this showed that the photogrammetric block stability of nadir images and with minimal overlaps for the photogrammetric restitution, was not affected by the greater accuracy of a static measurement, as happens instead in the survey with hexacopter that it showed nadiral and oblique images. The maximum reprojection error in the acquisition by light vehicles, for the three georeferencing

modes, was estimated to be around 35 mm. Finally, the video tests conducted by the light vehicle showed deviations generally an order of magnitude greater than the same GCP used for photogrammetry (average deviation over 10 cm). From the case study it was possible to conclude that, using oblique images, in addition to improving the number of matching between the images, improved the stability of the photogrammetric block, which was oriented with fewer discards with a smaller number of GCP, but on GCP more accurately. Vice versa, in a aerophotogrammetry by light vehicle with only nadiral images, georeferencing the model with more points measured in nRTK or fewer points in static-rapid mode, did not improve the metric quality of the model. From the surveys carried out on the Avella area, given the estimated metric deviation on the GCPs and the reprojection error, the maximum graphical scale of return for the survey by hexacopter was 1:50, while for the survey by a light medium it was 1: 100.

The photogrammetric dataset used for the Roman amphitheater of Pompeii, used as GCP 16 natural points, clearly visible and measured on a TLS cloud of the entire amphitheater. The average deviation between the photogrammetric and TLS models was about 9 cm, which decreased to about 6 cm by the implementation of an ICP between the point clouds. The procedure carried out has essentially two advantages: the final point cloud is less heavy than the TLS cloud (we pass from hundreds to tens of GB), the acquisition and processing phase for the outside of the photogrammetric data is much quicker and the nadir orthophoto, of the integrated model, has a considerably better photographic quality than the model coming from the active sensor alone. The implemented procedure allowed to generate a cloud of points coming from different sensors: the outside of the Amphitheater is represented by the only photogrammetric processing, (lighter and with the possibility of exporting an orthophoto with better RGB information), while all that is not detectable from SAPR, like the tunnels, it has been preserved by the TLS cloud. Metrically, analyzing the parameter of the reprojection error and using the GCPs coming from the TLS cloud, it was observed that the average error on the point cloud and the maximum error were comparable to those obtained in the other experiences with ground measurement of GCP in nRTK mode. From the set of survey techniques used for the Pompeii Amphitheater, the extrapolation of process from 3D model was possible at a maximum estimated scale of 1: 100.

In the archaeological park of Paestum, on the Temple of Neptune, an integration between active and passive sensors for detailed mapping in the archaeological field was investigated. In particular, the photogrammetric survey from SAPR conducted in mixed mode (automatic flight in nadir and manual oblique photogrammetric shoots), with topographic support of 11 GCP, measured in nRTK, produced average deviation less than 2 cm. A TLS survey of the basolato integrated the photogrammetric survey, georeferenced by the same GCP used for the aero photogrammetry. The integration allowed to obtain in a single model a multi-scale model necessary for the multi-disciplinary study of the Temple. Moreover, from the photogrammetric model, the fill volume of the depressions present on the basolato was estimated, necessary for the construction of a future steel gangway. Analyzing the reprojection error of the photogrammetric model, we observed an average error on the point cloud of about 4 mm and the maximum error of about 35 mm; the extrapolation of the elaborations from the 3D model was possible at a maximum estimated scale of 1: 100.

Some systems were tested that can be used in the presence of legislative constraints, ie where it is not possible or it is difficult to overtake by UAV. The first system is 3DEye, a telescopic pole in carbon fiber (h = 10m) with a Sony QX - 30 camera, inserted inside an electro - mechanical stabilizer, used for the survey of the portal of Sant'Eligio church. To verify the accuracy of the system, the photogrammetric acquisition was integrated into a TLS scan, to verify the average differences between the point clouds. Using the ICP algorithm between photogrammetric clouds and TLS, the average distance between the two clouds was about 8 mm. The final model contemplated the advantages of the two sensors used: the polygonal model was generated by the TLS cloud, much denser than the photogrammetric cloud, while the texture was projected from the photogrammetric shoots captured by the telescopic system.

Finally, a dataset from a remote piloted vehicle was tested below the threshold established by ENAC Regulation, the Microgeo Beecopter, realizing the photogrammetric survey of a road axis. For the absolute orientation and georeferencing phases of the model, 6 GCPs were measured in static mode on the ground, producing an average error of about 4 cm in the estimation of the photogrammetric block. In order to evaluate the accuracy of the UAV, a TLS survey was performed on the same section. The comparison between the clouds of

points evaluated an average difference of about 6 cm; the obtained results showed a good metric-chromatic quality of the nadir orthophoto, while the cloud of points presented an excessive noise on the reference plane, which increased the uncertainty of the overall model, with an average of deviations on the plane of about 6 cm. The strong uncertainty of the model was confirmed by the analysis of the photogrammetric reprojection error: the average reprojection error on the point cloud exceeded 4 cm, while the maximum error was even 20 cm.

From the various experiments it is possible to state that the mixed acquisition mode conducted through flight plan or manual for acquisitions in nadir, (not using waypoints but time - lapse mode), together with the acquisition (also in time - lapse) of oblique shoots, produced the best metric results for the generation of 3D models. The case studies shown that, even with the variation of the distance taken by the object, the accuracy of the photogrammetric orientations is not influenced, indeed, using some photogrammetric shoots at greater distances than the average ones (for example, flight planes) SfM type software increases the number of matching, also increasing the number of aligned photogrammetric shoots. The tests carried out also shown that the accuracy of the final model is proportional, in primis, to the metric accuracy of the points of support measured on the ground, and subsequently to the number of GCPs. The best results were obtained by ground measurements with total station (case study of Via Nocera), where the maximum final scale is estimated at 1:50, while for the GNSS measurement techniques in nRTK mode, it is difficult to obtain a return greater than 1: 100.

In the various case studies analyzed, using different instrumentations and / or flight parameters (height, baseline, GSD, etc.), it is not possible to define a common law for the trend of the metric error from the photogrammetric survey by UAV, but it is possible define a trend. In particular, observing the data from the various surveys (summarized in Table.) it is possible to state:

- the average flight height is proportional to the reprojection error
- the average GSD is proportional to the reprojection error;
- average number of photos for the photogrammetric triangulation of a point is inversely proportional to the reprojection error on the point
- the maximum number of photos that triangular a point of the cloud is inversely proportional to the reprojection error.

Summary of the parameters analyzed in the various case studies.

Table 20: Summary parameters analyzed in the various case studies.

Case Study	\min_{photo}	\max_{photo}	μ_{photo}	σ_{photo}	N_{photo}	E_{max} [mm]	GSD [mm]	μ_{er} [mm]	σ_{er} [mm]	μ_{height} [m]
Via Nocera	2	109	4.11	4.69	741	10	3.55	0.94	0.9	15.9
Tempio di Nettuno	2	119	3.95	4.01	923	35	7.79	3.99	4	36.2
Beecopter Asse Viario	2	38	3.98	3.72	97	200	7.89	44.36	35.75	29
Anfiteatro Pompei	2	83	3.49	2.99	394	35	8.5	3.99	4.09	36.7
Anf. Avella Hexa Target	2	98	5.14	6.52	627	25	9.96	2.47	2.47	30
Anf. Avella Hexa nRTK	2	98	5.14	6.52	627	25	9.96	3.28	3.28	30
Anf. Avella Hexa Static	2	98	5.14	6.52	627	25	9.96	2.78	2.37	30
Anf. Avella Phan. Target	2	20	2.95	1.74	75	35	11.3	4.5	4.5	30.1
Anf. Avella Phan. nRTK	2	20	2.95	1.74	75	35	11.3	4.48	4.48	30.1
Anf. Avella Phan. Static	2	20	2.95	1.74	75	35	11.3	4.47	4.47	30.1

REFERENCIAS

ABI Research, Small Unmanned Aerial Systems Market Exceeds US\$8.4 Billion by 2019, Dominated by the Commercial Sector and Driven by Commercial Applications, January 5, 2015.

AUVSI, The economic impact of unmanned aircraft systems integration in the united states, Marzo 2013.

Babbar G., Punam Bajaj, Anu Chawla, Monika Gogna. A comparative study of image matching algorithms, International Journal of Information, Technology and Knowledge Management. July-December. 2(2): 337-339.2010.

Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L., 2008. SURF: Speeded Up Robust Features, Computer Vision and Image Understanding.

BI intelligence, The drones report: Market forecasts, regulatory barriers, top vendors, and leading commercial applications, 20 luglio 2015.

Barrile V., Bilotta G., Lamari D., Meduri G.M., Monardi Trungadi U., Augusta Ricciardi A., Computer vision/structure for motion per la diffusione dei beni culturali, Atti 15° Conferenza Nazionale ASITA, 15 -18 Novembre 2011, Parma pp. 51-60.

Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., 2011. Automated and accurate orientation of complex image sequences. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Babbar, G., Bajaj, P., Chawla, A. & Gogna, M., (2010), Comparative Study Of Image Matching Algorithms, in International Journal of Information Technology and Knowledge Management, , Volume 2, No. 2, pp. 337-339.

Balletti C., Guerra F., Tsioukas V., Vernier P. Calibration of Action Cameras for Photogrammetric Purposes, Sensor, vol. 14, No. 9 (2014), pp. 17471-17490.

Barba S., Tecniche digitali per il rilievo di contatto, Cues,2008.

Barba S., Limongiello M., Mele F., Una herramienta VANT experimental para una metodología cada vez más consolidada: el caso de Via di Nocera en Pompeya, XVIII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, 21-25 Nov. 2016, ISBN: 978-959-261-533-5.

Barba S., De Feo E, Fiorillo F., Limongiello M., Santoriello A., Methods and techniques for documentation of the ancient city of Pompeii. Three case studies, Heritage Buildings Conservation: Methods and Techniques, libreriauniversitaria.it edizioni (in press.).

Bolognesi M., Furini A., Russo V., Pellegrini A., Russo P., Testing the low-cost RPAS potential in 3D Cultural Heritage reconstruction, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-5/W4 (2015) pp. 29-235.

Chiarabrando F., De Bernardi M., Roggero M. Impiego di aerei ultraleggeri e camere di medio formato per la fotogrammetria aerea a grande scala, in Bollettino della società italiana di Fotogrammetria e Topografia, vol. 4, pp. 75-95.

Camacho J. A., Granado Castro G., Barrera Vera J.A., Aplicación de técnicas avanzadas para el registro y la documentación estratigráfica en arqueología, Virtual Archaeology Review, 2013, Volumen 4 Número 8. ISSN: 1989-9947.

Eisenbeiß H. (2009). UAV photogrammetry. Zurich CH: ETH.

Eisenbeiss H., 2011. The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping, Wichmann/VDE Verlag. Belin & Offenbach.

Eisenbeiss H., 2011. UAV Photogrammetry, investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. The Photogrammetric Record 26 (136), pp. 400-421.

Fangning H., Ayman H., "Target-based and feature-based calibration of low-cost digital cameras with large field-of-view", Proceedings of the ASPRS 2015 Annual Conference, May 4-8 2015, Tampa, Florida, pp 25-32.

Fassi F., Fregonese L., Ackermann S., De Troia V Comparison between laser scanning and automated 3D modelling techniques to reconstruct complex and

extensive cultural heritage areas, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W1 (2013) pp.73-80.

Fiorillo, F. Jiménez Fernández-Palacios, B., Remondino, R., Barba, S., 3D surveying and modelling of the archaeological area of Paestum”, Italy. IV Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación ARQUEOLÓGICA 2.0, pp. 55-60.

Fiorillo F., Limongiello M., Jimenez Rodriguez B., Testing GoPro for 3D model reconstruction in narrow spaces, in *Acta Imeko*, Volume 5, Número 2, Settembre 2016, pp. 64-70. ISSN: 2221-870.

Fiorillo F., Limongiello M., Jimenez Rodriguez B., Barba S., Documentazione dei paramenti della Villa di Giulia Felice a Pompei. Spazi angusti e analisi geometrico-grafica dei rilievi, *Prospettive architettoniche conservazione digitale, divulgazione e studio*, volume II, tomo II pag 425-436, ISBN: 978-88-98533-45-9.

Fiorillo F., De Feo E., Musmeci D., The architecture, geometry and representation of the Amphitheatre of Pompeii, 38° Convegno Internazionale dei Docenti delle discipline della rappresentazione, Firenze 15 -17 Settembre 2016, pp. 1143-1146.

Förstner, W., (1986), A feature based correspondence algorithm for image matching, *Proceedings of the Symposium from Analytical to Digital*. Rovaniemi, Finland, pp.150-166.

Fusiello A., *Visione Computazionale: tecniche di ricostruzione tridimensionale*, Franco Angeli, 2013.

Giordano M., Barba S., *Le geometrie del decoro architettonico. Sistemi di presa scanning 3D e prototipazione*, CUES, 2012.

González-Aguilera D., Muñoz-Nieto A., Gómez-Lahoz J., Herrero-Pascual J., Gutierrez-Alonso G., 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art, *Sensors*, 2009, 9(02), 1108-1127, ISSN 1424-8220.

Guarnieri A., Vettore A., El-Hakim S., Gonz L. Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXV Part B5, 200, , 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey, pp. 154-158.

Gutiérrez A. G., de Sanjosé-Blasco J. , de Matías-Bejarano J. and Berenguer-Sempere F., Comparing Two Photo-Reconstruction Methods to Produce High Density Point Clouds and DEMs in the Corral del Veleta Rock Glacier (Sierra Nevada, Spain), Remote Sensing, 2014, Vol. 6, 5407-5427, ISSN 2072-4292

Harris and M. Stephens. A Combined Corner and Edge Detector. In 4th ALVEY Vision Conference, pages 147–151, 1988.

Kraus K., 1998. Fotogrammetria vol.1, Levrotto & Bella.

Küng, O.; Strecha, C.; Beyeler, A.; Zufferey, J.C.; Floreano, D.; Fua, P.; Gervais, F. The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery. In IAPRS, Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Zurich, Switzerland, 14–16 September 2011; 2011.

Jong-hwa Kim, Mu-wook Pyeon, Yang-dam Eo, Ill-woong Jang. An Experiment of Three-Dimensional Point Clouds Using GoPro, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, vol. 8, No. 1, pp. 82-85.

Limongiello M., Jimenez Rodriguez B., Action camera for metric archeological documentation for narrow space, in I° International Conference Metrology for Archaeology, Benevento 22-23 Ottobre 2015, ISBN: 978-88-940453-3-8.

Limongiello M., Santoriello A., Schirru G., Bonaudo R., Barba S. The Amphitheatre of Avella: from its origin to digital, in in II° International Conference Metrology for Archaeology, Torino 19-21 Ottobre 2016: ISBN: 978-92-990075-4-9

Limongiello M., Magris N., Adquisición de datos con sensores pasivos para el registro digital de arquitecturas urbanas con dificultad en el acceso, Simposio International Selper, Puerto Iguazú 7-11 Novembre 2016, ISBN: 978-987-3941-14-6.

Limongiello M., Di Benedetto A., L'uso di VANT per la documentazione archeologica: il caso studio di Ponte Rotto ad Apice (BN), XXI Conferenza Nazionale ASITA. Grand Hotel di Salerno, 21-23

Limongiello M., Barba S., Germinario C., IzzoF., Musmeci D., Santoriello A., Photogrammetry for archaeological 3d surveying: the case-study of ponte rotto along the ancient appia (Benevento, Italy), Yococu 2017: Contribute and role of youth in conservation of cultural heritage (in press.).

Lo Brutto M., Meli P, Ceccaroni F, Casella M, Studio delle potenzialità delle piattaforme UAV nel campo del rilievo dei Beni Culturali, Atti 17° Conferenza Nazionale ASITA - Riva del Garda 5-7 novembre 2013, pp 877-884.

Lowe D., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. Proceedings of International conference in Computer Vision. Curfu, Greece. 2004. pp. 1150-1157.

Lowe, D.G., (2004), Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints; International journal of computer vision, Volume 60, Number 2, pp 91-110.

Martínez Chao T. E.; Martínez Rojo T. E. Empleo de cámaras digitales no métricas en levantamientos aéreos a grandes escalas. XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, 2015, pp. 12.

Ninsalam Y., Rekitke J. Landscape architectural foot soldier operations, Sustainable Cities and Society, vol. 20, pp. 158-167.

Papa M., Sarno L., Limongiello M., Barba S., Monitoraggio e modellazione di fenomeni di colate detritiche di pomici con tecniche di remote sensing. Un caso studio in Costiera Amalfitana, in Aspetti idrologici e idraulici per il controllo dei movimenti franosi- IDRA2014 Pag.129-141. ISBN: 88-89317-08-6

Papa M., Sarno L., Ciervo F., Barba S., Fiorillo F., Limongiello M., Field surveys and numerical modeling of pumiceous debris flows in Amalfi Coast (Italy), International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 9, No. 4, Luglio 2016, ISSN:1882-6547.

Paris L., Fotogrammetria e fotomodellazione, Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione, Vol II, pp.55-62.

Rapporto e Bilancio Sociale ENAC (2014, 2015, 2016).

Regolamento ENAC (versioni 2013, 2015 e 2016).

Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D., (2011), UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling- current status and future perspectives, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXVIII-1/C22: 25-31.

Remondino F., Poli D., Back to the future: il ritorno della fotogrammetria, GEOmedia n. 2-2014, pp. 1-8.

Remondino, F., Menna, F., (2008), Image-Based surface measurement for close-range heritage documentation, in ISPRS Archive, Beijing, Vol. XXXVII, Part B5, pp. 199-206.

Sophic Capital, Drones: a rising market An Industry to Lift your Returns 8 September, 2015.

Strecha C., Zoller R., Rutishauser S., Brot B., Schneider-Zapp K., Chovancova V., Krull, L. Glassey M. "Quality assessment of 3D reconstruction using fisheye and perspective sensors", ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. II-3/W4 (2015), pp. 215-222.

Tufarolo E., 2014. Auto-calibrazione di fotocamere digitali amatoriali applicata a tecniche di acquisizione multi-scala in fotogrammetria dei vicini. Bollettino AIC 152/2014.

Ullman S., "The interpretation of structure from motion", Proc. Roy. Soc. (London), vol. B203, pp. 405-426, 1979.

PUBLICACIONES

Papa M., Sarno L., Limongiello M., Barba S., Monitoraggio e modellazione di fenomeni di colate detritiche di pomici con tecniche di remote sensing. Un caso studio in Costiera Amalfitana, in *Aspetti idrologici e idraulici per il controllo dei movimenti franosi- IDRA2014* Pag.129-141. ISBN: 88-89317-08-6

Limongiello M., Jimenez Rodriguez B., Action camera for metric archeological documentation for narrow space, in *I° International Conference Metrology for Archaeology*, Benevento 22-23 Ottobre 2015, ISBN: 978-88-940453-3-8.

Fiorillo F., Limongiello M., Jimenez Rodriguez B., Barba S., Documentazione dei paramenti della Villa di Giulia Felice a Pompei. Spazi angusti e analisi geometrico-grafica dei rilievi, *Prospettive architettoniche conservazione digitale, divulgazione e studio*, volume II, tomo II pag 425-436, ISBN: 978-88-98533-45-9.

Papa M., Sarno L., Ciervo F., Barba S., Fiorillo F., Limongiello M., Field surveys and numerical modeling of pumiceous debris flows in Amalfi Coast (Italy), *International Journal of Erosion Control Engineering* Vol. 9, No. 4, Luglio 2016, ISSN:1882-6547.

Fiorillo F., Limongiello M., Jimenez Rodriguez B., Testing GoPro for 3D model reconstruction in narrow spaces, in *Acta Imeko*, Volume 5, Número 2, Settembre 2016, pp. 64-70. ISSN: 2221-870.

Barba S., Limongiello M., Mele F., Una herramienta VANT experimental para una metodología cada vez más consolidada: el caso de Via di Nocera en Pompeya, *XVIII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, 21-25 Nov. 2016, ISBN: 978-959-261-533-5.

Limongiello M., Santoriello A., Schirru G., Bonaudo R., Barba S. The Amphitheatre of Avella: from its origin to digital, in *II° International Conference Metrology for Archaeology*, Torino 19-21 Ottobre 2016: ISBN:1 978-92-990075-4-9.

Limongiello M., Magris N., Adquisición de datos con sensores pasivos para el registro digital de arquitecturas urbanas con dificultad en el acceso, Simposio International Selper, Puerto Iguazú 7-11 Noviembre 2016, ISBN: 978-987-3941-14-6.

Limongiello M., Di Benedetto A., L'uso di VANT per la documentazione archeologica: il caso studio di Ponte Rotto ad Apice (BN), XXI Conferenza Nazionale ASITA. Grand Hotel di Salerno, 21-23

Barba S., De Feo E, Fiorillo F., Limongiello M., Santoriello A., Methods and techniques for documentation of the ancient city of Pompeii. Three case studies, Heritage Buildings Conservation: Methods and Techniques, libreriauniversitaria.it edizioni (in press.)

Limongiello M., Barba S., Germinario C., IzzoF., Musmeci D., Santoriello A., Photogrammetry for archaeological 3d surveying: the case-study of ponte rotto along the ancient appia (Benevento, Italy), Yococu 2017: Contribute and role of youth in conservation of cultural heritage (in press.).

.

NOTAS

¹ Remondino F., Nex F. - UAV for 3D mapping applications: a review.

² Estos últimos suelen pesar menos de 5 kg y, por lo tanto, también son útiles para algunos sistemas comerciales en el mercado, algunos de estos en el mercado son YellowScan Surveyor de 1,5 kg o el Riegl Vux-1 de alrededor de 4 kg.

³ El Certificado de piloto de APR y la Licencia son válidos por cinco años, a menos que ENAC proporcione otra cosa, y son renovables de acuerdo con las disposiciones de la regulación. La regulación muestra que el piloto tiene la obligación de registrar su actividad de vuelo y no puede realizar operaciones especializadas si no realizó al menos tres vuelos separados con el VANT en los 90 días anteriores a la fecha de la actividad en operaciones especializadas (debidamente registradas, en el manual de vuelo). Con el propósito de la aptitud psicofísica, el piloto debe estar en posesión de un certificado médico de tercera clase válido, emitido de acuerdo con el Reglamento ENAC “Organización de la Salud y certificaciones médicas de idoneidad para el logro de licencias y certificados aeronáuticos”.

⁴ Visual Line Of Sight: operaciones realizadas a distancia, tanto horizontales como verticales, de modo que el piloto a distancia pueda mantener un contacto visual aéreo continuo, sin la ayuda de instrumentos para aumentar la vista, lo que permite el control directo del vehículo para gestionar el vuelo, mantener las separaciones y evitar colisiones con el vehículo.

⁵ La actividad experimental preliminar se lleva a cabo por el piloto como por el operador que tiene la intención de utilizar y permite establecer una capacidad adecuada para controlar el vehículo por el propio piloto, investigando el sobre de vuelo en el que se utilizará el VANT y, en particular, las maniobras de emergencia. La actividad experimental preliminar se lleva a cabo en áreas no pobladas por pilotos con un Certificado; no requiere comunicación previa de la ENAC. Es responsabilidad del conductor garantizar que respeta las condiciones para llevar a cabo las actividades experimentales. Por parte del operador, existe la obligación de proporcionar a ENAC, también, los datos relacionados con las actividades llevadas a cabo de acuerdo con las indicaciones del Órgano.

⁶ La capacidad del operador VANT para cumplir con las obligaciones derivadas de este Reglamento, en casos de operaciones críticas, está certificada por ENAC a través de una autorización; en casos de operaciones no críticas. La autorización o declaración cubre todos los aspectos relacionados con la seguridad de las operaciones de VANT (transporte aéreo, operaciones de vuelo, pilotos). La regulación define que el operador debe tener un manual de operaciones que defina los procedimientos necesarios para administrar las actividades de vuelo y el mantenimiento de los sistemas. El manual incluye los métodos por los cuales el operador lleva a cabo el análisis de riesgos.

⁷ El cumplimiento de este requisito se considera cumplido cuando el VANT se suministra con: i) un comando primario y sistema de control cuyo software se ajusta a la norma aeronáutica se refiere específica EUROCAE ED-12 al menos en el nivel de diseño fiabilidad D; ENAC puede aceptar estándares alternativos cuando cumplen los mismos objetivos de confiabilidad; ii) sistemas adecuados para mantener el control de las operaciones en caso de pérdida del enlace de datos o mitigación de sus efectos; iii) un sistema de terminación de vuelo cuyo comando es independiente y diferente del sistema de comando y control y que, cuando se activa, permite una exposición moderada al posible daño por impacto.

⁸ inch (pollice) = 2,54 cm.

⁹ es la diferencia entre el punto 3D estimado por los parámetros fotogramétricos y el punto de imagen dado.

¹⁰ Para obtener más información sobre el método LM, consulte “Visión computacional” por Andrea Fusiello.

¹¹ AgiSoft LLC es un grupo que se ocupa desde 2006 del desarrollo de aplicaciones de modelado 3D y soluciones cartográficas basadas en tecnologías de visualización virtual. Es un software que es adecuado tanto para fotogrametría de rango cercano como para medios UAV, lo que permite generar modelos tridimensionales completos de texturas a partir de un conjunto de imágenes fotográficas.

¹² Pix4D es un software lanzado en 2011 por una empresa suiza spin-off. Este programa le permite convertir imágenes de rango cercano o medios aéreos

(incluidos UAV), orto mosaicos georreferenciados, nubes de puntos y modelos 3D texturizados. Las versiones más nuevas presentan nuevas características para agricultura de precisión, termografía y soporte para todos los modelos GoPro, eliminando automáticamente la distorsión causada por la lente.

¹³ 3Dflow es una empresa que opera en el campo de la visión por computadora y el procesamiento de imágenes. Fue fundado en 2011 como un spin-off de la Universidad de Verona y en 2012 fue reconocido como un spin-off de la Universidad de Udine.

¹⁴ Para la documentación general sobre el monumento, ver Johannowski 1979, pp. 17-28; Golvin 1988, p. 37, 42 - 44, 269, 357, 364; La Forgia 1990, pp. 101-106; Iandoli 2005, pp. 169-184; Welch 2009, pp. 208-213.

¹⁵ Estos alojamientos de honor, dijeron tribunalia, se colocaron generalmente en el extremo inferior del eje de arena y, además de proporcionar una visión perfecta de la muestra, también constituido posiciones privilegiadas en el ‘alcance de la asignación funcional del público basado en su importancia social.

¹⁶ En la Edición 2 del Reglamento ENAC de 16 de julio de 2015, la Enmienda 3 de 24 de marzo de 2017, en el Artículo 12 “Operaciones con despegue masivo operacional inferior o igual a 2 kg”, el párrafo 1 establece que: “operaciones especializadas realizadas con VANT de la masa operando a 2 kg de menos de o igual despegue se consideran como no crítica en todos los escenarios operacionales, siempre que las técnicas de diseño y construcción tienen aspectos de una TAE de características inocuidad, previamente comprobada por ENAC o por tema autorizado por él “(ENAC, 2015).

¹⁷ En 2016, cuando se probó el vehículo, el reglamento de ENAC aún no establecía el uso obligatorio de parahélices para estos vehículos, que se volvió obligatorio sólo a partir de diciembre de 2015..

¹⁸ DJI Ground Station es una herramienta de gestión que permite utilizar la interfaz de Google Maps, crear un plan de vuelo a través de puntos de referencia, definir un área de interés, el tamaño del sensor, la altura del vuelo y el porcentaje de superposición entre los fotogramas (en un lado y el otro).

M. Limongiello - Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas

AGRADECIMIENTOS

Barbato, Davide

Benjamin Appleyard, Jose Tomas

Defranco Gabriel

Di Benedetto, Alessandro

Ferreira, Carla

Fiorillo, Fausta

Lopresti Laura

Martinez Chao, Tomas Enrique

Morena, Sara

Panerius, Juan Pablo

Prego, Sergio Higinio

Santoriello, Alfonso

Sosa, Miguel Angel

M. Limongiello - Vehículos aéreos no tripulados para el levantamiento y monitoreo de áreas arqueológicas