

Mejores prácticas para el uso de LiDAR y fotogrametría en drones

Asignatura: Trabajo final de máster

Cazorla Milla, Jaume

12/07/2024

Tutores: Maté Gonzáles, Miguel Ángel

Sáez Blázquez, Cristina



VNiVERSIDAD D SALAMANCA

Escuela **Politécnica Superior**
de **Ávila**

Índice

Índice.....	1
1. Resumen	5
2. Introducción.....	5
2.1. Contexto.....	6
2.2. Objetivos del trabajo	6
2.3. Estado del arte.....	7
3. Equipo de campo y software	8
3.1. Dron	8
3.2. Sensores LiDAR	8
3.3. Software	10
4. Toma de datos.....	10
4.1. Área de vuelo	10
4.2. Planificación de vuelos	11
4.3. Vuelos topográficos	12
4.3.1. Parámetros de vuelo DJI L2.....	13
4.3.2. Parámetros de vuelo TV540.....	13
4.3.3. Puntos de apoyo	14
4.3.4. Resultado.....	15
4.4. Datos crudos adquiridos.....	15
4.4.1. DJI L2	15
4.4.2. TV540	16
4.4.3. Estación base.....	16
4.4.4. Rover RTK.....	16
5. Metodología desarrollada	17
5.1. Planificación de vuelo en DJI Pilot 2.....	17
5.1.1. Planificación de vuelo DJI L2.....	17
5.1.2. Planificación de vuelo TV540	17
5.2. Procesamiento de los vuelos	18
5.3. Procesado del DJI L2 en LP360 Drone.....	19
5.3.1. Importar los datos crudos a LP360	19
5.3.2. Procesamiento de la trayectoria	20
5.3.3. Creación de las líneas de vuelo	21
5.3.4. Georreferenciación de las fotos	22
5.3.5. Generación de la nube de puntos LiDAR	22
5.3.6. Ajuste de líneas de vuelo	23
5.3.7. Clasificación del ruido	24
5.3.8. Generación de la ortofoto.....	24
5.3.9. Medición de los puntos de apoyo.....	25
5.4. Procesamiento del TV540 en LP360 Drone	27
5.4.1. Importar los datos crudos a LP360	27

5.4.2.	Procesamiento de la trayectoria	28
5.4.3.	Creación de las líneas de vuelo	29
5.4.4.	Generación de la nube de puntos LiDAR y georreferenciación de fotos	29
5.4.5.	Ajuste de líneas de vuelo	30
5.4.6.	Clasificación del ruido	30
5.4.7.	Generación de la ortofoto.....	30
5.4.8.	Medición de los puntos de apoyo.....	30
5.5.	Resultados del procesamiento.....	30
5.5.1.	Nubes de puntos LiDAR.....	31
5.5.2.	Ortofotos	31
6.	Mejores prácticas en el uso de sensores LiDAR y fotogrametría.....	32
6.1.	Planificación de vuelo y toma de datos.....	32
6.1.1.	Compartidas entre LiDAR y fotogrametría	33
6.1.2.	LiDAR.....	36
6.1.3.	Fotogrametría.....	37
6.1.4.	Planificación de vuelo para LiDAR y fotogrametría	38
6.2.	Procesamiento de datos.....	39
6.3.	Análisis de nuestros vuelos.....	43
6.3.1.	Planificación de los vuelos.....	43
6.3.2.	Procesamiento de los vuelos	46
7.	Análisis técnico.....	47
7.1.	Calidad de los productos generados.....	47
7.1.1.	Precisión.....	47
7.1.2.	Grosor de la nube de puntos.....	48
7.1.3.	Definición de objetos	50
7.1.4.	Penetración de la vegetación.....	54
7.1.5.	Trayectoria y alineamiento de líneas de vuelo.....	57
7.1.6.	Otros valores	60
7.2.	Precio de las soluciones	62
7.2.1.	Usuario nuevo	63
7.2.2.	Topografía general	63
7.2.3.	Gestión forestal	63
7.2.4.	Inspección de líneas eléctricas	63
7.2.5.	Monitorización de deformaciones.....	64
7.2.6.	Minería.....	64
7.2.7.	Otros usos.....	64
8.	Conclusiones.....	64
9.	Limitaciones de la investigación	67
10.	Bibliografía	68
11.	Anejos	69
11.1.	Ortofotos	69

11.2.	Tabla de precisiones en la nube de puntos LiDAR.....	72
11.3.	Tabla de precisiones en la ortofoto	73
Figura 1:	Zona de vuelo	5
Figura 2:	DJI M350 con el sensor TV540	8
Figura 3:	Sensor True View 540.....	9
Figura 4:	Sensor DJI L2.....	10
Figura 5:	Área de vuelo. Con puntos de apoyo marcados.	11
Figura 6:	Líneas de vuelo L2 120m 6ms	13
Figura 7:	Distribución de los puntos de apoyo	14
Figura 8:	Diana vista desde una foto a 60m.....	14
Figura 9:	Cruz vista desde una foto a 60m	15
Figura 10:	Datos crudos L2 60m 6ms.....	16
Figura 11:	Datos crudos TV540 120m 6ms.....	16
Figura 12:	Resultado de la estación virtual.....	16
Figura 13:	DJI Pilot 2 (DJI Enterprise, 2023).....	17
Figura 14:	Selección camera custom	18
Figura 15:	Cámaras con diferentes campos visuales (Geocue, 2024)	18
Figura 16:	Procesamiento en LP360 sensores LiDAR (LP360, 2024)	18
Figura 17:	Raw Mission - LP360.....	19
Figura 18:	Import wizard - LP360	20
Figura 19:	Vuelo importado DJI L2.....	20
Figura 20:	Trajectory Processing DJI L2.....	21
Figura 21:	Vista del Job Manager.....	21
Figura 22:	Auto Create Flight Lines	21
Figura 23:	Líneas de vuelo generadas en color morado	22
Figura 24:	Fotos georreferenciadas.....	22
Figura 25:	Geocoding	23
Figura 26:	Nube de puntos LiDAR.....	23
Figura 27:	Strip Align	24
Figura 28:	Agisoft Ortho Mapping	24
Figura 29:	Ortofoto generada del DJI L2.....	25
Figura 30:	Import Control Points Wizard	25
Figura 31:	Import Control Points - Asignación	26
Figura 32:	Medición de los puntos de apoyo - Control Points Report.....	26
Figura 33:	Vista de una diana usando la vista por intensidad.....	27
Figura 34:	Diana vista en la ortofoto	27
Figura 35:	Raw Mission - LP360.....	28
Figura 36:	Vuelo TV540.....	28
Figura 37:	Trajectory Processing TV540.....	29
Figura 38:	Base station wizard.....	29
Figura 39:	Post Processing.....	30
Figura 40:	Nube de puntos LiDAR del TV540.....	30
Figura 41:	Nubes de puntos generadas, vista RGB.....	31
Figura 42:	Ortofotos generadas.....	32
Figura 43:	GPS Satellite Ephemerides product (International GNSS service, 2024).....	34
Figura 44:	Ejemplo distribución de puntos de apoyo (Milla, 2023).....	35
Figura 45:	Planificación de vuelos de tipo pasillo (Milla, 2023).....	36
Figura 46:	Reflectivity of Various Surfaces / Materials (RIEGL, 2004).....	36
Figura 47:	Vista de la nube de puntos por elevación	43
Figura 48:	Desnivel del terreno, corte trasnversal E-O.....	43
Figura 49:	Vuelo TV540 60m 6ms vista por línea de vuelo.....	44
Figura 50:	Vuelo L2 60m 6ms vista por línea de vuelo.....	44
Figura 51:	Vuelo L2 120m 12ms vista por línea de vuelo.....	44
Figura 52:	Distribución de los puntos de apoyo	45
Figura 53:	Vuelo TV540 120m 6ms maniobra inicialización IMU.....	46

Figura 54: L2 120m 6ms Corte transversal, vista por líneas de vuelo.....	46
Figura 55: Zona de análisis del grosor de la nube de puntos	49
Figura 56: Comparativa grosor nube de puntos múltiples líneas, corte transversal 0.3m	49
Figura 57: Vista del corte transversal – Plano	50
Figura 58: Comparativa tejado, corte transversal 0.3m	50
Figura 59: Localización del poste	51
Figura 60: Vista del poste TV540 60m 6ms	51
Figura 61: Vista del poste en la nube de puntos	52
Figura 62: Localización de los cables	52
Figura 63: Comparación de cables en la nube de puntos.....	53
Figura 64: Ondulación del tejado.....	53
Figura 65: Vista del corte transversal - detalle 10x6cm	54
Figura 66: Corte transversal tejado, detalle fino	54
Figura 67: Area de vegetacion seleccionada.....	55
Figura 68: Penetración de la vegetación	55
Figura 69: Clasificación manual del suelo 540 60m 6ms corte 0.3m.....	56
Figura 70: Informe de procesamiento, DJI L2 120m 12ms	57
Figura 71: Edificio comparativa alineación	58
Figura 72: Comparativa alineamientos múltiples líneas de vuelo	59
Figura 73: Estadísticas zona medida.....	60
Figura 74: Comparativa ortofoto TV540 y L2.....	62
Tabla 1: Comparativa sensores LiDAR (Geocue, 2024) & (DJI Enterprise, 2024)	9
Tabla 2: Parámetros de vuelo DJI L2	13
Tabla 3: Vista de la trayectoria de los vuelos obtenidos.....	15
Tabla 4: Puntos de apoyo.....	16
Tabla 5: Ejemplo tabla de precisión.....	40
Tabla 6: Ejemplo tabla de precisión para la ortofoto	42
Tabla 7: RMSE de la nube de puntos LiDAR.....	47
Tabla 8: RMSE de la ortofoto	48
Tabla 9: Error en GSD	48
Tabla 10: Grosor nube de puntos área valor numérico	49
Tabla 11: Comparativa definición de objetos - Plano.....	51
Tabla 12: Estadísticas penetración de la vegetación.....	56
Tabla 13: Resultados informes de trayectoria.....	57
Tabla 14: Grosor de la nube de puntos	59
Tabla 15: Estadísticas una sola línea de vuelo	60
Tabla 16: Estadísticas múltiples líneas de vuelo.....	60
Tabla 17: Resolución RGB	61
Tabla 18: Tabla precios aproximados en euros, Junio 2024.....	62

1. Resumen

Este trabajo se centra en el uso de sensores de cartografía diseñados para drones. En concreto nos centraremos en sensores que tengan integrado una cámara y un láser escáner. En este trabajo final de máster veremos las mejores prácticas para la adquisición de datos y procesado, para estos sensores. Luego mostraremos una comparativa técnica de dos sensores, uno de gama baja y otro de gama alta.

En este contexto los nuevos drones y sistemas integrados hacen que sea relativamente accesibles. El precio actual por ejemplo de una solución con el DJI L2, está por menos de 30.000€ (dron + sensor + estación base + software), y combina estas dos tecnologías, LiDAR y fotogrametría. Esto hace que más profesionales empiecen a trabajar con esta tecnología, pero no siempre de la manera más eficaz. Pero la forma clásica de trabajar con este tipo de sensores es planificar y procesar de forma separada las 2 tecnologías, cuando al tener un sensor de doble integración, se debería hacer todo junto.

El resultado será un informe técnico sobre los dos sensores elegidos. Mostrando de manera empírica las diferencias, en qué condiciones cada sensor es mejor, y los resultados esperados para cada tipo de trabajo. También se adjuntarán en el anexo las ortofotos, nubes de puntos LiDAR e informes de calidad.

This work focuses on the use of mapping sensors designed for drones. Specifically, we will focus on sensors that integrate both a camera and a laser scanner. In this project, we will see best practices for data acquisition and processing for these sensors. Then, we will present a technical comparison of two sensors, one low-end and one high-end. In this context, new drones and integrated systems make them relatively accessible. For example, the current price for a solution with the DJI L2 is under €30,000 (drone + sensor + base station + software), and combines both technologies, LiDAR and photogrammetry. This makes more professionals start working with this technology, but not always in the most effective way. However, the classic way of working with these types of sensors is to plan and process the two technologies separately, when having a dual integration sensor, everything should be done together. The result will be a technical report on the two chosen sensors, showing empirically the differences, under what conditions each sensor is better, and the expected results for each type of job. Orthophotos, LiDAR point clouds, and quality reports will also be attached in the appendix.

2. Introducción

El proyecto está enmarcado en un proyecto hecho con diferentes equipos en la ciudad de Weibern al oeste de Alemania por la empresa Geocue. La zona de interés es una pequeña parcela que contiene con una morfología variada. En ella vemos edificios, arboles, carretera, y un desnivel.



Figura 1: Zona de vuelo

El proyecto total consta de más de 15 vuelos, entre todos los sensores. Todos ellos se efectuaron el 23 de abril del 2024.

En la zona se volaron diferentes sensores a diferentes alturas. Los sensores que se usaron fueron:

- DJI L2
- DJI P1
- DJI M3E
- True View 540

Cada sensor se voló 3 veces:

- 60 metros de altura y velocidad de 6 m/s
- 120 metros de altura y velocidad de 6m/s
- 120 metros de altura y velocidad de 12m/s.

No toda esta información será usada en este trabajo final de máster, ya que nos centraremos en 2 sensores. El DJI L2 y el TV540, uno representa la gama baja y el otro la gama alta de LiDAR.

Desde este momento cuando hablemos de equipo o proyecto, nos centraremos únicamente en los datos recogidos por estos sensores, el DJI L2 y el TV540.

2.1.Contexto

En los últimos diez años, la topografía ha experimentado una revolución tecnológica con la introducción de drones. Este equipo ha hecho que tecnologías como LiDAR o fotogrametría, puedan ser usadas por más usuarios, ya que la barrera de entrada se ha reducido considerablemente, pudiendo usar esta tecnología por menos de 30.000 euros. Por dar contexto, el coste de empezar a trabajar con LiDAR aéreo, es decir un sistema LiDAR montado en un avión, puede rondar el millón de euros.

En este contexto, el trabajo intenta crear una guía que nuevos usuarios puedan seguir para optimizar el uso de la tecnología, y evitar malas prácticas.

También hay que tener en cuenta que este trabajo final de máster esta encuadrado en una temática de la geomática aplicada con lo que el trabajo es la realización de lo aprendido en diversas asignaturas. A mencionar:

- Cámaras, y laser y radar, se usaron como base teórica para el entendimiento de las tecnologías. También sentó las bases del entendimiento de los resultados obtenidos con cada tecnología.
- Posicionamiento y navegación, y sensores híbridos, se puso en práctica el cómo procesar una trayectoria y el entendimiento de un informe de calidad de ella.
- Procesamiento avanzado de imágenes, y procesamiento y gestión de datos laser, en estas asignaturas no basamos para ver el procesamiento de los datos LiDAR, y el proceso fotogramétrico.
- Además, en el máster se revisaron vieron conceptos como los informes de calidad y precisión de los diferentes productos cartográficos, así como recomendaciones para la toma de datos y su gestión.

2.2.Objetivos del trabajo

El presente trabajo tiene como objetivo explicar cuáles son las mejores prácticas para el uso de estos sensores en la topografía y la razón detrás de cada recomendación. Se abordarán aspectos esenciales como la planificación de vuelos, la calibración de sensores, la correcta interpretación de los datos obtenidos y metodología en el procesamiento.

Es decir, el objetivo principal de este trabajo es:

1. Crear una guía con recomendaciones para la captura de datos con LiDAR y fotogrametría.
2. Mostrar cómo usar estas recomendaciones influyen en un dataset.

Objetivos secundarios:

1. Comparar dos sensores, uno de gama baja y otro de gama alta.
2. Mostrar como influyen las recomendaciones en cada sensor.
3. Añadir valores numéricos a las recomendaciones según el sensor.

4. Crear una guía explicando en que situaciones es mejor el uso de un sensor u otro.

Para conseguir estos objetivos necesitaremos superar:

- Identificación de las mejores prácticas usadas en sensores con LiDAR y fotogrametría en UAV
- Toma de datos de un vuelo con UAV
- Procesado de los datos del vuelo
- Comparación de los resultados obtenidos, con las prácticas recomendadas para planificación de vuelo y procesamiento

Al proporcionar una guía detallada sobre el uso de drones, LiDAR y fotogrametría, este trabajo busca contribuir a la profesionalización del uso de estas tecnologías, especialmente con nuevos usuarios, minimizando errores, optimizando la toma de datos y mejorando la calidad de los resultados obtenidos.

Por último, el trabajo también tiene como objetivo mostrar la diferencia entre sensores de gama baja y alta, viendo como de importantes son las recomendaciones dadas, y en qué condiciones afectaran más a nuestros datos.

2.3.Estado del arte

En esta sección veremos el contexto en el que se encuentra nuestro trabajo. Para ello revisaremos el trabajo científico hecho sobre el tema y veremos donde debemos enmarcar nuestra investigación.

Los temas principales de la investigación son:

- Uso de LiDAR y fotogrametría con UAVs
- Uso de la tecnología de orientación directa en UAVs
- Recomendaciones para el uso de LiDAR y fotogrametría

En este contexto analizaremos diversos autores y mostraremos que pretendemos añadir con este trabajo a la investigación científica.

Las tecnologías que vamos a trabajar son el LiDAR y la fotogrametría aérea, estas dos tecnologías son muy maduras, y se puede encontrar una amplia bibliografía sobre su uso, ya sea en planificación, toma o procesamiento de datos. Por ejemplo, en fotogrametría, los solapes clásicos mínimos son 60% frontal y 30% lateral (García, 2002). De la misma forma se puede encontrar una amplia documentación sobre el LiDAR aéreo.

Aquí podemos ver, que muchas de las prácticas en fotogrametría y LiDAR aéreas, se comparten con los drones, pero estos tienen sus propias variaciones, por ejemplo, los solapes mínimos en fotogrametría con drones van desde 80x80 (frontal x lateral) a 80x40 según la tecnología de georreferenciación usada (Mostafa, 2017).

Esto nos vislumbrar que mientras que no hay contradicciones por el cambio de plataforma, sí que hay variaciones.

También podemos encontrar las mejores prácticas en el uso individual en UAV, como, por ejemplo, la recopilación de prácticas deseadas en el uso de fotogrametría y LiDAR (Nex, 2022), Este artículo, no nos indica valores específicos para alguna de estas, por ejemplo, se indica como planear un vuelo con solape lateral, pero no el solape que se necesita. También habla de cómo usar tecnologías como el PPK sin IMU o la orientación directa “direct georeferencing”, pero no como cambia la planificación de vuelo, según tecnologías.

Otros autores, hablan de las ventajas del uso de UAV para la fotogrametría, y como esta se debe implementar en estudios de geomática (Raid, 2015), el autor demuestra la calidad de los productos que se pueden obtener y su rápida adopción por los profesionales de la geomática. Hay que mencionar, que nuestro master se incluye la topografía con drones.

También podemos encontrar artículos con usos específicos de drones, como el uso de la fotogrametría con drones en el estudio de playas de arena. Este artículo me parece muy interesante, ya que muestra un caso práctico, con valores usado como solapes del 80x60 o superiores, y conclusiones de que practicas le funcionaron mejor que otras (Casella, 2020).

En esta línea también podemos ver un ejemplo del uso del LiDAR .Por ejemplo, cómo usar un sensor LiDAR montado en UAV para la gestión forestal, en este artículo se muestran datos,

como la densidad de puntos mínima para la identificación de un árbol, la importancia de la penetración del LiDAR o la planificación del vuelo (Corte, 2020).

Viendo esta bibliografía, se ve que hay espacio para desarrollar una investigación buscando impulsar las dos tecnologías juntas, es decir mejores prácticas para LiDAR y fotogrametría, ya que estas dos tecnologías pueden llegar a contradecirse con los parámetros de vuelo. Por ejemplo, el LiDAR está limitado por su rango, pero la fotogrametría no (está limitada por su resolución), esto quiere decir que, para valores como altura de vuelo, deberíamos siempre priorizar los requisitos del LiDAR al de la fotogrametría, siempre que los requisitos de un proyecto sean cumplidos (Alsadik, 2020).

Todos estos autores, nos muestran que mientras que, la información de cómo usar tecnologías de forma individual es extensa, y sobre todo en fotogrametría con drones. Pero el uso de tecnologías combinadas, y la asignación de valores concretos para sensores altamente extendidos como el DJI L2, no es común. Lo que nos permite crear un marco en el que desarrollar la siguiente investigación.

3. Equipo de campo y software

En esta sección veremos todo el equipo que se ha utilizado en el proyecto. Dividiremos el equipo usado, entre equipo de campo y software de procesamiento.

El equipo de campo es el equipamiento que se utilizó durante la toma de datos. Estos fueron usados por un piloto de RPAS certificado por Alemania.

3.1. Dron

El dron usado es el DJI Matrice 350, o M350. Este dron se usó en todos los vuelos con el DJI L2 y el TV540.

Características generales del dron (DJI Enterprise, 2024).

- Dron con 4 hélices, cuadricóptero de despegue vertical
- Hélices con forma de X, mayor estabilidad.
- Carcasa de fibra de carbono y plástico, resistente y ligero.
- Control remoto, mando con Tablet integrada.
- Tiempo de vuelo máximo sin carga útil: 55 minutos
- Tiempo de vuelo máximo con carga útil de 2kg: 31 minutos
- Peso con batería: 3.7kg
- Peso máximo de carga útil: 2.7kg



Figura 2: DJI M350 con el sensor TV540

3.2. Sensores LiDAR

Los dos sensores usados son el DJI Zenmuse L2 y el True View 540. Cada uno de los sensores tiene 3 partes principales:

- Cámara

- Laser escáner
- Sensor de georreferenciación (receptor GNSS, IMU y antena)

En la siguiente tabla compararemos las especificaciones de los sensores

Tabla 1: Comparativa sensores LiDAR (Geocue, 2024) & (DJI Enterprise, 2024)

	Zenmuse L2	True View 540	Unidades
Toma de datos	LiDAR + fotos	LiDAR + fotos	
Laser escáner	N/A	CHCNAV	
Sensor de georreferenciación	N/A	CHC	
Cámara	20	45	megapíxeles
Campo visual cámara	84	81	grados
Numero de haces	1	1	
Longitud de onda	905	1535	nm
Ecos del LiDAR	5	8	
Rango del LiDAR	250m 10% reflectividad en oscuridad	400m 20% de reflectividad	*Diferente reflectividad y luminosidad
PRR	240	500	kHz
Campo visual laser	72	75	grados
Peso	0.9	1.9	kg
Divergencia del laser	1.2x0.4	0.66x0.66	mrad 1/e^2
Forma del patrón LiDAR	∞	S	



Figura 3: Sensor True View 540



Figura 4: Sensor DJI L2

Un comentario general al revisar las especificaciones de los sensores LiDAR, es que hay que tener cuidado con los valores dados por empresas nuevas en el mundo del LiDAR, principalmente empresas que no están centradas en el mundo de la topografía. Estas tienden a dar información confusa para usuarios inexpertos.

Por ejemplo, al revisar la tabla de especificaciones del DJI L2 vemos algunos problemas:

1. El número de puntos por segundo se multiplica por 5 al considerar que un haz laser con 5 ecos tiene el potencial de llegar a medir 5 puntos.
2. El rango del LiDAR no se da en condiciones típicas de vuelo.
 - a. Se muestra en condiciones de oscuridad, cuando es raro volar de noche.
 - b. Se muestra materiales de mucha reflectancia $>50\%$, es decir que el asfalto, la tierra o la vegetación no serían captadas.
3. La divergencia del láser se da para $mrad\ 1/e$ en vez del tradicional $1/e^2$. Esto hace que el error parezca más pequeño que lo que realmente es.

3.3. Software

Para este proyecto se usarán diferentes softwares:

- Pilot 2, planificador de vuelo para el DJI L2 y TV540
- LP360 Drone, procesamiento de los datos del TV540 y DJI L2

4. Toma de datos

La toma de datos se realizó el día 24 de abril del 2024. Se uso el equipo descrito en la sección anterior.

4.1. Área de vuelo

La zona de vuelo esta al norte de la ciudad de Weibern. Zona de fácil acceso en coche, y que combina diferentes materiales y morfologías. A mencionar: edificios, asfalto, árboles y tierra. Al igual que varios desniveles.



Figura 5: Área de vuelo. Con puntos de apoyo marcados.

El sistema de coordenadas elegido fue ETRS89 UTM 32N, con altura ortométrica DHDN2016. La elección de este CRS (“coordinate reference system”), es para mantener homogeneidad con los puntos de apoyo establecidos, y también porque es el sistema usado en esta zona de Alemania, DHDN2016 es además la última iteración del geoide alemán, lo que lo hace más preciso que otros geoides.

Clarificar que este sistema de coordenadas fue usado en todo el proyecto, es decir, en la toma de puntos de apoyo, en el procesamiento de la trayectoria, en la orientación externa, en la generación de nubes de puntos, y en la ortofoto.

4.2. Planificación de vuelos

En esta sección explicare el razonamiento para la planificación de vuelo realizada. Los parámetros usados para cada vuelo se explican en la sección siguiente.

Elección de la plataforma

En nuestro caso el estudio se hace sobre drones, así que la plataforma elegida es un dron. El modelo a elegir es un dron que sea compatible con los sensores DJI L2 y TV540. Mencionar que las especificaciones del dron están explicadas en el apartado anterior.

Elección del sensor

El trabajo se centra en sensores que integren tecnología LiDAR y fotogrametría en un mismo sistema. Esto quiere decir que queremos un sensor compacto, que integre los sensores:

- Cámara, para poder luego efectuar fotogrametría
- Laser escáner, para la tecnología LiDAR
- Sensor de georreferenciación, en este caso compacto con un receptor GNSS, IMU y antena. Este se usa para poder georreferenciar las fotos con tecnología de orientación directa (“DG”) y para poder georreferenciar la nube de puntos LiDAR

Con estos 3 puntos en mente, elegiremos trabajar con el sensor DJI L2 y TV540.

Las especificaciones de estos sensores están descritas en el apartado anterior.

Tipo de vuelo

El tipo de vuelo es un vuelo de tipo área, con múltiples líneas paralelas. Este vuelo además se hizo con forma de cruz o cruzado, es decir que se voló de Este a Oeste y luego de Norte a Sur.

Esta elección se hizo para poder procesar los datos con más libertad. Es decir, se puede procesar el vuelo de formas distintas, varios ejemplos que se podrían aplicar:

- Comparar el vuelo cruzado (E-O + N-S) al vuelo E-O y luego al vuelo N-S
- Comparar el vuelo E-O al mismo vuelo, pero con una línea perpendicular

En este proyecto no analizaremos todas las posibles combinaciones, durante el procesado se usará las líneas de vuelo E-O más una perpendicular en el centro del vuelo.

Solape

Al intentar hacer una comparativa entre sensores, los vuelos se harán con el mismo solape lateral teniendo en cuenta el solape mínimo en fotogrametría y en LiDAR.

Esto resulta en un solape lateral en LiDAR del 35%, y en cámara varía según el sensor, ya que las cámaras tienen campos visuales diferentes.

El problema que veremos es que el terreno tiene un gran desnivel, esto quiere decir que en la parte superior del terreno el solape disminuye.

Altura de vuelo

Se usaron 2 alturas de vuelo diferentes para cada sensor, una a 60 metros y otra a 120 metros. Esto se hizo para ver qué diferencias obtenemos al usar 2 sensores con características diferentes dentro del rango del LiDAR. Principalmente veremos 2 diferencias:

- La resolución, ya sea mediante el tamaño de identificación de objetos en la nube de puntos, o el GSD en fotogrametría. Esto varía según la altura de vuelo.
- La potencia con la que el sensor es capaz de penetrar la vegetación.

Otras diferencias que se verán será la densidad de puntos, grosor de la nube de puntos, tiempo de vuelo o precisión.

Por último, mencionar, que la altura de vuelo elegida es vuelo constante a altura de nivel del mar, es decir que la altura elegida se mantiene durante todo el vuelo, y no varía según la morfología. Esto será un problema principalmente para los vuelos a 60 metros, ya que el terreno no es llano.

Como referencia se espera obtener un GSD en foto:

- L2: 2 cm a 60m y 4cm a 120m
- TV540: 1.2cm a 60m y 2.4 cm a 120m

Velocidad

La velocidad tiene un papel clave en la adquisición de datos. En este proyecto usamos 2 velocidades aceptadas por el dron:

- 6 metros por segundo, velocidad muy usada para vuelos superiores a 50 metros. Los sistemas LiDAR usados, trabajan muy bien a esta velocidad. He son capaces de generar una trayectoria de buena calidad, con una buena solución para el procesamiento del GNSS y el IMU.
- 12 metros por segundo, solo para los vuelos a 120 metros. Esta velocidad es muy elevada para trabajos de topografía con LiDAR y dron. La vibración aumenta considerablemente en drones, lo que afecta directamente a la trayectoria. Aquí veremos la importancia del sensor de georeferenciación.

Optimización de la ruta del dron

Este proyecto intentara responder a esta pregunta. Aun así, se puede ver que el vuelo no está optimizado. Ya que un vuelo cruzado no es lo óptimo para este proyecto como veremos en las conclusiones.

El tiempo de vuelo varía entre vuelos y sensores, de 34 a 12 minutos. A priori la duración del vuelo tendría que ser:

- 60m 6ms: 1x
- 120m 6ms: 0.5x
- 120m 12ms: 0.25x

Es decir, a mayor velocidad y altura, el vuelo tendría que ser más corto. Pero eso no se traduce 1 a 1 con la realidad. Ya que los pilotos también invierten tiempo en el despegue, aterrizaje, maniobras de inicialización del IMU.

4.3. Vuelos topográficos

Se realizaron diversos vuelos durante el proyecto, pero nosotros nos centraremos en 6 vuelos. 3 del DJI L2 y 3 del TV540. Hay que mencionar que se intentaron realizar los vuelos lo más parecidos posibles, sin embargo, hay una limitación generada por el programa de planificación de vuelo y por el solape.

Para simplificar la nomenclatura de los vuelos, los llamaremos siguiendo el siguiente patrón, Sensor_Altura_Velocidad. Así nos quedan 6 vuelos:

- L2 60m 6ms
- L2 120m 6ms
- L2 120m 12ms
- TV540 60m 6ms
- TV540 120m 6ms
- TV540 120m 12ms

4.3.1. Parámetros de vuelo DJI L2

3 vuelos se realizaron con el DJI L2, 60 metros de altura y 2 a 120 metros de altura.

Tabla 2: Parámetros de vuelo DJI L2

Vuelo	1	2	3	Unidades
Velocidad	6	6	12	m/s
Altura	60	120	120	metros
Tipo de altura	Constante	Constante	Constante	ASL
Líneas de vuelo	9	5	5	
Densidad de puntos	440	220	110	pts/m ²
GSD foto	2	4	4	cm
Solape LiDAR	35%	35%	35%	Solape lateral
Solape RGB	80x48	80x48	80x48	Sol_frontal x Sol_lateral
Modo de trabajo	Repetitivo	Repetitivo	Repetitivo	Uso para topografía
Numero de ecos	5	5	5	

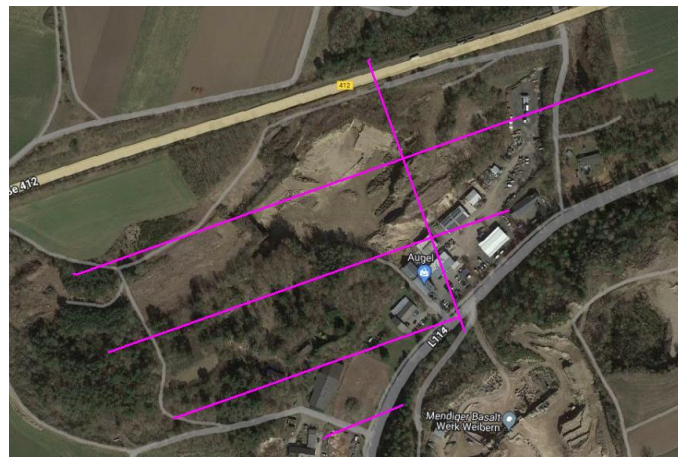


Figura 6: Líneas de vuelo L2 120m 6ms

4.3.2. Parámetros de vuelo TV540

3 vuelos se realizaron con el TV540, 60 metros de altura y 2 a 120 metros de altura

Vuelo	1	2	3	Unidades
Velocidad	6	6	12	m/s
Altura	60	120	120	metros

Tipo de altura	Constante	Constante	Constante	
Líneas de vuelo	6	4	4	
Densidad de puntos	440	220	110	pts/m ²
GSD foto	1.2	2.5	2.5	cm
Solape LiDAR	35%	35%	35%	Solape lateral
Solape RGB	80x48	80x48	80x48	Sol_frontal x Sol_lateral

4.3.3. Puntos de apoyo

Se establecieron 6 puntos de apoyo. 3 de ellos con formar de diana, y 3 con forma de cruz.

Todos fueron medidos con un equipo de GNSS RTK, con una precisión de 2cm en horizontal y 3 en vertical.

No se tiene mucha información del equipo específico usado, ya que los puntos de apoyo fueron establecidos el día de antes por un equipo distinto.



Figura 7: Distribución de los puntos de apoyo

Estos fueron medidos en el sistema de coordenadas ETRS89 UTM 32N y el geoide DHDN2016.

Los puntos 2, 3 y 4 son dianas, estas dianas de un tamaño de 80x80 cm, de color blanco y negro para generar un alto contraste.



Figura 8: Diana vista desde una foto a 60m

los puntos 21, 22, 23 y 24 son cruces pintadas de un tamaño de 40x40cm. Sin embargo, ignoraremos el punto número 22, ya que presenta un error en Z 3 veces superior al resto.



Figura 9: Cruz vista desde una foto a 60m

4.3.4. Resultado

El resultado de la toma de datos es:

- 6 vuelos. 3x L2 y 3x TV540
- 6 puntos de apoyo
- Archivo rinex de la estación base proporcionado por el servicio SAPOS.

Tabla 3: Vista de la trayectoria de los vuelos obtenidos

Sensor	60m 6ms	120m 6ms	120m 12ms
L2			
TV540			

4.4. Datos crudos adquiridos

Después de realizar los vuelos topográficos tendremos los siguientes datos:

4.4.1. DJI L2

- 3 carpetas con los datos crudos
- Contienen:
 - o Los datos LiDAR crudos (formato .LDR)
 - o Los datos de trayectoria crudos
 - o Fotos (formato .JPG)

Name	Date	Type	Size
DJI_202404231147_001_l2lidar01_Timest...	02/05/2024 12:46	MRK File	30 KB
DJI_20240423115409_0001_D.RPT	02/05/2024 12:46	RPT File	163 KB
DJI_20240423115512_0002_L.CLIC	02/05/2024 12:46	CLC File	1 KB
DJI_20240423115512_0002_L.CLI	02/05/2024 12:46	CLI File	1 KB
DJI_20240423115512_0002_L.DBG	02/05/2024 12:46	DBG File	754,936 KB
DJI_20240423115512_0002_L.IMU	02/05/2024 12:46	IMU File	7,133 KB
DJI_20240423115512_0002_L.LDR	02/05/2024 12:46	LDR File	2,344,337 KB
DJI_20240423115512_0002_L.LDRT	02/05/2024 12:48	LDRT File	451,165 KB
DJI_20240423115512_0002_L.OBS	08/05/2024 13:10	OBS File	822,976 KB
DJI_20240423115512_0002_L.RPOS	02/05/2024 12:48	RPOS File	23,309 KB
DJI_20240423115512_0002_L.RTB.sav	02/05/2024 12:48	SAV File	760 KB
DJI_20240423115512_0002_L.RTK	02/05/2024 12:48	RTK File	3,601 KB
DJI_20240423115512_0002_L.RTL	02/05/2024 12:48	RTL File	823 KB
DJI_20240423115512_0002_L.RTS	02/05/2024 12:48	RTS File	564 KB
DJI_20240423115512_0002_L.SIG	02/05/2024 12:48	SIG File	4 KB
DJI_20240423115513_0003_D.JPG	23/04/2024 11:55	JPG File	7,220 KB
DJI_20240423115518_0004_D.JPG	23/04/2024 11:55	JPG File	7,072 KB
DJI_20240423115521_0005_D.JPG	23/04/2024 11:55	JPG File	6,772 KB
DJI_20240423115524_0006_D.JPG	23/04/2024 11:55	JPG File	7,308 KB
DJI_20240423115527_0007_D.JPG	23/04/2024 11:55	JPG File	7,952 KB
DJI_20240423115531_0008_D.JPG	23/04/2024 11:55	JPG File	8,324 KB
DJI_20240423115534_0009_D.JPG	23/04/2024 11:55	JPG File	8,740 KB

Figura 10: Datos crudos L2 60m 6ms

4.4.2. TV540

- 3 carpetas con los datos crudos
- Contienen:
 - o Los datos LiDAR crudos (formato .ltp)
 - o Los datos de trayectoria crudos
 - o Fotos (formato .JPG)

Name	Date modified	Type	Size
GPS	02/05/2024 15:41	File folder	
IMG	02/05/2024 15:41	File folder	
SCAN	02/05/2024 15:42	File folder	
TRACE	02/05/2024 15:45	File folder	
20240423_140057_T.kml	02/05/2024 15:51	KML	3 KB
20240423_140057_T.pos	02/05/2024 15:51	POS File	74 KB

Figura 11: Datos crudos TV540 120m 6ms

4.4.3. Estación base

Además, necesitamos una estación base para poder procesar la trayectoria con “post processing kinematic” o PPK. Para ello usaremos una estación virtual generada por el servicio SAPOS. En este punto hay que añadir que se llevó a campo una estación base, pero este dejó de funcionar a mitad del día, con lo que no se pudo usar.

- Archivo Rinex (formato .24o)

Name	Date modified	Type	Size
V705114A.24c	25/04/2024 10:17	24C File	244 KB
V705114A.24g	25/04/2024 10:17	24G File	1,004 KB
V705114A.24j	25/04/2024 10:18	24J File	26 KB
V705114A.24l	25/04/2024 10:17	24L File	839 KB
V705114A.24n	25/04/2024 10:17	24N File	400 KB
V705114A.24o	25/04/2024 10:18	24O File	822,976 KB
V705114A.txt	25/04/2024 10:18	Text Document	1 KB

Figura 12: Resultado de la estación virtual

4.4.4. Rover RTK

Por último, también se obtuvieron las coordenadas de los puntos de apoyo, usando un rover GNSS RTK.

- Archivo de coordenadas de los puntos de apoyo en el sistema de coordenadas ETRS89 UTM 32N geoide DHDN2016 (formato .txt).

Tabla 4: Puntos de apoyo

ID	X	Y	Z	Type	H_offset
4	368836.529	5586357.238	428.694	FK	0
3	368824.675	5586366.913	428.487	FK	0
2	368807.239	5586351.693	428.483	FK	0

21	368753.244	5586176.028	424.639	FK	0
22	368971.557	5586562.671	439.699	FK	0
23	368763.221	5586509.431	457.553	FK	0
24	368817.799	5586342.145	428.601	FK	0

5. Metodología desarrollada

En esta sección veremos cómo se planificaron y procesaron los diferentes vuelos. Se explicará en detalle 1 vuelo de cada sensor. Y el resto simplemente se mostrará el resultado.

Clarificar que en este punto simplemente veremos cómo se usa el software, pero no veremos las razones por las que lo planificamos así. Esto se verá en el siguiente punto donde explicaremos como en detalle como planificar y procesar. Es decir, esta sección es uno de los pasos realizados, no una explicación de ellos.

Primero veremos en DJI Pilot 2 como planificar un vuelo para el DJI L2 y luego para el TV540.

A continuación, veremos cómo se procesa la trayectoria, la generación de la orientación externa, la generación de la nube de puntos LiDAR, la generación de la ortofoto y del MDS.

Los softwares que usaremos son:

- DJI Pilot 2, como planificador de vuelo.
- LP360 Drone, procesamiento de datos, generación de resultados

5.1. Planificación de vuelo en DJI Pilot 2

El DJI M350 usa el software DJI Pilot 2 para el control del dron en vuelo, este software también es usado para planificar un vuelo.

5.1.1. Planificación de vuelo DJI L2

1. Abrir DJI Pilot 2
2. Seleccionar “Crear una ruta”
3. Seleccionar “Ruta de área”
4. Hacer zoom en el área de interés.
5. Generar un polígono en la zona que se desea volar
6. Elegir la plataforma, en este caso M350
7. Elegir el sensor, Zenmuse L2
8. Seleccionar los parámetros de vuelo (velocidad, altura y solape lateral)
9. Guardar la misión

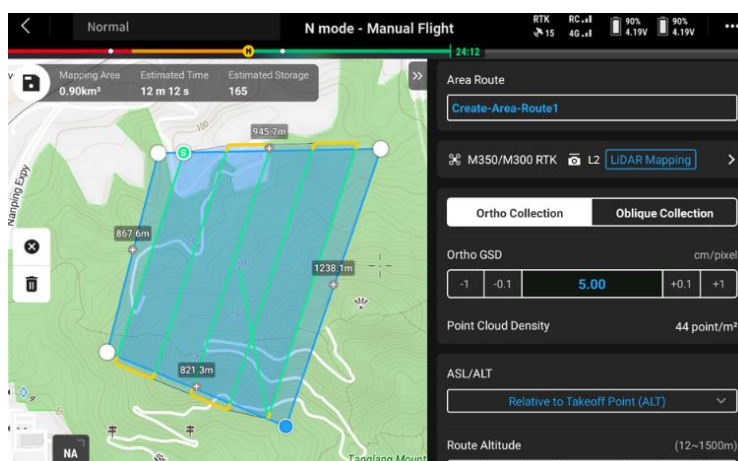


Figura 13: DJI Pilot 2 (DJI Enterprise, 2023)

5.1.2. Planificación de vuelo TV540

1. Abrir DJI Pilot 2
2. Seleccionar “Crear una ruta”
3. Seleccionar “Ruta de área”

- Hacer zoom en el área de interés.
- Generar un polígono en la zona que se desea volar
- Elegir la plataforma, en este caso M350
- Elegir el sensor, Camera custom

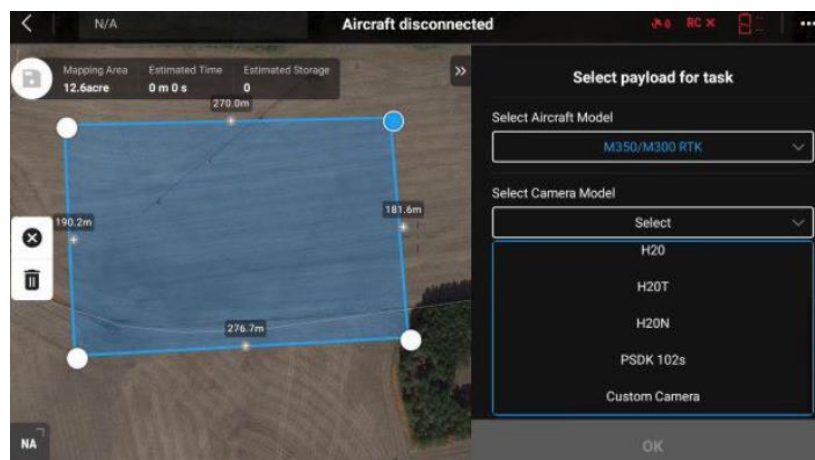


Figura 14: Selección camera custom

- Añadir una cámara con 75 grados de campo visual

FOV (degrees)	Photo Size		Sensor Size		Focal Length	Min. Interval
	Width	Height	Width	Height		
60	1540px	1540px	5.78mm	5.78mm	5.0mm	2secs
75 (TV540)	2047px	2047px	7.68mm	7.68mm	5.0mm	2secs
80 (recommended)	2238px	2238px	8.39mm	8.39mm	5.0mm	2secs
100	3178px	3178px	11.92mm	11.92mm	5.0mm	2secs

Figura 15: Cámaras con diferentes campos visuales (Geocue, 2024)

- Seleccionar los parámetros de vuelo (velocidad, altura y solape lateral)

5.2. Procesamiento de los vuelos

La metodología de procesamiento es la utilizada durante el máster.

Planeamos la misión → Toma de datos → Procesamiento de trayectoria → Georreferenciación fotos y nube de puntos → Corrección y ajuste → Segmentación → Generación de productos cartográficos.

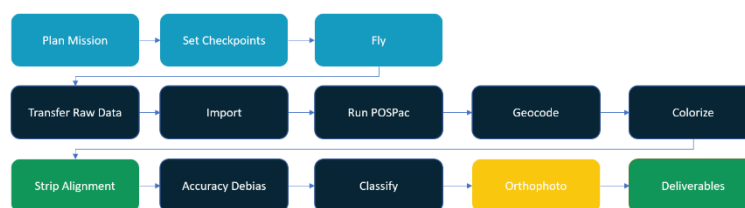


Figura 16: Procesamiento en LP360 sensores LiDAR (LP360, 2024)

Explicando brevemente cada componente del gráfico, la recomendación que dan es:

- Planificar y tomar datos en campo (3 pasos en azul de la figura anterior)
- Copiar los datos crudos al ordenador
- Importar los datos en LP360
- Run POSpac → En nuestro caso es hacer el procesamiento de la trayectoria
- Geocode → Georreferenciar nube de puntos y fotos
- Colorizar la nube de puntos
- Strip Alignment, esta herramienta nos permite corregir cualquier desajuste entre líneas de vuelo

8. Comparar la nube de puntos con los puntos de chequeo. Y aplicar si es necesario alguna corrección de tipo desviación o “debias” (error constante en tamaño y dirección en todos los puntos de chequeo).
9. Clasificación y extracción de elementos.
10. Generación de la ortofoto
11. Generación de productos cartográficos

En general se puede dividir el proceso en:

1. Procesamiento de la trayectoria → Si este es bueno, continua sino analiza el problema
2. Genera la nube de puntos y georreferenciar las fotos
3. Analiza como de buena ha sido la generación de la nube de puntos y corrígela → Ajuste de líneas de vuelo y comparación de la nube de puntos a los puntos de chequeo.
4. Una vez la nube de puntos esta corregida → Extrae información sobre ella, y segméntala.
5. Genera la ortofoto → Ya sea usando la nube de puntos LiDAR, el MDE (con edificios + terreno), o el proceso puro fotogramétrico
6. Genera los productos cartográficos finales
7. Control de calidad de los productos cartográficos finales

A continuación, veremos paso a paso el procesamiento del DJI L2 y el TV540.

5.3. Procesado del DJI L2 en LP360 Drone

En esta sección veremos cómo se procesaron los vuelos del DJI L2. Todos los datos se procesaron con el software LP360 Drone, sin pasar por el programa de DJI Terra.

5.3.1. Importar los datos crudos a LP360

1. Abrir el programa LP360 Drone v2024.2.16
2. Seleccionar “Import Raw Missions into New Projects...”
3. Seleccionar “Raw L1/L2”

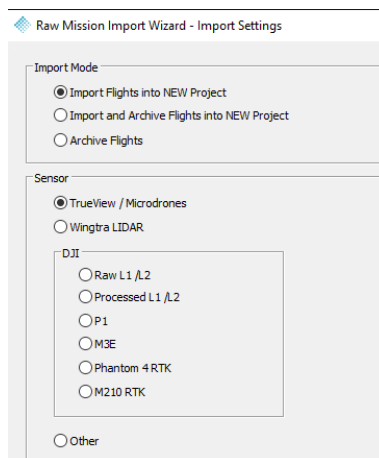


Figura 17: Raw Mission - LP360

4. A continuación “Add Flight” y seleccionaremos todos 3 vuelos a procesar.
5. Le damos a “Base observation files“ y seleccionamos nuestro archivo rinex de la estación base
6. Seleccionamos “PPK” como modo de procesamiento
7. Añadimos las coordenadas de la estación base
8. Repetimos los últimos 2 pasos en los otros 2 vuelos
9. Le damos a “Next”
10. Seleccionamos la carpeta donde queremos guardar el proyecto
11. Seleccionamos el nombre del proyecto
12. Seleccionamos el sistema de coordenadas. En este caso “ETRS89 UTM32N” y geoide DHHN2016

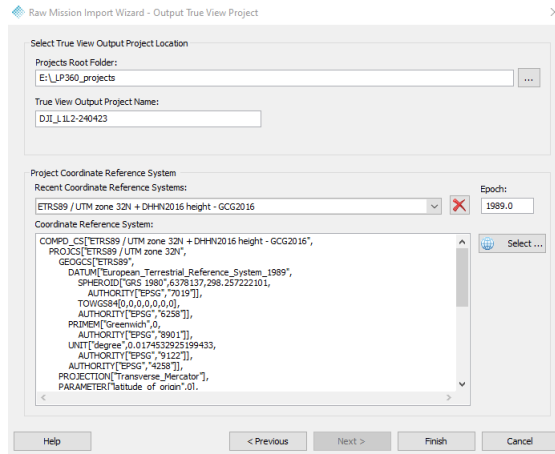


Figura 18: Import wizard - LP360

13. Le damos a “Next”

14. Tenemos los vuelos importados a LP360

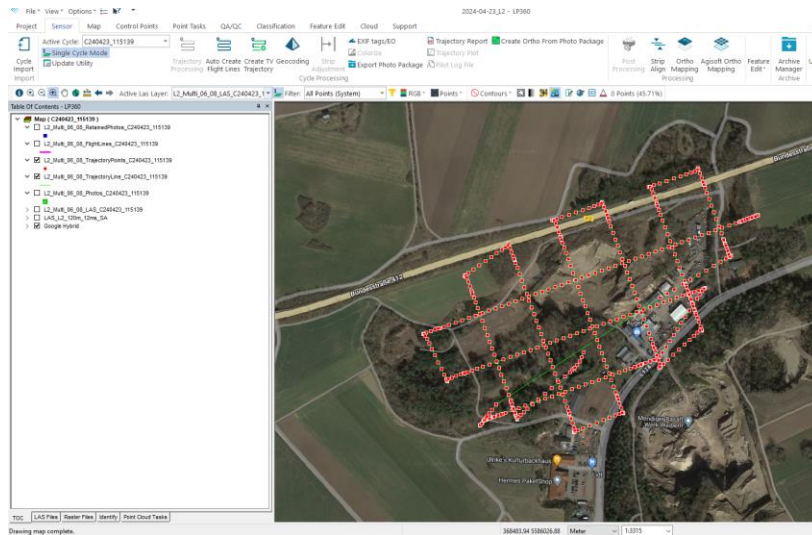


Figura 19: Vuelo importado DJI L2

5.3.2. Procesamiento de la trayectoria

El siguiente paso es procesar la trayectoria. Para ello cogemos la trayectoria cruda del DJI L2 y la procesaremos mediante PPK usando la estación base.

1. Pestaña “Sensor”
2. Seleccionaremos “Trajectory Processing”
3. A continuación, nos aparece una lista con el resumen del procesamiento seleccionado. En este caso es:
 - a. Mode: PPK
 - b. PPK base station: V705114A.24o (archivo rinex)
 - c. Reference Mark: 2024-04-23 (coordenadas de la estación base)
4. Apretamos “Submit Job(s).”

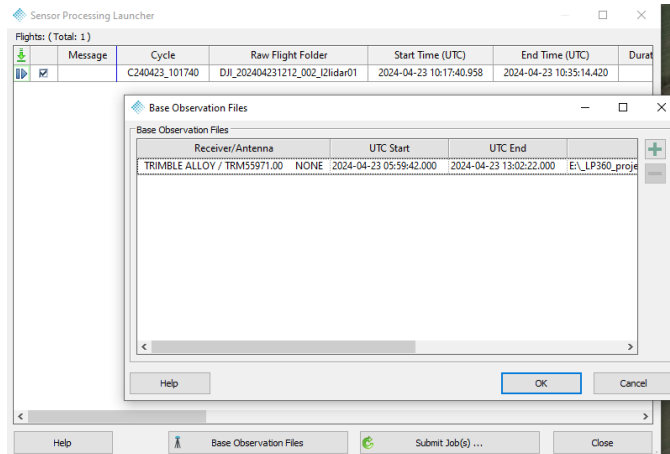


Figura 20: Trajectory Processing DJI L2

- Esperaremos a que el procesamiento termine. Este aparece en la sección “Job Manager”
- Una vez termina el procesamiento le daremos a “Complete job” en el “Job Manager”

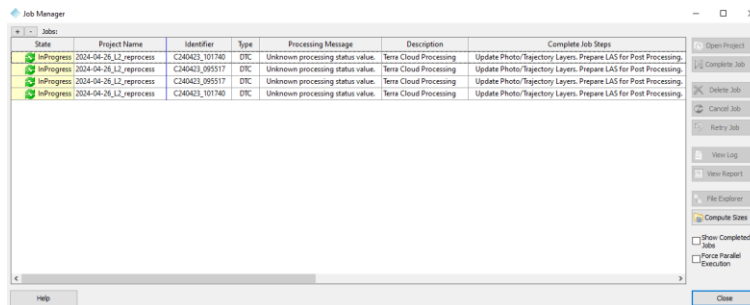


Figura 21: Vista del Job Manager

5.3.3. Creación de las líneas de vuelo

Es esta sección veremos cómo crear las líneas de vuelo

- Pestaña sensor
- Seleccionaremos “Auto Create Flight Lines”
- Mediremos la línea de vuelo más corta usando la herramienta “Measure”
- En “Min Length” pondremos el valor medido en metros
- En “Turn Radius” pondremos 0 metros
- En “Max Deviation” pondremos 5 metros
- Le damos a “Next”

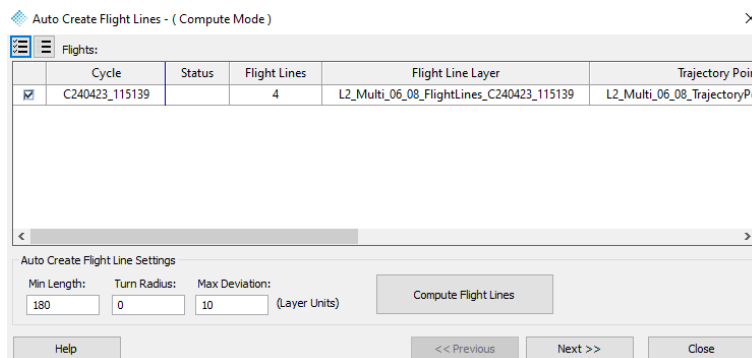


Figura 22: Auto Create Flight Lines

- Esto nos ha generado todas las líneas de vuelo, nosotros solo queremos una del vuelo cruzado, así que seleccionaremos todas las líneas de vuelo que no queremos y las borraremos.



Figura 23: Líneas de vuelo generadas en color morado

5.3.4. Georreferenciación de las fotos

En este paso seleccionaremos las fotos que queremos usar, las georreferenciaremos escribiendo la información en el “EXIF” de las fotos. Después de este paso la orientación externa también ha sido generada.

1. Pestaña “Sensor”
2. Presionamos “Create TV Trajectory”
3. Seleccionaremos solo las fotos “Retain Photos within Flight Lines”. Esto seleccionara solo las fotos que se encuentran contenidas dentro de las líneas de vuelo. Ignorando el resto.
4. Seleccionamos “update photo EXIF Tags with True Pose information”
5. Presionamos “Create Trajectories”
6. En este punto hemos georreferenciado las fotos, y seleccionado solo aquellas que nos interesan para el proyecto.



Figura 24: Fotos georreferenciadas

5.3.5. Generación de la nube de puntos LiDAR

En este paso generaremos la nube de puntos LiDAR o georreferenciación de la nube de puntos.

1. Pestaña “Sensor”
2. Seleccionaremos “Geocoding”

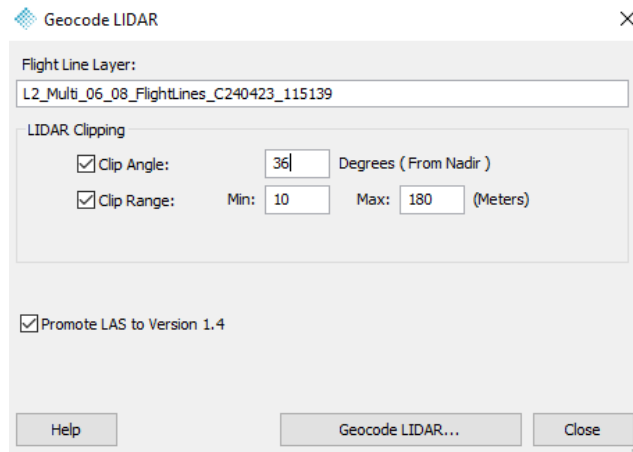


Figura 25: Geocoding

3. A continuación, seleccionamos el “clip angle” que es el 50% del campo visual. Como el L2 tiene un campo visual de 72 grados, nosotros seleccionaremos 36 grados.
4. A continuación, seleccionamos el filtro de generación de puntos, “Clip Range” como mínimo seleccionamos 10 metros y máximo seleccionaremos un valor un 50% superior a la altura de vuelo. En este caso 90m para los vuelos a 60m y 180m para los vuelos a 120m.
5. Presionamos “Geocode LiDAR” esto nos generara la nube de puntos



Figura 26: Nube de puntos LiDAR

5.3.6. Ajuste de líneas de vuelo

En este paso lo que haremos será corregir el error entre líneas de vuelo. Mas adelante en el trabajo se explicará porque se usa esta herramienta, y los beneficios que tiene.

1. Pestaña “Sensor”
2. Seleccionamos “Strip Align”
3. Seleccionamos el vuelo que queremos ajustar
4. Le damos un nombre a la nube de puntos corregida, en este caso añadiré la terminación SA de “Strip Align” para diferenciar las nubes de puntos.
5. Presionamos “Submit Strip Align Job...”
6. Vemos que la tarea se encuentra en el “Job manager”, una vez termine presionaremos “Complete job”

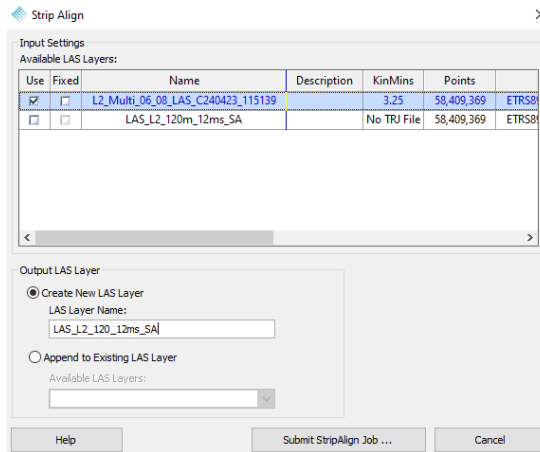


Figura 27: Strip Align

5.3.7. Clasificación del ruido

En este paso clasificaremos todo el ruido que se puede haber generado debajo de la nube de puntos o en el aire.

1. Pestaña “Classification”
2. Seleccionaremos “Outliers”
3. Seleccionamos la nube de puntos de generada por “Strip Align”
4. Seleccionamos:
 - a. “Morphological”
 - b. “Thickness”, 10cm
 - c. “Point Density”, Estimate Points Density
 - d. Damos un nombre, a la nueva nube de puntos
5. Presionamos “Filter Outliers”

5.3.8. Generación de la ortofoto

En esta sección veremos como generar la ortofoto.

1. Pestaña “Sensor”
2. Seleccionamos “Agisoft Ortho Mapping”
3. Seleccionaremos las fotos que queremos usar, en este caso, la capa “RetainPhotos”
4. Seleccionaremos las opciones:
 - a. Procesamiento “Local”
 - b. “Apply a priori EO if BBA Fails”
 - c. “Generate Point Cloud / Ortho from Images”, click on “Generate Ortho”
 - d. *Opcional “Generate Ortho from DEM”, esta opción solo está disponible después de clasificar el suelo y los edificios, y generar un DEM con estos.
5. Le damos un nombre a la ortofoto

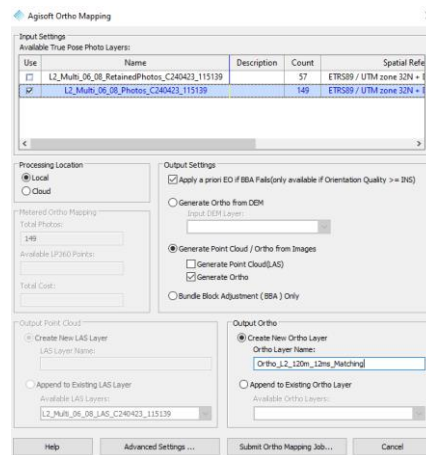


Figura 28: Agisoft Ortho Mapping

6. Presionamos Submit Ortho Mapping Job
7. Esperamos a que la tarea termine en el “Job manager” y le damos a “Complete Job” después.



Figura 29: Ortofoto generada del DJI L2

5.3.9. Medición de los puntos de apoyo

En este paso, primero importaremos los puntos de apoyo. Y luego los compararemos con nuestra nube de puntos.

El primer paso será generar un archivo .txt con la información que necesita LP360. En este caso es:

ID, X, Y, Z, Type, H_offset

“Type” es el tipo de punto de apoyo, si es una diana que puede ser auto detectada seleccionaremos “CB”, si es un punto de chequeo, pero no automático (las cruces) seleccionaremos FK.

H_offset es la distancia que esta el punto del suelo, en nuestro caso todos los puntos están en el suelo, pondremos 0.

1. Pestaña de “Control Points”
2. Presionamos “Import”
3. Seleccionamos el archivo .txt con los puntos de apoyo
4. Seleccionamos un destino para guardar el shapefile

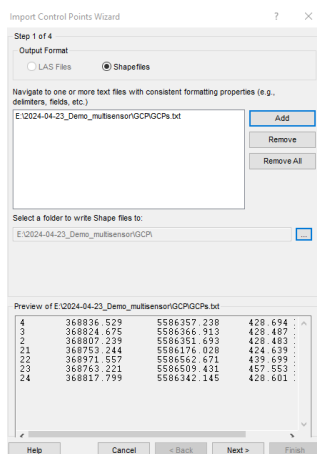


Figura 30: Import Control Points Wizard

5. Seleccionamos que el archivo está delimitado y empieza en la línea 1
6. Seleccionamos que está delimitado por “tab”
7. Unimos cada columna con su significado

8. Presionamos “Next”

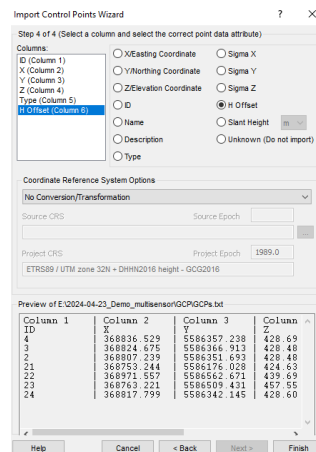


Figura 31: Import Control Points - Asignación

9. Presionamos “Next” para acabar de importar los puntos de apoyo

Medición de los puntos de apoyo en la nube de puntos

Revisa que tengas seleccionada la capa de la nube de puntos deseada y la ortofoto desactivada.

1. Pestaña “Control Points”
2. Seleccionamos “Accuracy Estimation”
3. A continuación, vamos a “Settings”
4. Seleccionaremos en “Settings” el tamaño de un lado de las dianas. En este caso 0.8 metros
5. A continuación, le daremos a “Auto Find”

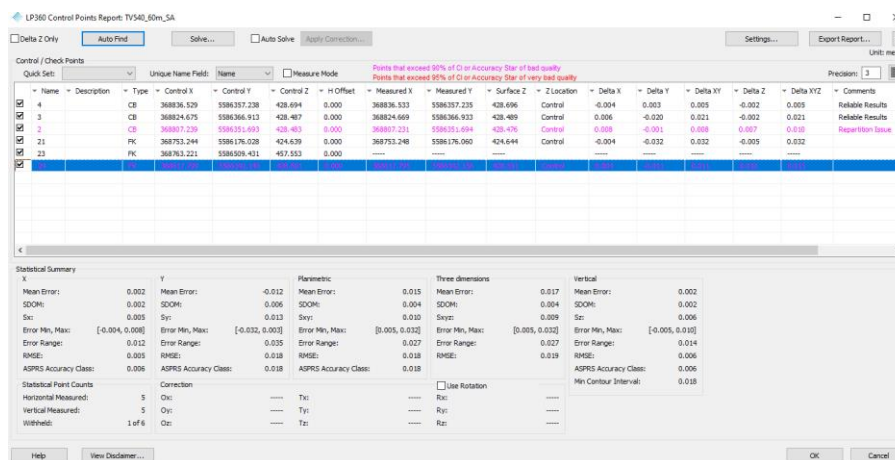


Figura 32: Medición de los puntos de apoyo - Control Points Report

6. Esto genera un informe automático con la medición de las “CB” en los 3 ejes y los “FK” en el eje vertical.
7. Le daremos a “Measure Mode” y corregiremos manualmente algunas mediciones, siempre usando una propiedad nativa del LiDAR, en este caso la intensidad.

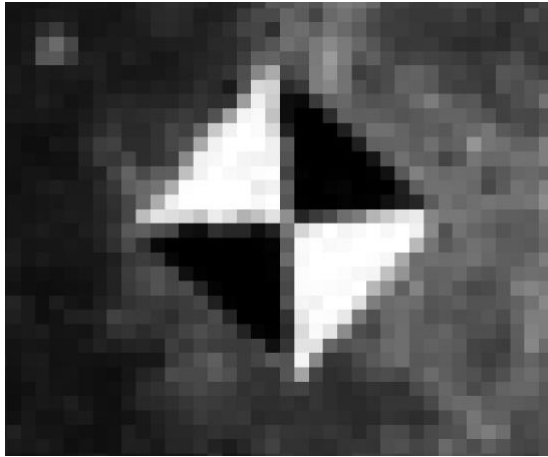


Figura 33: Vista de una diana usando la vista por intensidad

8. Le damos a “Export Report” para exportar el informe

Medición de los puntos de apoyo en la ortofoto

Revisa que tengas desactivada la capa de la nube de puntos y la ortofoto deseada activa.

1. Pestaña “Control Points”
2. Seleccionamos “Accuracy Estimation”
3. A continuación, vamos a “Settings”
4. Le daremos a “Measure Mode” y mediremos manualmente los puntos de apoyo.
5. Se mide en la ortofoto generada, después de cada medición saldrá también el error en Z. Este se ignorará ya que ha sido medido en la nube de puntos LiDAR (a menos que hayamos guardado la nube de puntos matching).



Figura 34: Diana vista en la ortofoto

6. Le damos a “Export Report” para exportar el informe

5.4. Procesamiento del TV540 en LP360 Drone

En esta sección veremos cómo se procesa el TV540 en LP360 Drone, muchos pasos son idénticos al DJI L2 en LP360 Drone, así que simplemente referenciaremos a la sección del L2 para no repetir los pasos realizados.

5.4.1. Importar los datos crudos a LP360

1. Abrir el programa LP360 Drone v2024.2.16
2. Seleccionar “Import Raw Missions into New Projects...”
3. Seleccionar “Trueview / Microdrones”

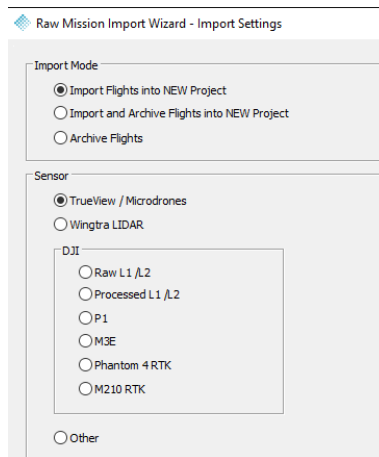


Figura 35: Raw Mission - LP360

4. A continuación “Add Flight” y seleccionaremos todos 3 vuelos a procesar.
5. Presionamos “Next”
6. Añadimos el archivo rinex de la estación base
7. Le damos a “Next”
8. Seleccionamos la carpeta donde queremos guardar el proyecto
9. Seleccionamos el nombre del proyecto
10. Seleccionamos el sistema de coordenadas. En este caso “ETRS89 UTM32N” y geoido DHHN2016
11. Le damos a “Next”
12. Tenemos los vuelos importados a LP360



Figura 36: Vuelo TV540

5.4.2. Procesamiento de la trayectoria

El siguiente paso es procesar la trayectoria. Para ello cogeremos la trayectoria cruda del TV540 y la procesaremos mediante PPK usando la estación base.

1. Pestaña “Sensor”
2. Selecciona “Trajectory Processing”
3. Selecciona “Single Base”, “Local” y “Use All Constellations”

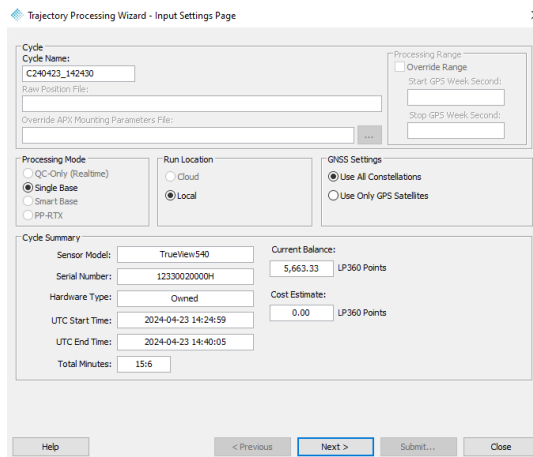


Figura 37: Trajectory Processing TV540

4. Next
5. En la siguiente ventana tenemos que definir nuestra estación base
 - a. Revisa el archivo rinex seleccionado
 - b. Revisa la altura de la antena, como es una base virtual, seleccionamos 0 metros.
 - c. Añade las coordenadas en Latitud, Longitud y Altura elipsoidal de la estación base.
 - d. Selecciona el marco de referencia, datum, época y elipsoide.

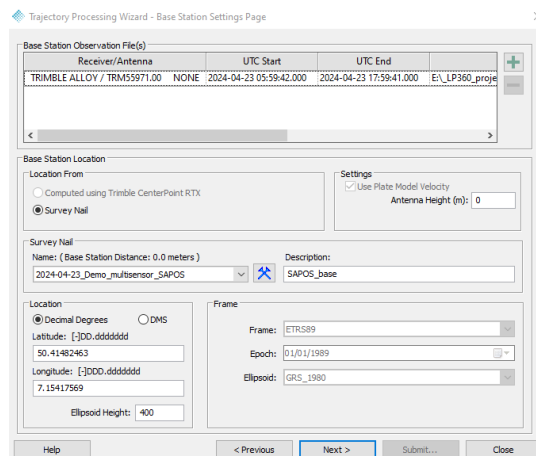


Figura 38: Base station wizard

6. Next, el procesamiento ira al “Job manager” una vez este completado presionaremos “Complete job”

5.4.3. Creación de las líneas de vuelo

Revisar secciona anterior de procesamiento de DJI L2 en LP360 Drone

5.4.4. Generación de la nube de puntos LiDAR y georreferenciación de fotos

En este paso generaremos la nube de puntos LiDAR y georreferenciaremos las fotos.

1. Pestaña “Sensor”
2. Seleccionaremos “Post Processing”

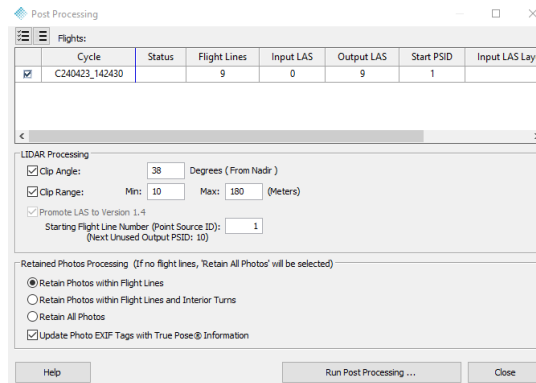


Figura 39: Post Processing

3. A continuación, seleccionamos el “clip angle” que es el 50% del campo visual. Como el TV540 tiene un campo visual de 75 grados, nosotros seleccionaremos 38 grados.
4. A continuación, seleccionamos el filtro de generación de puntos, “Clip Range” como mínimo seleccionamos 10 metros y máximo seleccionaremos un valor un 50% superior a la altura de vuelo. En este caso 90m para los vuelos a 60m y 180m para los vuelos a 120m.
5. Seleccionaremos solo las fotos “Retain Photos within Flight Lines”. Esto seleccionara solo las fotos que se encuentran contenidas dentro de las líneas de vuelo. Ignorando el resto.
6. Seleccionamos “update photo EXIF Tags with True Pose information”
7. Presionamos “Run Post Processing” esto nos generará la nube de puntos y georreferenciará las fotos.

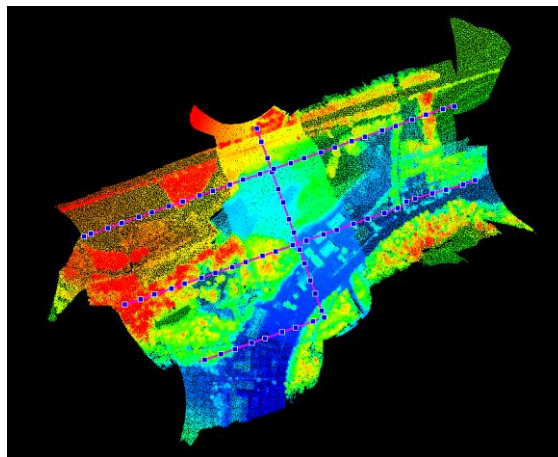


Figura 40: Nube de puntos LiDAR del TV540

5.4.5. Ajuste de líneas de vuelo

Revisar secciona anterior de procesamiento de DJI L2 en LP360 Drone

5.4.6. Clasificación del ruido

Revisar secciona anterior de procesamiento de DJI L2 en LP360 Drone

5.4.7. Generación de la ortofoto

Revisar secciona anterior de procesamiento de DJI L2 en LP360 Drone

5.4.8. Medición de los puntos de apoyo

Revisar secciona anterior de procesamiento de DJI L2 en LP360 Drone

5.5. Resultados del procesamiento

En esta sección veremos los resultados del procesamiento de cada sensor.

5.5.1. Nubes de puntos LiDAR

Se generaron 6 nubes de puntos LiDAR, a estas nubes de puntos se les corrigió el ajuste de líneas de vuelo, y están colorizadas.

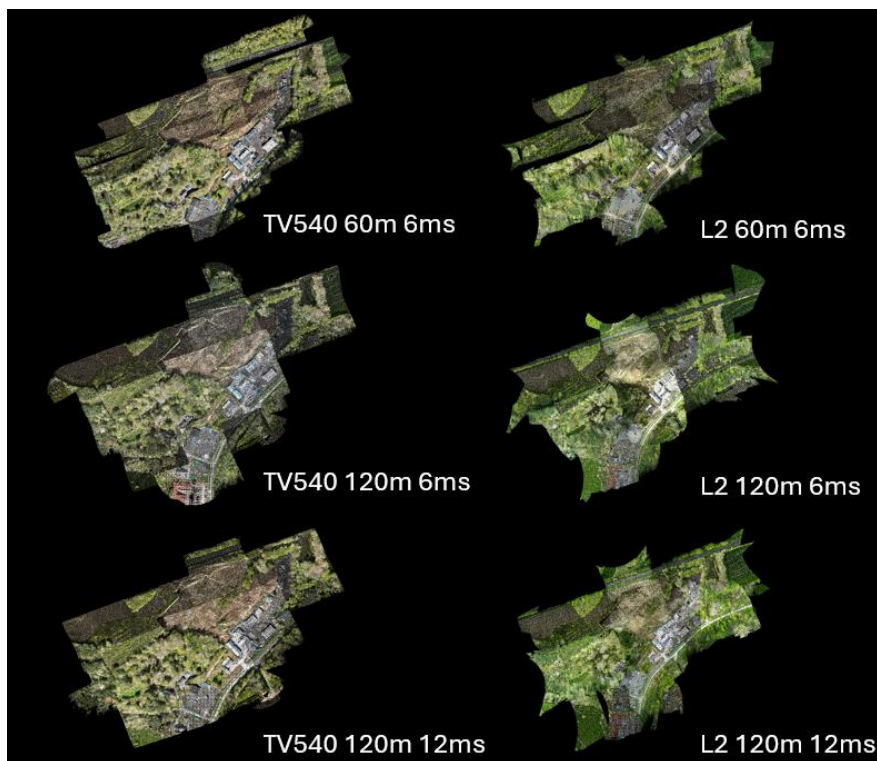


Figura 41: Nubes de puntos generadas, vista RGB

Las nubes de puntos se generaron el formato LAS 1.4 que es el estándar del ASPRS para intercambio de nubes de puntos (Graham, 2012).

5.5.2. Ortofotos

Se generaron dos ortofotos, para los vuelos a 120 metros a 6 m/s.



Figura 42: Ortofotos generadas

Las ortofotos se generaron en formato GeoTiff, que es uno de los formatos mas usados para intercambio de rasters. El GSD de la ortofoto se elegio automáticamente, es decir, será un poco mayor al valor medio de el GSD de las fotos.

6. Mejores prácticas en el uso de sensores LiDAR y fotogrametría

En esta sección mencionaremos haremos un análisis técnico de la metodología usada en sistemas que integran LiDAR y fotogrametría. Hay que entender que, si somos estrictos en la planificación de vuelo, esta planificación es diferente según el tipo de tecnología que queramos darle más peso. Ya que no se planifica igual un vuelo fotogramétrico que un vuelo LiDAR.

Antes de empezar clarificar que productos queremos obtener de cada tecnología.

LiDAR

- Nube de puntos
- DTM
- Curvas de nivel

Fotogrametría

- Ortofoto

Esta separación de productos viene del entendimiento de qué ventajas tiene cada tecnología. Donde el LiDAR obtiene mejores resultados en el eje vertical y fotogrametría en el eje horizontal. Así obtendremos un mejor DTM de la nube de puntos LiDAR, y una mejor vectorización horizontal de una ortofoto.

6.1. Planificación de vuelo y toma de datos

En este apartado veremos cómo se debe planificar un vuelo, no entraremos en muchos detalles en las secciones más genéricas. Hay que tener en cuenta que muchas de las practicas que vamos a detallar es con la idea de ser lo más eficientes posibles a la hora de planificar un vuelo. En muchas ocasiones uno puedo ignorarlas y simplemente añadir más de todo, es decir, por ejemplo, volar más despacio de lo necesario, más bajo, aumentar el solape lateral...

En caso de que dos recomendaciones se solapen entre fotogrametría y LiDAR, se tendera a respetar el requisito del LiDAR antes que la fotogrametría, ya que los requisitos del LiDAR suelen ser más exigentes que la fotogrametría (ASPRS, 2024). El valor más importante a mantener en fotogrametría es mantener un mínimo de solape lateral.

6.1.1. Compartidas entre LiDAR y fotogrametría

En esta sección veremos prácticas que se comparten entre las dos tecnologías, recordar que este trabajo se centra solo en el uso de drones, y no en otras plataformas.

Se debe planificar el vuelo con líneas de vuelo paralelas

Al planificar un vuelo, este se hace con líneas paralelas. Estas líneas deben tener un espaciamiento constante.

Se debe planificar al menos 2 líneas de vuelo y estas deben tener un solape

Aunque es posible llegar a procesar un vuelo de una sola línea de vuelo, esto no es recomendable.

La redundancia mínima ayuda a verificar diferentes errores que puedan ocurrir durante el vuelo. Se necesita un solape mínimo entre líneas de vuelo, este varía según la tecnología y lo veremos en detalle en otra sección.

Se debe volar con velocidad constante

El vuelo debe ser planificado con velocidad constante, esto ayuda a tener una toma de datos homogénea.

Se debe volar con altura constante

El vuelo debe tener una altura constante, esta puede ser contante sobre el nivel del mar o sobre la distancia al suelo.

Un vuelo de altura variable conllevara una toma de datos no homogénea.

Las 2 formas de altura constante tienen sus ventajas y desventajas

- Altura contante sobre el nivel del mar: ayuda al piloto a controlar los posibles obstáculos, se suele usar cuando el terreno es llano, o cuando hay obstáculos (ejemplo, volar cerca de torres eléctricas). Los datos obtenidos pueden ser menos consistentes si el terreno no es llano.
- Altura constante sobre el suelo: También llamado “Terrain follow” (DJI Enterprise, 2023). Es cuando el dron sigue el terreno y mantiene siempre una altura constante con respecto al terreno. Esto tiene el beneficio de obtener unos datos más consistentes en terrenos irregulares. Este modo no debe ser usado en zonas con objetos hechos por el hombre, como puentes, edificios, torres eléctricas... Esto se debe a que normalmente usan un MDE para seguir el terreno, y los objetos humanos no aparecen en estos modelos.

Se debe realizar la maniobra de inicialización del IMU

Se llama inicialización, alineamiento, calibración del IMU o “Dynamic alignment of the IMU”. Lo importante es entender que el IMU necesita ser estresado antes de poder usarlo de forma consistente. Para ello cada fabricante tiene una maniobra diferente, y lo llama de forma diferente. Siempre se debe realizar esta maniobra, antes de empezar la misión y antes de acabar. Si se aterriza con el dron, esto se considera una misión nueva, con lo que se tendrá que repetir la maniobra.

El sensor además debe encenderse en reposo un par de minutos antes del despegue, que el IMU haga el alineamiento estático o “static alignment” (ASPRS, 2024).

No se debe realizar “hot swap” de baterías

En general el “hot swap” o cambio en caliente de batería, es en detrimento de la calidad de los datos obtenidos. El “hot swap” pasa cuando un usuario cambia las baterías del dron, sin apagarlo. Esto hace que muchos sensores, no entiendan si una misión ha acabo o no. También suele afectar gravemente a la trayectoria, ya que al no saber cuándo empieza y acaba la misión, no es capaz de determinar correctamente los momentos donde se realizó la maniobra de inicialización del IMU. Esto se ve reflejado en el informe de calidad de la trayectoria al

comparar el procesamiento hacia delante y hacia atrás (“forward and reverse processing”), lo que hace que el sbet (“smoothed best estimation trajectory”) sea peor.

Siempre se debe apagar el dron y el sensor cada vez que el dron aterriza.

Revisar la condiciones meteorológicas y atmosféricas

Siempre se debe revisar las condiciones meteorológicas, el viento, temperatura, lluvia y posición del sol. Si alguno de estos valores es extremo, afecta a la seguridad de vuelo y también a la calidad de la toma de datos.

También hay que revisar las condiciones atmosféricas, sobre todo la que afecta a la corrección ionosférica, o la magnetosfera. Esta se suele reducir al “KP Index”, si se trabaja con PPK se debe evitar volar cuando el “KP Index” sea mayor de 4. Ya que las efemérides no serán capaces de corregir las mediciones. Estas condiciones atmosféricas están condicionadas principalmente por la actividad solar, pueden llegar a provocar tormentas geomagnéticas. En general estas afectan a cualquier equipo que trabaje con GNSS (NOAA, 2024). Las predicciones en el “KP Index” se pueden ver en la página web:

<https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-geomagnetic-forecast>

Se recomienda trabajar con PPK en vez de RTK

Esto se debe al punto anterior, en PPK al poder controlar el uso de las efemérides, esto ayuda a la corrección de la trayectoria. Especialmente en vuelos con mayor actividad solar. Solo como mención, el producto de efemérides más usado con drones del IGS, es el “Rapid” de este producto al “Final” o “Precise” no hay una diferencia significativa.

Type		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits	~100 cm	real time	—	daily
	Sat. clocks	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~3 cm	3 – 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rapid	orbits	~2.5 cm	17 – 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	orbits	~2.5 cm	12 – 19 days	every Friday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat.: 30s Stn.: 5 min

Figura 43: GPS Satellite Ephemerides product (International GNSS service, 2024)

Por otra parte, la principal ventaja de la tecnología RTK es que, al aterrizar el dron, puedes directamente sacar los datos y tener las fotos ya georreferenciadas. Pero esto solo pasa con las fotos (fotogrametría), si trabajas con LiDAR esto nunca es así, ya que siempre tienes que procesar la nube de puntos en algún software. Con lo que perdemos la mayor ventaja de la tecnología.

Estación base

El uso de una estación base o de un receptor GNSS trabajando en estático durante el vuelo, es uno de los requisitos para el procesamiento con PPK. La recomendación es conectar el receptor 15 minutos antes del primer vuelo y dejarlo 15 minutos extra después del último vuelo. También es importante que este trabaje en la frecuencia recomendada por el fabricante, en nuestro caso es 1Hz para los dos sensores.

Por último, si se estaciona en un punto de coordenadas desconocidas, y se pretende calcular estas coordenadas mediante “PPP”, la toma de datos debe de ser de al menos 1 hora (Trimble, 2017).

También hay que tener la estación lo más cerca posible de la zona de vuelo, en regla general para sensores de georreferenciación básicos esta tendrá que estar como máximo a 7km, y para

avanzados a 20km. Esto va conectado con el programada de procesamiento de la trayectoria y el tipo de algoritmo usado.

Se debe establecer 3 puntos de apoyo o chequeo

Este tema es el más controvertido. Pero siempre se deben establecer puntos de apoyo o chequeo para cualquier vuelo. Ya que, sin una referencia, no se puede analizar la calidad del producto generado.

La recomendación mía, es al menos establecer 3 puntos por vuelo. Ya que estimamos que el establecimiento de estos es muy costoso, de hecho, se suele invertir más tiempo en el establecimiento de puntos de apoyo, que en tiempo de vuelo en sí.

Porque 3 puntos, ¿porque no 1, 5 o 10?, esto viene por experiencia personal. 1 punto de apoyo es lo mínimo que se necesita en fotogrametría si se usa la tecnología de orientación directa o “direct georeferencing”, con una cámara calibrada y en condiciones normales. Para LiDAR, se necesita también 1 punto al menos para determinar si hay algún tipo de desviación generada o “bias”. 3 puntos de apoyo nos permiten tener cierta redundancia entre ellos, en caso de que alguno tenga un problema, y también nos permite establecerlos en áreas de solape entre varios vuelos al igual que entre varias zonas de diferente elevación.

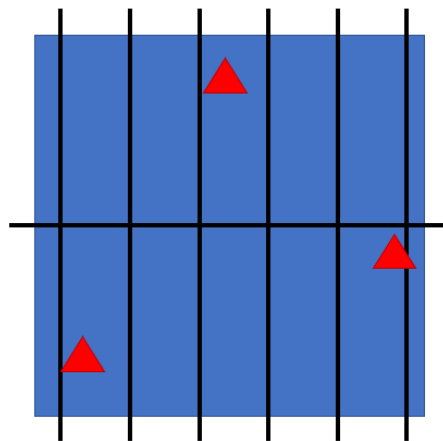


Figura 44: Ejemplo distribución de puntos de apoyo (Milla, 2023)

Alguien podría rebatir que establecer 5 o 10 puntos, es mejor que 3, y yo concuerdo con ello, pero también el costo será mayor.

Sin entrar mucho en su distribución, lo ideal es distribuirlos en las esquinas del vuelo en caso de que haya zonas de solape entre vuelos contiguos. Y también entre diferentes alturas, en caso de que el terreno no sea llano.

Tipos de vuelo

Mencionar los dos tipos de vuelo más comunes, el de tipo pasillo, “corridor mapping”, y el de tipo área, “área mapping”.

- El de tipo pasillo, suele estar orientado a la toma de datos de una estructura lineal, larga y estrecha. Por ejemplo, una carretera o una línea eléctrica. Este se caracteriza por pocas líneas de vuelo, pero muy largas. Este tipo de vuelo es muy complicado, ya que es más difícil de volar seguro (visión del dron-piloto), estresa el IMU, y dificulta la calibración automática de las cámaras.
- Y el tipo área, es el más común, múltiples líneas de vuelo paralelas, que conforman una especie de cuadrado. Se caracteriza por ser el más fácil de procesar.

Vuelos contiguos deben tener solape

Al volar múltiples vuelos contiguos, estos deben tener una zona de solape. Este solape ayuda a darle continuidad a los datos adquiridos, y poder evaluar problemas entre vuelos.

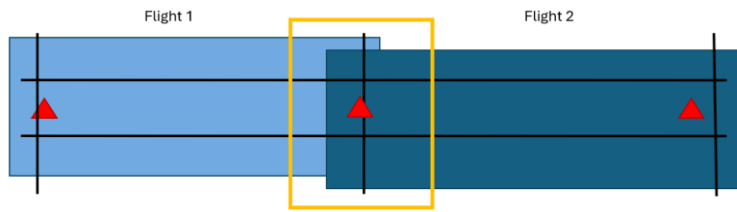


Figura 45: Planificación de vuelos de tipo pasillo (Milla, 2023)

6.1.2. LiDAR

En esta sección veremos recomendaciones al planificar un vuelo LiDAR.

Altura de vuelo

La altura vuelo está restringida por el rango de nuestro LiDAR, lo ideal es mirar el rango dado por el fabricante para reflectividad del 20% (ASPRS, 2024). El material común con menor reflectividad es el asfalto, que suele rondar el 20% de reflectividad según su antigüedad.

MATERIAL	REFLECTIVITY @ $\lambda = 900 \text{ nm}$
Dimension lumber (pine, clean, dry)	94%
Snow	80-90%
White masonry	85%
Limestone, clay	up to 75%
Deciduous trees	typ. 60%
Coniferous trees	typ. 30%
Carbonate sand (dry)	57%
Carbonate sand (wet)	41%
Beach sands, bare areas in desert	typ. 50%
Rough wood pallet (clean)	25%
Concrete, smooth	24%
Asphalt with pebbles	17%
Lava	8%
Black rubber tire wall	2%

Figura 46: Reflectivity of Various Surfaces / Materials (RIEGL, 2004)

En este punto hay que revisar bien el rango del LiDAR dado por fabricantes chinos, ya que suelen dar este rango para el 50% de reflectividad. O para el 20% pero en condiciones de oscuridad. Como pasa con la ficha técnica del DJI L2.

Pulse Repetition Rate

El PRR o “Pulse Repetition Rate”, controla el número de puntos que nuestro LiDAR lanza por segundo. Este valor se puede ajustar en los lidares de gama alta, ya sea para tener una menor densidad de puntos, o para proporcionar más potencia al laser. En nuestro caso en PRR se debe ajustar en el TV540 para cualquier vuelo por encima de 150 metros.

Este valor suele estar relacionado con el “line scanning” o “scan rate” que controla el espaciamiento entre las líneas de escaneo, este valor está en Hz y controla a la velocidad que gira el prisma dentro del láser escáner.

Solape

El solape es importante para evitar huecos entre líneas de vuelo, y para analizar el ajuste de las diversas líneas de vuelo.

El solape mínimo que recomiendo es del 25% (ASPRS, 2024).

Campo visual

El campo visual o “Field of view”, es el ángulo de escaneo que trabajara nuestro LIDAR. En general los sensores suelen estar programado por el fabricante para trabajar de 60 a 90 grados, donde los puntos adquiridos tienen un buen ángulo de incidencia, con lo que estos están menos deformados. Hay equipos que pueden trabajar con un ángulo de hasta 360 grados, pero en geomática se suele trabajar con un valor cercano a 80 grados (ASPRS, 2024).

En nuestro caso, el L2 trabaja a 72 grados y el TV540 a 75 grados. Usaremos todo el campo visual.

Divergencia del laser

La divergencia del láser o “beam divergence”, se puede explicar como la huella del láser a cierta altura. A mayor sea la altura de vuelo, mayor será la huella del láser y por correspondencia, menor será la definición de detalles. Este valor va de la mano con la altura de vuelo.

Para hacer una correspondencia, este término sería parecido a el GSD en fotogrametría.

Deriva del IMU

La deriva del IMU o “IMU drift”, refiere a la desviación acumulativa en las mediciones de un “Inertial Measurement Unit” (IMU) a lo largo del tiempo. Esto se produce principalmente cuando se planifica un vuelo sin giros, es decir, líneas de vuelo totalmente rectas por un largo periodo de tiempo. Se corrige añadiendo curvas en la planificación, o añadiendo una maniobra de alineación (ASPRS, 2024).

El efecto siempre ocurre en línea de vuelo rectas muy largas, lo que varía es cuando se puede percibir. Lo idea aquí es contactar con el fabricante del sensor y preguntarle por este fenómeno.

Por DJI L2, tiene un modo automático que a los 180 segundos que no detecte un giro, automáticamente hará una maniobra para estresar el IMU.

La recomendación es evitar líneas de vuelo más largas que 200 segundos. Si una línea de vuelo es más larga, entonces añadir un giro artificial a mitad de la línea. Este efecto también pasa en fotogrametría, pero es menos visible ya que durante el procesamiento fotogramétrico queda diluido.

Ajuste de líneas de vuelo

Hemos hablado de este tema en varios puntos, en el solape, y en la deriva del IMU. Recomiendo para hacer este ajuste añadir al menos 1 línea perpendicular que corte todas las líneas de vuelo para ayudar con este ajuste.

Si el vuelo es de tipo pasillo, entonces, recomiendo poner esta línea perpendicular al inicio y al final del pasillo. Cortando una zona cercana a la zona de giro.

6.1.3. Fotogrametría

En esta sección veremos las recomendaciones para la planificación un vuelo fotogramétrico.

Número mínimo de líneas de vuelo

En el apartado compartido hemos explicado que se necesitan 2 líneas de vuelo para LiDAR y fotogrametría. La explicación para fotogrametría es la siguiente.

- Vuelo con una cámara calibrada: Si se tiene una cámara calibrada, se puede reducir el número de líneas de vuelo a 2. Que es el mínimo para generar una reconstrucción consistente.
- Sino se tiene la cámara calibrada: Entonces este número será 4, que es el mínimo que requiere un programa de fotogrametría para calibrar una cámara.

Mínimo de fotos por línea de vuelo

El mínimo de fotos por la línea de vuelo es 20, para poder calibrar correctamente la cámara. Un vuelo con un número inferior con una cámara no calibrada puede tener problemas durante la reconstrucción.

Altura de vuelo y GSD

A diferencia del LiDAR la fotogrametría no tiene límite con la altura de vuelo. Es decir, da igual a que altura volem, que siempre obtendremos un resultado. Lo que cambia será la resolución del producto cartográfico.

Esto viene ligado al concepto de “Ground Sample Distance” o distancia de muestra en el suelo. Esto es que tamaño tendrá un píxel en el suelo. Es decir, a mayor altura de vuelo, mayor GSD tendremos, con lo que menos detalles se podrán apreciar.

También hay que tener en cuenta que el GSD de la foto no es igual al GSD de la ortofoto. Una regla para seguir es el GSD de la ortofoto es x2 el GSD de la foto para vuelos con terreno irregular, y x1.5 veces para terreno llano.

La recomendación aquí es siempre calcular el GSD de la foto sea más pequeño que la resolución exigida en un proyecto.

Solapes

A diferencia del LiDAR, en fotogrametría si que hay reglas que seguir para el solape entre fotos de una misma línea de vuelo, y fotos entre líneas de vuelo contiguas. Es decir, solape frontal y lateral.

Se suelen expresar estos solapes con los dos valores, por ejemplo, 80x60, significa 80% solape frontal y 60% solape lateral.

Al trabajar con tecnología de orientación directa o “direct georeferencing” el solape lateral mínimo será del 40% (Mostafa, 2017).

Al trabajar con cámaras comerciales no métricas, el solape frontal será del 80%.

Efecto “bowling”

Este efecto es un efecto que ocurre debido a la distorsión de las lentes y la curvatura de la tierra. Esto tiende a deformar las fotos que aparecen curvadas. Este efecto afecta a cualquier reconstrucción tridimensional.

Una forma de evitarlo es:

- Trabajar con cámaras calibradas
- Añadiendo líneas perpendiculares al vuelo

6.1.4. Planificación de vuelo para LiDAR y fotogrametría

Una vez visto cuales son las mejores prácticas para planificar un vuelo de fotogrametría y un vuelo LiDAR, vamos a unir todos estos requisitos para poder diseñar un vuelo lo más eficiente posible. Es decir, para planificar un vuelo, seguiremos todas las recomendaciones genéricas más las siguientes recomendaciones que cubren LiDAR y fotogrametría al mismo tiempo.

Líneas de vuelo

Pondremos al menos 2 líneas de vuelo paralelas, con esto nos aseguramos de que la fotogrametría funcionara, y que podremos ajustar las líneas de vuelo

Luego añadiremos una línea perpendicular al vuelo, con esto evitamos el efecto “bowling” en fotogrametría, y añadimos mayor redundancia en el ajuste de líneas de vuelo.

Altura

Siempre elegiremos una altura inferior al rango máximo de nuestro LiDAR. Después elegiremos la altura que se ajuste a la resolución de nuestro proyecto, en GSD para fotogrametría, y en definición de objeto para LiDAR.

Solape

Siempre intentaremos volar con un mínimo del 40% solape lateral en la cámara y 25% en el LiDAR. Esto nos asegura un correcto funcionamiento de la fotogrametría y solape suficiente para el correcto ajuste de líneas de vuelo.

Siempre se usará el solape más pequeño que cubra los dos requisitos.

Deriva del IMU

Siempre tendremos en cuenta la deriva del IMU o “IMU drift”, para regular el tiempo máximo de cada línea de vuelo. Muy importante ya que afecta a la calidad de la solución LiDAR.

Dianas

Se usarán dianas reflectantes, para que se puedan identificar no solo en las fotos, sino también en la intensidad de la nube de puntos.

Campo visual

Siempre planificaremos el vuelo con el campo visual más pequeño de nuestros sensores.

6.2. Procesamiento de datos

En la siguiente sección veremos recomendaciones para el procesamiento de datos tanto LiDAR como fotogramétricos. Mostrare directamente como se debe procesar ambos, pero la idea es procesarlos conjuntamente, es decir, procesar al mismo tiempo el LiDAR y la fotogrametría en la medida de lo posible.

Almacenamiento de datos

Lo ideal es descargar todos los datos del sensor en una carpeta, y hacer una copia de seguridad de ella. Los datos a procesar deben estar almacenados en un disco duro local, evitando el uso de servidores o programas de almacenamiento en la nube.

También recomiendo procesarlo todo de forma ordenada en un mismo directorio, añadiendo subcarpetas para cada parte del procesamiento, sobre todo si se usan diversos programas.

Importación de los datos

Al importar los datos, importaremos todos los datos crudos juntos, es decir, trayectoria cruda, datos LiDAR crudos, fotos y archivo rinex.

Nuestros 2 sensores, generan una carpeta con todos estos datos dentro de ella, y LP360 nos facilita el trabajo identificar los datos crudos automáticamente

Selección del sistema de coordenadas del proyecto

Este paso, suele ser uno de los primeros. El usuario tendrá que seleccionar que sistema de coordenadas en el que desea trabajar, para ello seleccionará:

- Datum horizontal, con su proyección.
- Datum vertical, ya sea altura elipsoidal y ortométrica (geoide).
- Opcional: la época, importante al trabajar con WGS84.

Procesamiento de la trayectoria

Este es el primer paso para el procesamiento de cada vuelo, la trayectoria es compartida entre el vuelo LiDAR y fotogramétrico, con lo que el procesamiento de esta afectara a todos los datos. Es importante revisar el informe de calidad de la trayectoria una vez terminado.

Lo mínimo a revisar es:

- Constelaciones adquiridas, y calidad de las señales L1 y L2. Especial atención a los “cycle slips”.
- Continuidad de la trayectoria, revisar que no hay huecos en la trayectoria post procesada
- Revisar el tipo de solución usada, siempre debe de estar por encima del 95% “fixed solution”, suponemos que el otro 5% será parte del despegue y aterrizaje.
- Revisar el número de satélites usados en la solución
- Revisión de la precisión adquirida en la trayectoria procesada, o sbet.
- Revisión del ruido de IMU
- Revisión de las anomalías de IMU
- Revisión de la comparativa entre la solución obtenida en “Forward” y “Reverse”
- Si el sensor lo permite, revisar que tipo de algoritmo de procesamiento se usó, si “tightly coupled” o “loosely coupled”. Normalmente “Loosely” se usa para sensor de georreferenciación menor gama y “thightly” para los de mayor gama, esto nos dará una idea de a que distancia podremos poner nuestra estación base. Pero esto depende de cada fabricante.

Generación de líneas de vuelo

Las líneas de vuelo generadas deben de ser las mismas para fotogrametría y LiDAR, así nos aseguramos de que ambas tecnologías cubren la misma área. En algunas ocasiones, se puede añadir un extra de fotos, para aumentar el solape en las esquinas del proyecto, por ejemplo, añadiendo los cambios de dirección.

Georreferenciación del LiDAR y las fotos

La georreferenciación se suele hacer por separado, pero si se procesó la trayectoria y las líneas de vuelo junta, la georreferenciación sale de aquí.

Para fotogrametría, generamos la orientación externa, ya sea en forma de archivo de texto con la información: PhotoID, X, Y, Z, Omega, Phi, Kappa, y sus precisiones. O en forma de información exif, LLH + RPY (posición y rotación). Antes de esto se hará un emparejamiento entre disparos de la cámara y fotos realizadas, que no siempre coinciden.

Para LiDAR, la georreferenciación significa la generación de la nube de puntos, en ella cogemos el sbet, la calibración “boresight” del sensor, y los datos crudos LiDAR, y extraemos la nube de puntos.

Colorización de la nube de puntos

Este punto es opcional, pero suele estar integrado en los diversos programas de procesamiento. En este punto se coje las fotos georreferenciadas, la calibración de la cámara y la nube de puntos LiDAR. Y mediante “ray tracing” se coloriza la nube de puntos. Este tipo de colorización es distinta a la colorización extraída de una ortofoto.

Correcciones geométricas a la nube de puntos LiDAR

Una vez tenemos la nube de puntos LiDAR, podemos añadirle correcciones geométricas. En este punto añadiré las más comunes:

- Ajuste de líneas de vuelo, este error se suele arreglar con una herramienta llamada “Strip Adjustment” o “Strip Align”. Antes del uso de la herramienta, se harán cortes transversales en la nube de puntos, en zonas llanas y en edificios. También se intentan hacer en la dirección de vuelo y perpendicular a este. De esta forma analizamos la alineación de las líneas de vuelo. El error de la alineación viene principalmente de dos fuentes.
 - o La calidad de la trayectoria, a mayor sea la calidad de esta, menor será el error que veamos. Esto está fuertemente conectado a la calidad de los datos del IMU. Es decir, a mayor calidad de estos, menor será el error.
 - o La calidad de la calibración “boresight” de nuestro sensor. La calibración “boresight” es simplemente el cálculo de la desviación entre el sensor de georreferenciación y el láser escáner. Esta desviación es única para cada sensor, y viene dada por 3 ángulos, Roll, Pitch y Heading.
- Análisis de desviación de la nube de puntos, para esto compararemos nuestra nube de puntos a nuestros puntos de apoyo. Y buscaremos un patrón en el error. Si lo encontramos, quiere decir que la nube sufre un error sistemático de desviación o “bias”. Normalmente este error viene de la estación base. Este error se debe corregir, con una translación de la nube de puntos.
- Análisis del grosor de la nube de puntos o “noise envelope”, se harán cortes transversales en zonas llanas con y sin solape, con esto mediremos el grosor de nuestra nube de puntos. Es de esperar que en las zonas de solape este sea mayor, ya que contiene también el error del ajuste de líneas de vuelo, una vez este se ha corregido el grosor debería ser muy parecido. En caso de necesidad este error se puede reducir con un algoritmo de suavizado, “smoothing” o “denoising”. Estos algoritmos solo funcionan en superficies planas, y tienden a deformar detalles pequeños en la nube de puntos. Se recomienda para sensores de gama baja.

Generación de informe de calidad de la nube de puntos

Una vez hemos corregido geoméricamente nuestra nube de puntos, tenemos que comprobar que la calidad obtenida coincide con la calidad exigida por nuestro proyecto. En este paso, comparemos nuestra nube de puntos con nuestros puntos de chequeo. Y de ahí generaremos un informe con las estadísticas obtenidas (Wagg, 2012). Estas tienen que incluir, una tabla similar a esta:

Tabla 5: Ejemplo tabla de precisión

ID	dX	dY	dZ
Punto 1	-0.13	0.604	-0.075
Punto 2	0.052	0.18	0.001
Error medio	-0.039	0.392	-0.037

RMSE	0.099	0.446	0.053
Std	0.050	0.400	0.046

Donde podamos ver los puntos medidos, el error en cada eje para cada punto. Y luego tengamos algunas estadísticas del error. Los más importantes por orden es:

- RMSE, que será la presión de nuestra nube de puntos
- Error medio, que es el error medio cometido
- Rango de error, que es la desviación máxima del error

Aparte de la precisión, es siempre bueno añadir algunos valores más como:

- Espaciamiento medio de puntos.
- Densidad de puntos por metro cuadrado
- Grosor medio de la nube de puntos en zonas llanas
 - o Grosor medio en una sola línea de vuelo
 - o Grosor medio en zonas de solape
- Si la zona es boscosa:
 - o Numero de retornos máximo detectado
 - o Porcentaje de puntos que han penetrado la vegetación

Clasificación y segmentación de la nube de puntos

Una vez la nube de puntos esta corregida geoméricamente, entonces podemos pasar al siguiente paso que es la extracción de información de ella.

- Filtro de puntos por distancia: eliminaremos todos los puntos georreferenciados que estén a cierta distancia del dron. En este caso consideraremos “ruido” a cualquier punto entre 0 y 10 metros del dron, y también cualquier punto que este a más de x1.5 veces la altura de vuelo. Estos valores son para reducir el ruido en el aire, y bajo tierra. Especial relevancia este filtro cuando se trabaja con superficies reflejantes, como cristales, espejos, hielo o placas solares.
- Filtro de puntos por campo visual: limitaremos el campo visual de nuestro sensor a los puntos solo por debajo del dron. Normalmente estamos hablando de 40 grados a cada lado del punto nadir por debajo del sensor. Es decir 80 grados de campo visual. En este caso nuestros sensores tienen un campo visual más pequeño de 80 grados, con lo que no aplicaremos este filtro.
- Clasificación de ruido o “outliers”, este es un algoritmo de clasificación que identificara puntos aislados en la nube de puntos, y los clasificara como ruido. Estos puntos suelen encontrarse por debajo de la nube de puntos, y pueden afectar a la extracción del suelo.
- Clasificación del suelo, se usará un algoritmo de clasificación del suelo automática. Estos algoritmos suelen pedir un “seed” o distancia mínima para considerar edificio, un ángulo, una distancia e iteraciones. Siempre se necesita de un ajuste manual después de usar uno de estos algoritmos.
- Clasificación de edificios, algoritmo que identifica superficies por encima del suelo de forma regular. Suele pedir valores como altura mínima/máxima de edificios, o ángulo del tejado.
- Clasificación de vegetación, esta es opcional. Hay muchos algoritmos en el mercado, el más común es hacer polígonos en zonas con más de un eco, y hacer un buffer. Y a continuación generar una clasificación por altura. Otros algoritmos más avanzados, son capaces de segmentar individualmente cada árbol.

Generación de modelos digitales

Una vez tenemos la nube de puntos clasificada, podemos extraer diferentes modelos digitales, el formato más común es GeoTiff. Se suele usar un tamaño de pixel determinado, más grande que el espaciamiento de puntos en la nube de puntos. Los modelos más comunes son:

- Modelo digital del terreno, que contiene solo los puntos clasificados como suelo.
- Modelo digital de superficie, contiene todos los puntos de la nube de puntos excepto el ruido.

- Modelo digital de elevaciones con edificios y terreno, este se usa en la generación de ortofotos, ya que sustituiremos la nube de puntos matching por este producto.

Por último, generaremos las curvas de nivel a partir del MDT.

Generación de ortofotos

En la generación de la ortofoto usaremos un motor de fotogrametría, en nuestro caso está integrado en LP360, pero se puede usar cualquier programa de fotogrametría para drones, como Pix4D, Agisoft, UAS Master...

En la generación de la ortofoto usaremos las fotos georreferenciadas, la calibración de la cámara, y la nube de puntos “scanning” o el MDE de edificios y terreno.

Sin entrar en detalles en cómo es el proceso fotogramétrico los pasos esenciales son:

- Importación de los datos
- Selección del sistema de coordenadas deseado
- Ajuste de haz de rayos o “bundle adjustment”, generación de puntos de paso o “tie points” generación y calibración de la cámara (la calibración la podemos saltar si nuestra cámara esta calibrada)
- Medición de puntos de apoyo y chequeo.
- Generación de la nube de puntos “matching” y MDS (este punto lo saltamos, ya que usaremos los datos del LIDAR)
- Reconstrucción de la ortofoto, en nuestro caso a partir de la nube de puntos LiDAR o del MDE de edificios y terreno.

Una de las ventajas de usar el resultado del LiDAR (nube de puntos o MDE terreno + edificios), es:

- Agiliza el procesamiento, la parte más lenta en el procesamiento fotogramétrico es la generación de la nube de puntos “matching”. Al saltarnos este paso, reducimos menos de la mitad el tiempo de procesamiento.
- Evita vacíos en zonas de difícil generación de puntos de paso, mucha importancia al reconstruir la ortofoto de zonas boscosas.
- Esquinas de edificios más rectas, la fotogrametría de forma automática tiende a redondear las esquinas de los edificios. Al usar la información nube de puntos LIDAR esta genera las esquinas de forma recta, con lo que se evita la corrección manual de estas.

Generación de informe de calidad de la ortofoto

Se generará un informe de calidad de la ortofoto. Al igual que con la nube de puntos, se comparará la ortofoto obtenida con los puntos de chequeo, y se obtendrá una tabla similar. Por ejemplo:

Tabla 6: Ejemplo tabla de precisión para la ortofoto

ID	dX	dY
Punto 1	-0.13	0.604
Punto 2	0.052	0.18
Error medio	-0.039	0.392
RMSE	0.099	0.446
Std	0.050	0.400

Como se observa, solo se extrae la precisión horizontal ya que no se usará la nube de puntos matching. En la tabla también podemos ver los puntos medidos, el error en cada eje para cada punto. Y luego tengamos algunas estadísticas del error. Los más importantes por orden es:

- RMSE, que será la presión de nuestra nube de puntos
- Error medio, que es el error medio cometido
- Rango de error, que es la desviación máxima del error

Aparte de la precisión, es siempre bueno añadir la resolución de la ortofoto, o GSD de la ortofoto.

Corte de los datos al área de interés

Una vez hemos generado todos los productos cartográficos (nube de puntos, ortofoto, MDT y curvas de nivel), limitaremos nuestra zona de interés. Normalmente, en los vuelos se suele cubrir un área mayor al área de interés de nuestro proyecto. Esto se hace para asegurarnos de dejarnos ningún área por cubrir. Asimismo, nuestro cliente no está interesado en esos datos fuera del área de interés. Así que el último paso en el procesamiento es generar un polígono con el área de interés y cortar todos los productos cartográficos.

Así generamos nuestros productos finales.

6.3. Análisis de nuestros vuelos

Una vez visto las recomendaciones para la planificación y procesamiento de vuelos de LiDAR y fotogrametría, vamos a realizar un análisis técnico de su aplicación a nuestro proyecto.

6.3.1. Planificación de los vuelos

Área de vuelo

El área es una zona rectangular de 600x400 metros, lo que la hace relativamente pequeña. Al tener esta forma rectangular, vemos que el vuelo es de tipo área, ya que incluye múltiples líneas de vuelo paralelas.

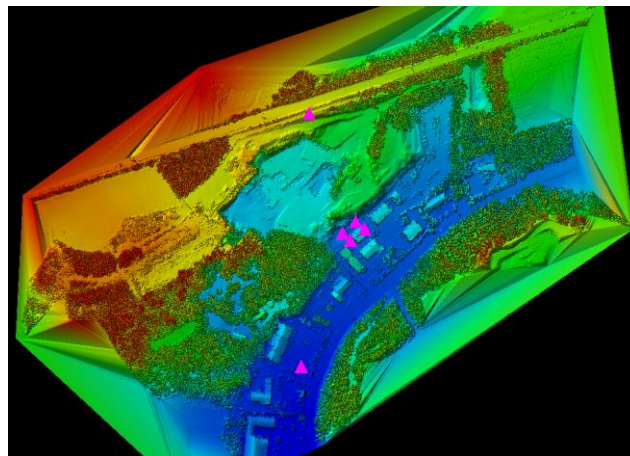


Figura 47: Vista de la nube de puntos por elevación

La zona, tiene un desnivel entre la zona Este y Oeste de hasta 30 metros. Los vuelos despegaron de la zona más baja, y se volaron con altura constante al nivel del mar. Esto quiere decir que los 30 metros de diferencia crearan un problema de heterogeneidad en los datos adquiridos. El solape lateral, la resolución en GSD, y la densidad de puntos variara según la zona.

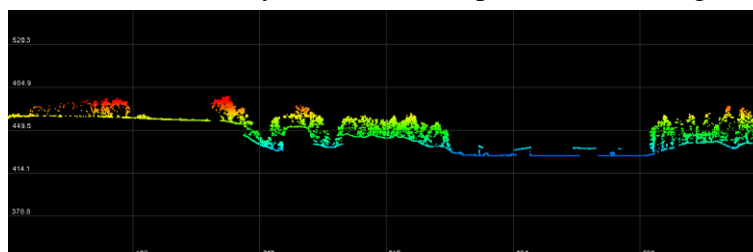


Figura 48: Desnivel del terreno, corte transversal E-O

Este problema es realmente importante en los vuelos a 60 metros ya que se han generado vacíos entre las líneas de vuelo al no tener suficiente solape lateral, en la zona más alta del terreno.

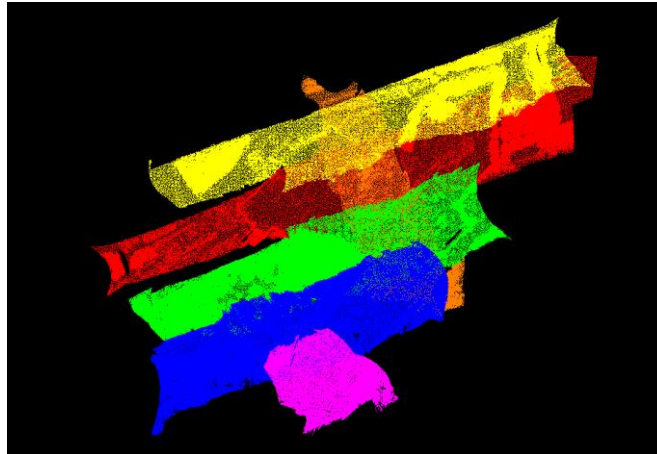


Figura 49: Vuelo TV540 60m 6ms vista por línea de vuelo

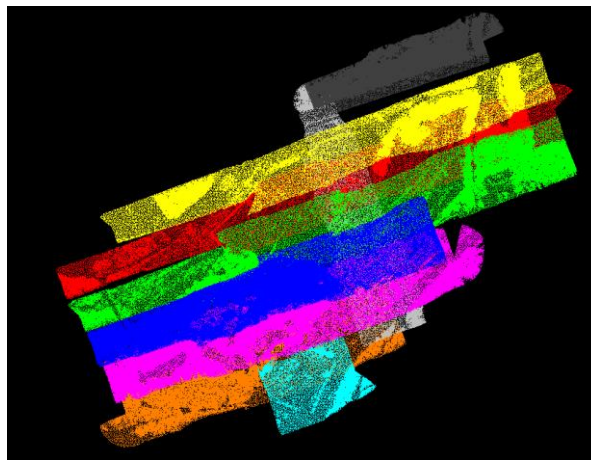


Figura 50: Vuelo L2 60m 6ms vista por línea de vuelo

Esto es un problema, y un error de planificación de vuelo, se debería haber usado “terrain following”, o haber calculado el solape lateral en la zona más alta del terreno.

Para los vuelos a 120 metros el efecto no es tan grave, ya que hay solape lateral mínimo, sin embargo, esto es un fallo de planificación en general.

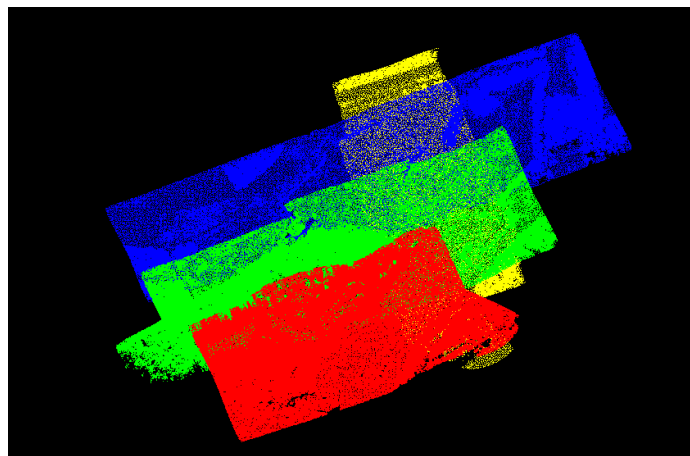


Figura 51: Vuelo L2 120m 12ms vista por línea de vuelo

Velocidad, altura, líneas de vuelo y solape

Los vuelos se realizaron a velocidad constante, a 6m/s y 12 m/s. También se realizaron con altura constante con respecto al nivel del mar, a 60 metros y 120 metros.

El solape lateral usado es del 35% del LiDAR, lo que es más que suficiente para cumplir el requisito mínimo recomendado del 25%.

Para fotogrametría el solape lateral es de 42% para el TV540 y del 48% para el L2. El solape frontal se mantuvo en el 80%.

Los vuelos se realizaron de este a oeste, dejando una línea perpendicular en el medio de vuelo. En total el número de líneas de vuelo varía según el sensor y la altura de vuelo, pero rondan entre 4 y 9.

Puntos de apoyo

Se establecieron 6 puntos de apoyo, 3 con dianas y 3 con cruces. Las dianas son de un material reflectante (ASPRS, 2024). Sin embargo, la distribución de ellos no es la ideal. Ya que:

- Las 3 dianas se encuentran en un radio de 20 metros. Muy cerca entre ellas.
- 1 diana está muy cerca de un edificio y se tomó con RTK, es probable que la medición este afectada de “multipath”.
- Las cruces son muy pequeñas, y no se distingue bien el centro en las fotos.



Figura 52: Distribución de los puntos de apoyo

La distribución tampoco es la ideal, ya que no tenemos ningún punto en la zona oeste del vuelo, que es la zona más elevada.

Condiciones meteorológicas y atmosféricas

El 23 de abril de 2024, hizo en Weibern, una temperatura de unos 20°C, día nublado, sin lluvias, pero con pequeñas ráfagas de viento.

El “KP Index” ese día vario entre 1 y 2, siendo aproximadamente 1.667 durante la realización de los vuelos.

Otros comentarios

No hay estación base para estos vuelos, ya que se usó una estación base virtual o VRS, proporcionada por el servicio SAPOS de Alemania. El archivo rinex proporcionado, está a 1 hz y dura 12 horas, desde la mañana antes de volar hasta la noche.

Se realizo la maniobra de inicialización de IMU al inicio de cada vuelo y al final.

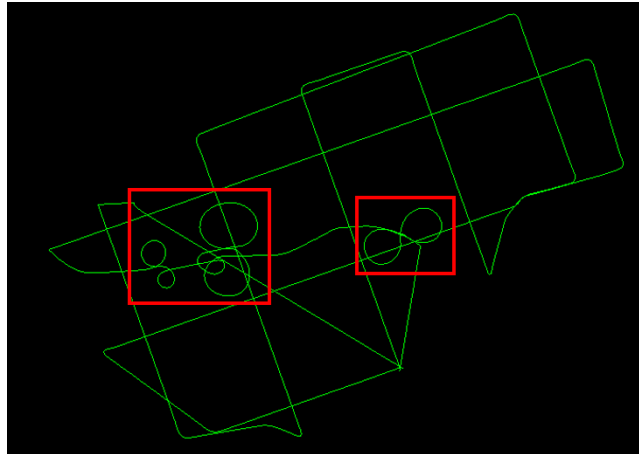


Figura 53: Vuelo TV540 120m 6ms maniobra inicialización IMU

No hay deriva del IMU a considerar, ya que todas las líneas de vuelo de todos los vuelos están por debajo de los 150 segundos.

Conclusión

En general se planificaron bien los vuelos, aunque esta planificación no fue perfecta. El mayor problema que identificamos es el no uso de “terrain follow”, y no tener en consideración el desnivel del terreno.

6.3.2. Procesamiento de los vuelos

Todos los vuelos se procesaron de la misma forma, el procesamiento como se describió anteriormente se realizó en su totalidad en LP360 Drone.

Almacenamiento de datos

Todos los datos fueron almacenados en un disco duro local para su procesamiento, además se hizo una copia de seguridad de los datos crudos.

Procesamiento general

Todos los vuelos se importaron y procesaron al mismo tiempo. Es decir, se usó el mismo flujo de trabajo para todos ellos, y se usó “batch processing” para su procesamiento.

Esto incluye los puntos de; importación, procesamiento de la trayectoria, generación de líneas de vuelo, georreferenciación del LiDAR, georreferenciación de las fotos y colorización de la nube de puntos.

Correcciones geométricas

Se usó la herramienta “Strip Alignment” para el procesamiento de la nube de puntos. Como podemos ver en la siguiente figura, las líneas de vuelo no están totalmente alineadas, esta herramienta es capaz calcular la desviación de cada línea de vuelo en los ángulos “Roll, Pitch and Yaw” y corregirla. En el ejemplo se ve un corte transversal de 0.3 metros de un edificio.

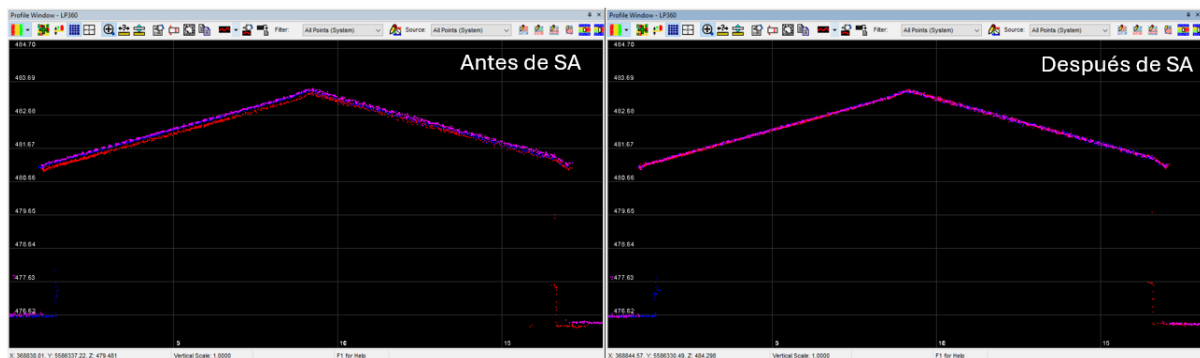


Figura 54: L2 120m 6ms Corte transversal, vista por líneas de vuelo

En el proyecto se analizó el grosor medio de la nube de puntos en zonas planas, para una sola línea de vuelo y para las zonas de solape. Sin embargo, no se usó para este trabajo ningún algoritmo de suavizado, ya que este algoritmo deforma la nube de puntos y llega a diluir pequeños detalles que identifique como ruido.

En el proyecto se analiza el error de la nube de puntos, pero no se le aplica ningún valor de desviación (“bias”), ya que la estación base es virtual y se usó el mismo archivo Rinex con las mismas coordenadas, para todos los vuelos. Si hay alguna desviación, entonces será visible en todos los vuelos.

Clasificación, segmentación, MDT y ortofotos

Se clasifico y se creó la ortofoto, solo de los vuelos a 120 metros a 6ms. Esto se debe a que este proceso es más costoso, ya que tiene un componente manual.

Generación de informes de calidad LiDAR y ortofoto

Se genero un informe de calidad para todas las nubes de punto LiDAR, después de corregirlas del error de alineamiento de líneas de vuelo.

También se generó este informe de las 2 ortofotos generadas.

7. Análisis técnico

En esta sección se centrará en analizar los datos obtenidos y luego comparar de forma general los dos sensores.

7.1. Calidad de los productos generados

Los productos generados:

- Nube de puntos LiDAR
 - o Georreferenciada
 - o Corregida geoméricamente
- Ortofoto
- MDT
- Otros:
 - o Trayectoria pos procesada
 - o Clasificación de la nube de puntos
 - o Fotos

7.1.1. Precisión

En la precisión se comparará la nube de puntos a nuestros puntos de chequeo (apoyo). Como se mencionó en el apartado de toma de datos, usaremos 6 puntos de apoyo. Es importante añadir que no se usaron puntos de control en la reconstrucción de ningún modelo tridimensional, es decir, la reconstrucción se hizo libre, y después se comparó los resultados a con los puntos de chequeo.

Nube de puntos LiDAR

Intentaremos analizar la nube de puntos lo más cruda posible, es decir, sin un alto nivel de procesamiento una vez esta ha sido generada. Aun así, consideramos que es correcto, aplicar a la nube de puntos la corrección de líneas de vuelo o “Strip Align”. Esta herramienta es muy útil en vuelos de tipo área, y arreglara en buena parte cualquier problema de calibración o error inercial de la trayectoria.

Tabla 7: RMSE de la nube de puntos LiDAR

Flight	X (m)	Y (m)	Z (m)
TV540 60m 6ms	0.005	0.016	0.007
TV540 120m 6ms	0.011	0.014	0.026
TV540 120m 12ms	0.014	0.020	0.008
L2 60m 6ms	0.018	0.012	0.008

L2 120m 6ms	0.016	0.032	0.012
L2 120m 12ms	0.011	0.022	0.028

De esta tabla podemos obtener que los resulta que los dos sensores obtienen mejores precisiones al volar a 60 metros que al volar a 120 metros. Los errores obtenidos coinciden con los errores presentados por los fabricantes de los sensores, Geocue y DJI. Es cierto que algunos valores están por encima de lo establecido por el fabricante. Hay que tener en cuenta la dificultad de medir una diana en la intensidad a 120 metros de altura, lo que puede haber añadido algún error grosero.

- TV540→Scanner performance: Accuracy 15mm (Geocue, 2024)
- DJI L2→Precisión del sistema: Horizontal 5cm, Vertical 4cm (DJI Enterprise, 2024)

Ortofoto

La única ortofoto analizada será la de los vuelos a 120 metros a 6 metros por segundo. Una de las razones por las que no analizaremos los otros 4 vuelos es por el coste en tiempo de procesamiento. Sin embargo, podríamos extrapolar los resultados si analizamos los resultados como el error en pixeles o GSD, hablando del error comparativo de varios vuelos a 120 metros y 60 metros de altura, ya que hay una relación lineal entre la precisión absoluta en el suelo y la altura de vuelo (Mostafa, 2017).

Tabla 8: RMSE de la ortofoto

Flight	X (m)	Y (m)
TV540 120m 6ms	0.006	0.014
L2 120m 6ms	0.032	0.024

Teniendo él cuenta a 120 metros el GSD en foto del TV540 es 2.1cm y L2 es 3.2cm.

Tabla 9: Error en GSD

Flight	X (m)	Y (m)
TV540 120m 6ms	<1	<1
L2 120m 6ms	1	1

Con esto podríamos extrapolar que, para un vuelo a 60 metros, la precisión rondaría para el TV540 1.1cm y para el L2 1.6cm.

7.1.2. Grosor de la nube de puntos

En esta sección analizaremos el grosor de la nube o “point cloud noise envelope/peak to peak error” usando como referencia el estándar del ASPRS.

Es decir, mediremos el grosor de la nube de puntos en zonas llanas, para una sola línea de vuelo y para una zona de con múltiples líneas de vuelo (ASPRS, 2024).

Seleccionaremos una zona plana del vuelo y calcularemos el grosor medio. Esta área cubre 112 metros cuadrados.



Figura 55: Zona de análisis del grosor de la nube de puntos

Para analizar el grosor en la zona de solape, usaremos la nube de puntos ajustada por “Strip Align”.

Tabla 10: Grosor nube de puntos área valor numérico

Sensor	Múltiples líneas de vuelo		Sola línea de vuelo	
	Range	StdDev	Range	StdDev
TV540 60m 6ms	0.019	0.007	0.015	0.007
TV540 120m 6ms	0.027	0.009	0.026	0.008
TV540 120m 12ms	0.019	0.008	0.019	0.008
L2 60m 6ms	0.031	0.012	0.029	0.011
L2 120m 6ms	0.107	0.024	0.052	0.021
L2120m 12ms	0.049	0.022	0.029	0.017

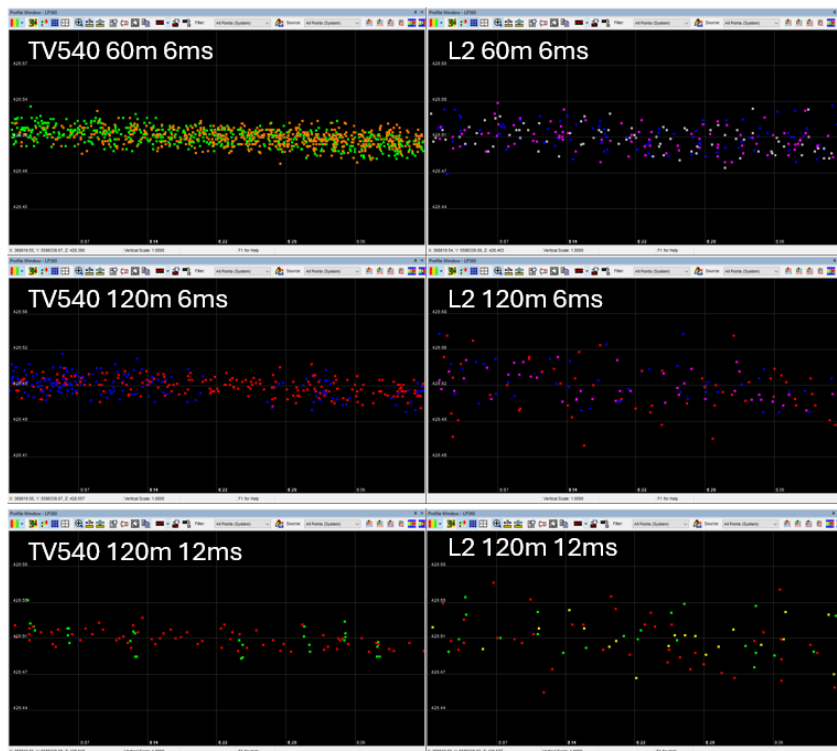


Figura 56: Comparativa grosor nube de puntos múltiples líneas, corte transversal 0.3m

Al analizar el ruido, podemos ver que el L2 en general tiene un ruido que es de 2 a 3 veces más grande que el TV540.

7.1.3. Definición de objetos

En esta sección veremos cómo se definen los objetos en la nube de puntos. El concepto de definición o conformidad es abstracto. En fotogrametría está conectado a la resolución, que es una combinación entre el GSD y la borrosidad (“image smear”). En LIDAR el concepto de definición, está conectado directamente a la divergencia del láser, o a la huella del láser.

En todas las comparativas usaremos la nube de puntos corregida con “Strip Align”. Y la vista será por líneas de vuelo.

Recordar que el TV540 tiene según el fabricante una divergencia del láser de 0.66×0.66 mrad $1/e^2$, y el L2 1.2×0.4 mrad $1/e^2$.

Plano

El primer objeto para comparar será uno relativamente plano. En este caso un tejado. El corte transversal es de 10 cm.



Figura 57: Vista del corte transversal – Plano

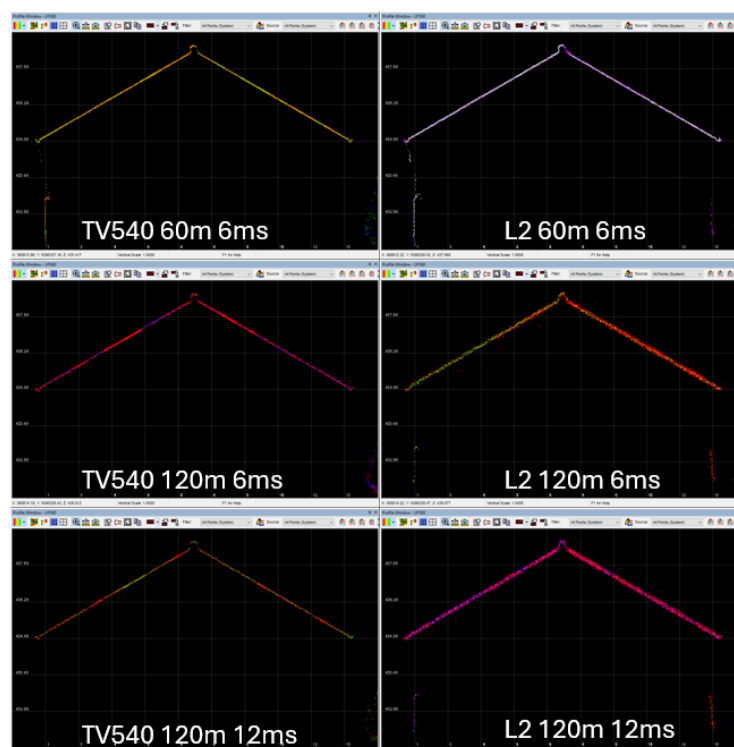


Figura 58: Comparativa tejado, corte transversal 0.3m

En esta comparativa vemos como el TV540 que tiene un grosor que es la mitad que el L2. La punta del tejado el 30x30cm aprox., esta se mantiene identificable en todos los vuelos, pero empieza a perder su forma con el L2 a 120m.

Tabla 11: Comparativa definición de objetos - Plano

Flight	Grosor (cm)	Comentario
TV540 60m 6ms	3	
TV540 120m 6ms	6	
TV540 120m 12ms	6	
L2 60m 6ms	5	
L2 120m 6ms	20	8 cm con picos de ruido
L2 120m 12ms	43	25 cm con picos de ruido

Torre

La siguiente comparativa será un poste eléctrico. Para ello se hizo un corte transversal de 1.5 metros para abarcar todo el poste, este es 10x2x0.3metros aprox.



Figura 59: Localización del poste



Figura 60: Vista del poste TV540 60m 6ms

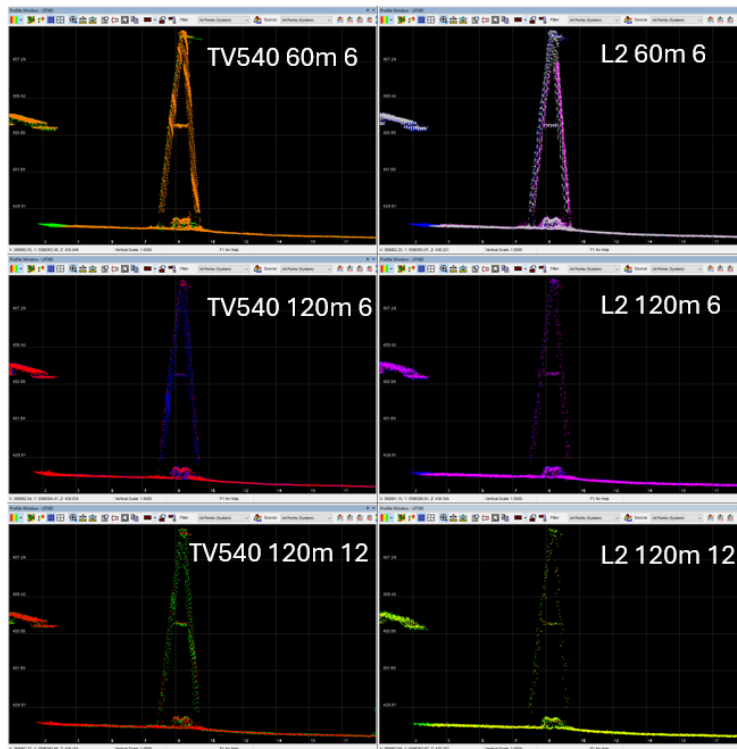


Figura 61: Vista del poste en la nube de puntos

En esta comparativa no solo afecta la huella del láser, sino también la densidad de nube de puntos. En general los dos sensores son capaces de registrar correctamente la forma del poste, pero sí que vemos que el L2 tiene más problemas a 120m de altura.

Cables

La captura de cables es un trabajo complicado en general. Los cables tienden a ser finos, especialmente los que veremos. Este tipo de trabajo depende de la huella del láser, de la densidad de puntos, y muy importante del ángulo de incidencia del láser. Se realizó un corte transversal en la dirección del cable de 2 metros.



Figura 62: Localización de los cables

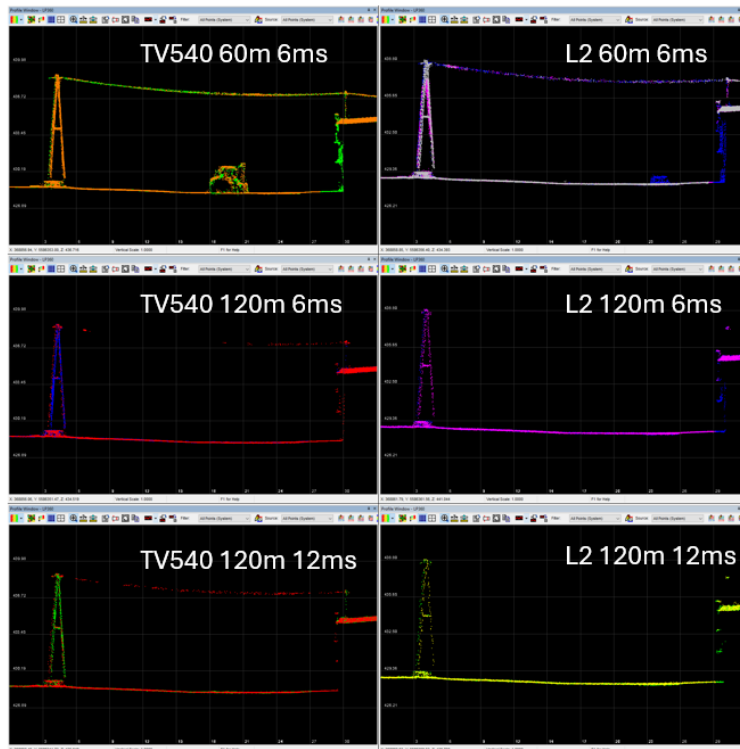


Figura 63: Comparación de cables en la nube de puntos

En esta comparativa vemos que los dos sistemas se pueden usar para inspección de líneas eléctricas. Vemos que los dos sensores son capaces de medir el cable en el vuelo a 60 metros (50 metros de distancia), pero que a 120 metros solo el TV540 es capaz de medirlo. Aquí se ve la importancia de la divergencia del láser. Si que es verdad, que vemos que el vuelo TV540 a 120m 6ms prácticamente no tiene puntos en el cable, en este caso habría que analizar el porqué, probablemente esté relacionado con el ángulo de incidencia. Aunque el TV540 haya sido capaz de tomar puntos en el cable a 120m, esta altura no sería recomendable en caso de tener que efectuar un trabajo consistente, ya que se ve que el sensor está al límite de sus capacidades.

Detalles finos

En esta sección veremos cómo se observa en la nube de puntos un objeto de 10x6 cm. En este caso es la forma del tejado. Este tejado tiene pequeñas ondulaciones cada ondulación es 10cm de largo por 6 de alto.

Una cosa a tener en cuenta con este detalle tan pequeño, es que cualquier algoritmo de suavizado o “smoothing” lo eliminaría, ya que estos algoritmos suelen identificar pequeños detalles como ruido.

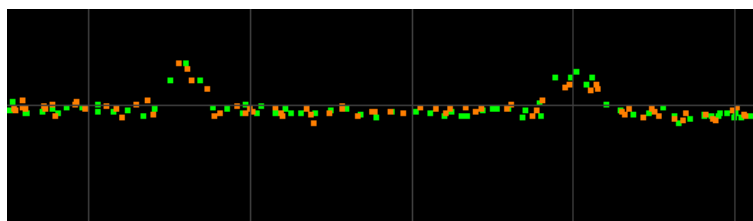


Figura 64: Ondulación del tejado



Figura 65: Vista del corte transversal - detalle 10x6cm

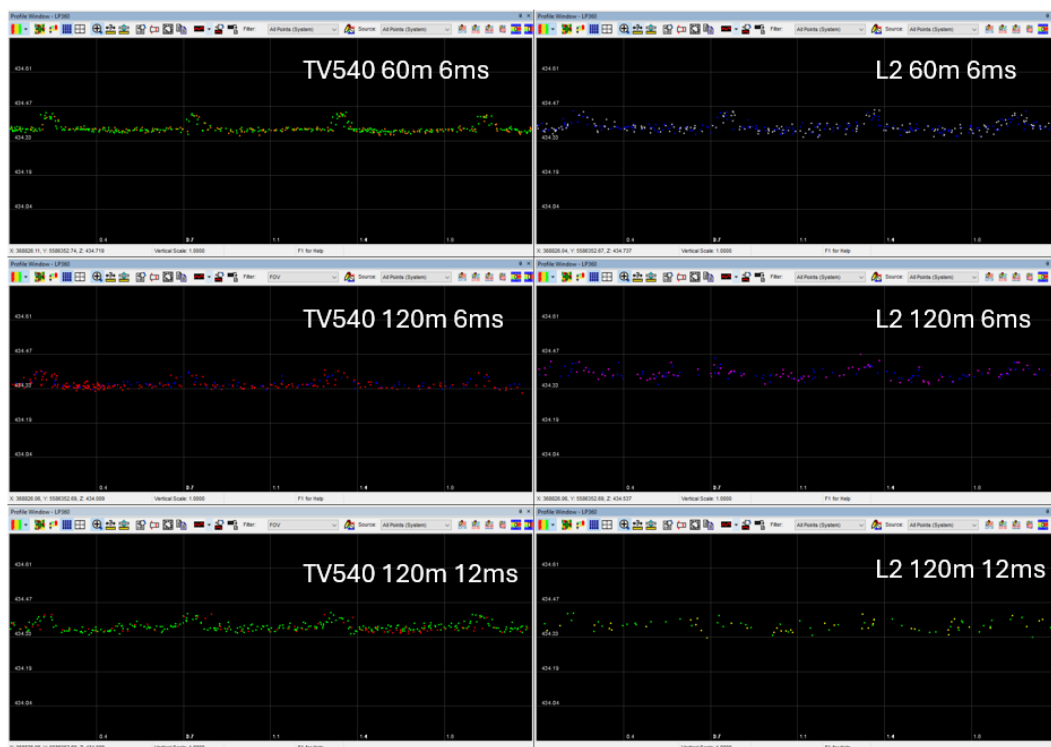


Figura 66: Corte transversal tejado, detalle fino

En este caso comparamos un objeto muy pequeño de 10x6cm, vemos que a 60 metros los dos sensores son capaces de modelarlo. Pero que a 120m es muy difícil, a esta altura la huella del TV540 es de 7cm ($120m - 7m$ del edificio = 113m), y la del L2 de 13x5cm.

7.1.4. Penetración de la vegetación

En esta sección analizaremos como la capacidad de penetración de la vegetación. Para esta comparativa se ha usado una sola línea de vuelo, y se ha analizado una zona 1400 metros cuadrados.

La zona elegida está prácticamente en el centro de las líneas de vuelo comparadas, de esta forma evitamos perder puntos por culpa del ángulo de incidencia. En la penetración de la vegetación, las propiedades más importantes del LiDAR son: Desviación del láser > Potencia del pulso de energía > PRR > Ecos registrados.



Figura 67: Area de vegetacion seleccionada

Corte transversal de 0.3 metros de anchura. Vista por ecos.

- Eco 1: Morado
- Eco 2: Amarillo
- Eco 3: Azul claro
- Eco 4: Rojo
- Eco 5: Verde
- Eco 6: Naranja
- Eco 7: Azul
- Eco 8: Gris

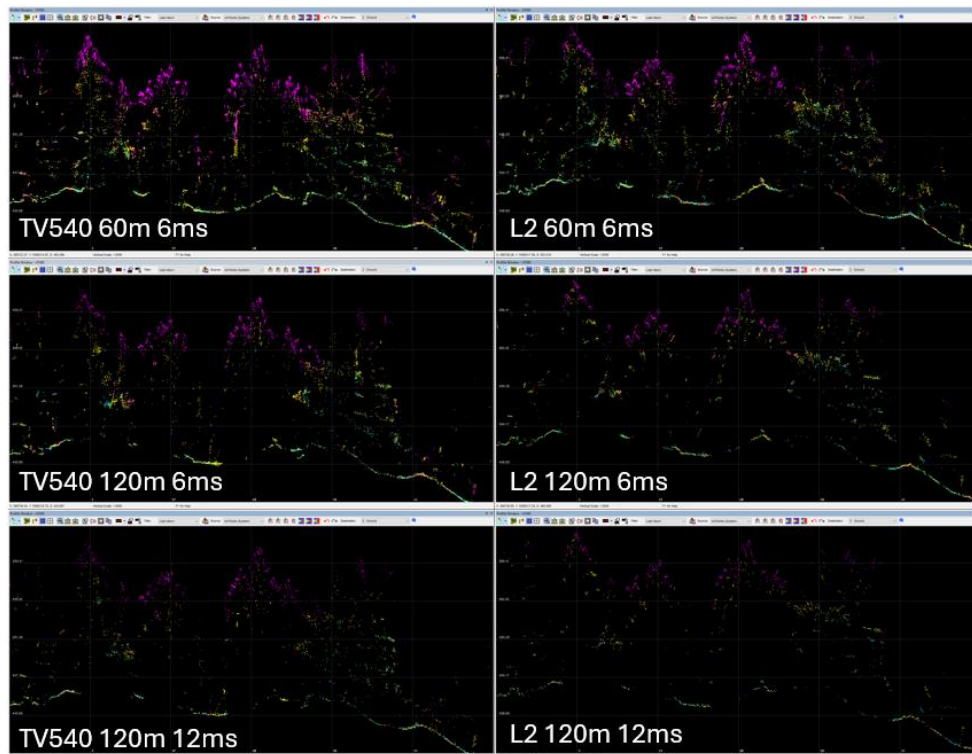


Figura 68: Penetración de la vegetación

Esta primera comparativa se centra en cuantificar cuantos puntos son capaces de llegar al suelo, es decir, cuantos puntos son capaces de penetrar la vegetación y todas las capas sucesivas hasta llegar al suelo. Para estas pruebas clasificamos manualmente el suelo, así reducimos cualquier error en la clasificación del suelo. Para esto reducimos la zona a comparar a la mitad, 700

metros cuadrados. La razón de que se use una zona más pequeña es el tiempo consumido en la clasificación manual.

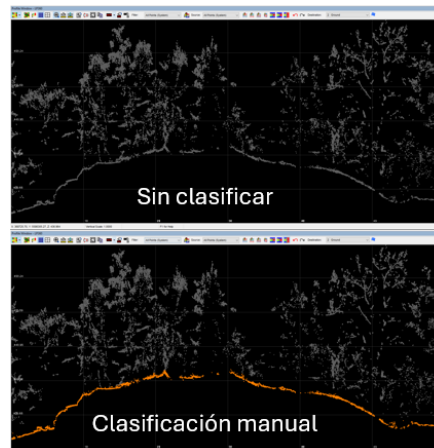


Figura 69: Clasificación manual del suelo 540 60m 6ms corte 0.3m

Vuelo	Pnt no terreno	Pnt terreno	% No terreno	% Terreno	Pnt total
TV540 60m 6ms	1,237,089	244,628	83	17	1,481,717
TV540 120m 6ms	558,536	122,553	82	18	681,089
TV540 120m 12ms	282,765	62,269	82	18	345,034
L2 60m 6ms	853,945	140,997	86	14	994,942
L2 120m 6ms	287,407	53,382	84	16	340,789
L2120m 12ms	145,619	27,111	84	16	172,730

En esta tabla podemos ver que el porcentaje de puntos que llega al suelo es el mismo para los 2 sensores, y no influencia la altura (mientras volamos dentro del rango del sensor), este porcentaje esta sobre el 17% de los puntos. Esto nos indica que para tener bien definido el suelo debajo de la vegetación el PRR o la densidad de puntos es clave, esto se consigue volando ya sea más bajo o lento.

A continuación, extraeremos más estadísticas, pero de una zona de 1400 metros cuadrados. En esta tabla nos centraremos más en ver cómo responde cada eco en la penetración.

Tabla 12: Estadísticas penetración de la vegetación

Vuelo	Pnt total	N ecos	% 1 eco	% 2 eco	% 3 eco	% 4 eco	% 5 eco	% 6 eco	% 7 eco
TV540 60m 6ms	3,020,948	7	55	31	11	2	0.24	0.01	0.00
TV540 120m 6ms	1,440,666	7	50	33	14	3	0.27	0.01	0.00
TV540 120m 12ms	728,387	7	49	33	14	3	0.28	0.01	0.00
L2 60m 6ms	1,527,945	5	48	31	15	5	1.05		
L2 120m 6ms	699,831	5	52	33	12	2	0.12		
L2120m 12ms	355,195	5	51	34	13	2	0.15		

En esta segunda tabla vemos que los 3 primeros ecos son los más importantes, ya que son los que mayor porcentaje de puntos engloban, es decir que mientras es importante el número total de ecos, no es el único valor a tener en cuenta.

Como hemos visto en las tablas, los valores más importantes es la potencia del láser y el número de puntos por segundo.

7.1.5. Trayectoria y alineamiento de líneas de vuelo

En esta sección intentaremos comparar los diferentes sensores de georreferenciación, poniendo énfasis en la comparación entre los vuelos a 6ms y 12ms. Ya que deberíamos ver una diferencia al estresar el IMU con altas velocidades.

Informe de calidad de la trayectoria

Los sensores L2 y TV540 generan informes de trayectoria con poco contenido. Esto quiere decir que poco podemos extraer del informe de procesamiento de la trayectoria.

Al procesar los vuelos del L2, podemos observar la sección “Pose Status”, en todas obtenemos el mismo resultado “Good” y el tiempo de la trayectoria pos procesada o “sbet”.

```
## Pose Status

| Status | Total Time Duration |
| :---: | :---: |
| Good   | 12.499 min |
| Bad    | 0.000 min |
```

Figura 70: Informe de procesamiento, DJI L2 120m 12ms

Para el sensor TV540, tenemos un informe con la calidad de la trayectoria, pero tampoco nos da toda la información deseada. Aun así, podemos extraer el tipo de solución y la diferencia entre “forward” y “reverse processing”.

Tabla 13: Resultados informes de trayectoria

Flight	Solution %			PDOP	Separation (m)		
	Fixed/Good	Float	No	AVG	Easting	Northing	Elevation
TV540 60m 6ms	99.26	0.74	0	1.113	0	0	0
TV540 120m 6ms	99.92	0.08	0	1.333	0.028	-0.008	0.036
TV540 120m 12ms	100	0	0	1.267	0	0	0
L2 60m 6ms	100	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A
L2 120m 6ms	100	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A
L2120m 12ms	100	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A

De la solución del TV540, podemos ver que el vuelo TV540 a 120m a 6ms, tiene una separación superior entre el procesamiento “forward” y “reverse”, esto afecta a la consistencia de la trayectoria pos procesada. Esta es altamente probable la razón por la que en varios de las comparaciones que hemos hecho, este vuelo no siempre ha dado una solución mejor que el vuelo a 12ms. Los valores no son alarmantes, ya que se siguen encontrando por debajo de los 4 cm* en cada eje.

*Nota del autor: entiendo que el valor está en metros, pero podría llegar a estar en grados, ya que el informe no muestra ninguna unidad, los valores vistos llegan a estar definidos con 5 decimales.

Comparación alineamiento de las líneas de vuelo

Una vez revisado los informes de procesamiento de la trayectoria, pasaremos a comparar como actúa cada sensor sin la corrección de “Strip Align”, esto quiere decir que cualquier problema con la trayectoria, o con la calibración del sensor se verá reflejada en la nube de puntos como un desalineamiento entre líneas de vuelo.

La calibración de un sensor LiDAR suele estar dividida en varias partes, las más importantes son:

- “Boresight angles”, estos son unos ángulos únicos para cada sensor, en los que se refleja la pequeña desalineación entre sensor de georreferenciación (posición del IMU) y el láser escáner.
- “Lever arms”, esta es la distancia en X, Y y Z, desde la antena hasta el láser escáner. Estos valores son compartidos por todas las unidades fabricadas de un mismo modelo.
- “Mounting angles”, esto es el ángulo de rotación del sensor de georreferenciación al laser escáner. Estos valores son compartidos por todas las unidades fabricadas de un mismo modelo.

No es posible acceder a ninguno de los informes de calibración de nuestros sensores. Así que no podremos analizar lo buena que es la calibración.

El segundo error que afectara a la alineación de líneas de vuelo es la calidad de la trayectoria, o el error inercial de la trayectoria, en este podemos sacar un poco de información de los informes de calidad de la trayectoria, pero estos al estar principalmente “vacíos” de contenido poco podemos obtener, aparte de que la trayectoria del vuelo TV540 120m 6ms es un poco peor que el resto de los TV540.

La comparación a continuación es sobre la nube de puntos georreferenciada con un corte transversal de 0.3 metros.



Figura 71: Edificio comparativa alineación

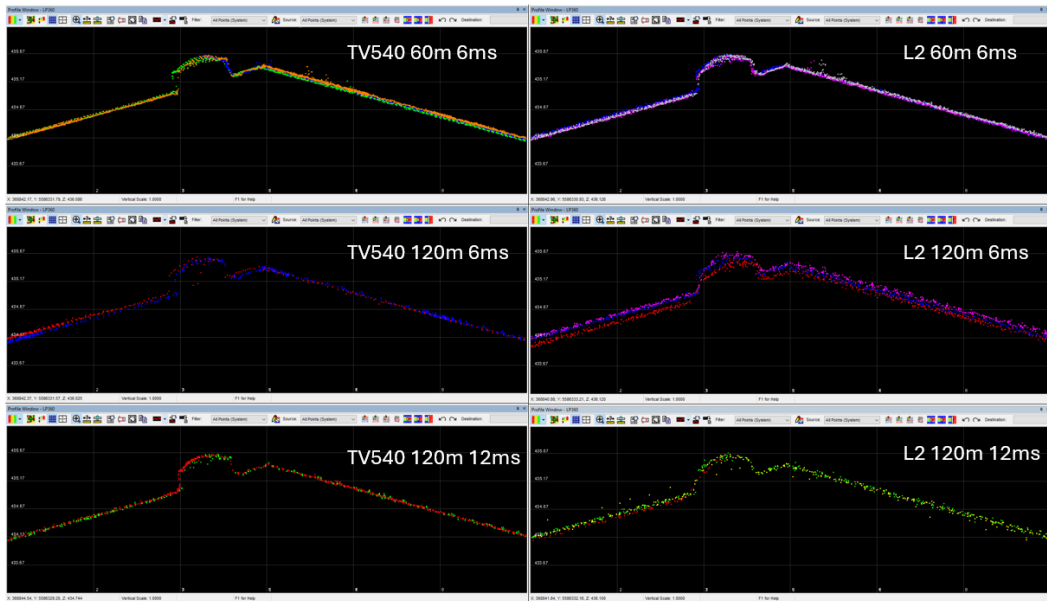


Figura 72: Comparativa alineamientos múltiples líneas de vuelo

Lo primero a tener en cuenta es revisar el grosor de la nube de puntos a comparar, ya que a más fina sea más se verá un desalineamiento. Recordamos por el análisis hecho en la definición de objetos que, en una línea de vuelo singular, el TV540 tiene un grosor de 3/6cm (60/120m) y el L2 de 5/20cm (60/120m). Al medir nuevamente el grosor de múltiples líneas de vuelo:

Tabla 14: Grosor de la nube de puntos

Vuelo	Múltiples (cm)	Sola (cm)	Comentario
TV540 60m 6ms	6	3	3 líneas
TV540 120m 6ms	11	6	2 líneas
TV540 120m 12ms	7	6	2 líneas
L2 60m 6ms	8	5	3 líneas
L2 120m 6ms	21	8	3 líneas
L2 120m 12ms	17	8	3 líneas, con picos de ruido

En la comparativa vemos que “Strip Align” hace un buen trabajo en general, siendo capaz de corregir el error en trayectoria, reduciendo errores, y indirectamente reduciendo el grosor de la nube de puntos, prácticamente dejándola a la altura del grosor de una sola línea de vuelo.

Aquí podemos ver que en efecto que los dos sensores tienen sensores de georreferenciación de diferente calidad. El TV540 se percibe más robusto, al prácticamente no cambiar la alineación con la velocidad y altura. Con el L2 se ve una diferencia mayor.

Esto es importante, ya que no siempre herramientas como “Strip Align” pueden ser usadas en la corrección de un vuelo, vuelos de tipo pasillo o “corridor mapping”, tienen a estresar en gran medida el IMU pero a su vez el poco número de líneas de vuelo impide muchas veces usar esta herramienta con efectividad, en estos casos el tener un sensor de georreferenciación de mayor calidad, influirá directamente en la calidad de los resultados obtenidos.

Sin embargo, esta prueba es inconcluso al intentar comparar el efecto de la velocidad con la alineación de las líneas de vuelo, ya que:

- TV540 obtenemos una mejor alineación en el vuelo de 12ms que 6ms. Y se observa una alineación parecida entre el vuelo 60m 6ms y 120m 6ms.
- L2 obtenemos también una alineación a 120 6ms es mala y a 120m 12ms hay pocos puntos a comparar.

Esta prueba se debería repetir con un mayor solape entre líneas de vuelo, y un mayor número de líneas de vuelo.

7.1.6. Otros valores

En esta sección compararemos otros valores de los sensores.

Densidad de puntos

La densidad de puntos es un valor que va directamente ligado al PRR (“Pulse repetition rate”), a la altura y a la velocidad de vuelo. Esto quiere decir que, a mayor altura, menor densidad de puntos y de la misma forma, a mayor velocidad, menor será la densidad.

Con estos datos podemos analizar los resultados esperados, con los resultados obtenidos. Las siguientes estadísticas se extrajeron de una línea de una sola línea de vuelo. La zona es de 112 metros cuadrados.

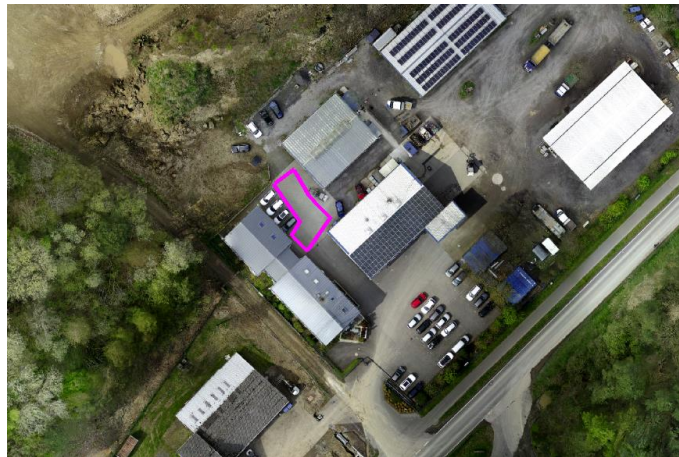


Figura 73: Estadísticas zona medida

Tabla 15: Estadísticas una sola línea de vuelo

Vuelo	N pnt	Densidad	% Esperado	% Obtenido
TV540 60m 6ms	73,696	655	100	100
TV540 120m 6ms	49,997	444	50	68
TV540 120m 12ms	25,857	230	25	35
L2 60m 6ms	43,665	388	100	100
L2 120m 6ms	21,861	194	50	50
L2120m 12ms	11,052	98	25	25

Tabla 16: Estadísticas múltiples líneas de vuelo

Vuelo	PntCnt	PntDen	% Esperado	% Obtenido	N líneas
TV540 60m 6ms	152,597	1,356	100	100	2
TV540 120m 6ms	92,775	824	50	61	2
TV540 120m 12ms	45,996	409	25	30	2

L2 60m 6ms	131,745	1,171	100	100	3
L2 120m 6ms	72,242	642	50	55	3
L2120m 12ms	43,654	388	25	33	3

De estas estadísticas concluimos que el TV540 al tener un PRR 2 veces más grande al L2, obtiene el doble número de puntos y el doble de densidad de nube de puntos.

De la misma manera, se puede ver que al aumentar por 2 la altura y dejar la velocidad constante, el número de puntos disminuye a la mitad. Vuelo a 60m y 120m.

Por último, al comparar dos vuelos a la misma altura, pero uno con el doble de velocidad, vemos que este tendrá también la mitad de los puntos. Vuelo de 120m 6ms y 120m 12ms.

Resolución RGB

La resolución de las fotos se puede definir como el tamaño del píxel en el suelo de cada foto (GSD) y su factor de borrosidad (“smear”). De esta manera podemos concluir que cuanto menor sea el GSD de una foto, mejor será su resolución o, en otras palabras, podremos identificar objetos más pequeños en la foto.

De la misma forma, la resolución de la ortofoto está ligada a la resolución de las fotos. Cuanto menor sea el GSD de las fotos, menor será el GSD de las ortofotos.

Por último, aunque esto es obvio, a mayor sea la altura de vuelo, mayor será el GSD de las fotos, y por consecuencia el GSD de la ortofoto.

Ahora pasaremos a comparar las 2 ortofotos generadas a 120m 6ms, con el TV540 y L2.

Tabla 17: Resolución RGB

GSD	TV540	L2	
Solape	80x42	80x48	Fron/Lat
GSD foto	2.1	3.2	cm
GSD orto	2.1	3.1	cm

De forma general el GSD de la ortofoto es siempre mayor a la media del GSD de las fotos, sin embargo, aquí no ocurre. Esto se debe a que no todas las fotos tienen el mismo GSD, sino que en la parte oeste de los vuelos el GSD es más pequeño que en la parte centro y este, por culpa del desnivel y de haber hecho un vuelo de altura constante sobre el nivel del mar.

Esto es sin duda algo que modifica las estadísticas del GSD real de la ortofoto, que, aunque el software lo ha generado 1:1 GSD foto y ortofoto, este no es real. Probablemente si hacemos zoom, veremos que los píxeles de la zona más baja del vuelo aparecen más borrosos que los de la zona alta.

En este caso se podría haber arreglado manualmente seleccionando, por ejemplo, el GSD de la ortofoto como dos veces el GSD de las fotos calculado, así sí que tendríamos una ortofoto con resolución homogénea.



Figura 74: Comparativa ortofoto TV540 y L2

Se puede comprobar al comparar las ortofotos, que el TV540 tiene una cámara de mayor resolución que el L2. Esto se define en el tamaño del GSD de la ortofoto, pero también en la nitidez de esta.

Al comparar las dianas, que son 0.8x0.8 metros, es más fácil distinguir el centro en el TV540. Al comparar los paneles solares, que son de 1.5x1 metro, podemos llegar a distinguir no solo el tamaño, sino el número de celdas interior y el doble marco exterior en el TV540, en el L2 podemos ver las celdas, pero no el doble marco exterior. Esto nos demuestra que el TV540 tiene un sensor RGB más potente que el L2.

7.2. Precio de las soluciones

Este tema se va a abordar de manera general, y no exhaustiva. Si alguien desea obtener un presupuesto de estos sistemas, lo ideal es que contacte con el distribuidor más cercano de Geocue y DJI. En este trabajo, hablaremos del coste de forma generalizada, de forma que podamos tener una estimación de lo que cuesta cada equipo.

Tabla 18: Tabla precios aproximados en euros, Junio 2024

Solución	TV540	DJI L2	Comentario
Plataforma	13346	13346	DJI M350
Sensor	52000	14280	
Receptor GNSS	2300	2300	CHC i83
Software incluido	LP360	Terra	LP360/Terra
Software procesamiento LiDAR	Incluido	7900*	LP360, Strip Align, Fotogrametry with Agisoft, DJI L2 processing. *Precio suscripción 2 años.
Total	67646	37826	Euros

Analizando el precio podemos ver que el DJI L2 es una solución mucho más económica que el TV540. Esto es una gran ventaja, ya que reduce la barrera de entrada en la tecnología LiDAR.

Por otra parte, tenemos que el DJI L2 se vende prácticamente desnudo, DJI Terra es un software muy básico, que no nos permite corregir ninguno de los datos producidos, es por ello que en este proyecto se trabajó en LP360 los dos sensores, usando las mismas herramientas.

Una vez concluido con la vista general del coste de las soluciones, podemos analizar en qué casos sería recomendable usar una solución u otra.

7.2.1. Usuario nuevo

Este tipo de usuario es nuevo con la tecnología, tiene dudas y no sabe cómo sacarle el máximo provecho. Lo ideal en general es optar por la solución más económica, ya que hay una curva de aprendizaje con todas las tecnologías.

Usuario nuevo con drones

A este tipo de usuario, no le recomendaría ninguna de estas soluciones, ya que no tiene experiencia con drones. Lo ideal sería empezar con una solución fotogrametría básica, tipo el DJI M3E.

Usuario nuevo en LiDAR

Este tipo de usuario tiene experiencia volando drones con fotogrametría, pero no en LiDAR. Le recomendaría la solución DJI L2 para empezar a tener experiencia con el sensor, y entender los límites de la tecnología.

7.2.2. Topografía general

Si un usuario, no es nuevo ni con drones ni con LiDAR. Entonces podemos analizar qué tipo de solución necesitaría para cada escenario.

- Si planea hacer proyectos, de zonas pequeñas (no más de 5 vuelos). El DJI L2 es la mejor opción.
- Si planea hacer levantamientos topográficos con bajos requisitos, por ejemplo, líneas de nivel cada 0.2m. O DTM con un espaciamiento de 0.5 metros. Entonces el DJI L2 es la mejor opción.
- Si, por el contrario, planea cubrir zonas grandes con proyectos de muchos vuelos, entonces la opción del TV540 es más interesante, ya que al ser más potente es también más eficiente y puede cubrir mayores áreas en menos vuelos.

7.2.3. Gestión forestal

Un tipo de trabajo común con la tecnología LiDAR, es la generar modelos tridimensionales de zonas boscosas, ya que el LiDAR tiene la propiedad de “ver” debajo de la vegetación. Esto hace que la tecnología sea muy usada en este tipo de trabajos.

Generación de MDT

En este caso, dependerá del tipo de vegetación. Si el usuario tiene planeado volar sobre bosque mediterráneo, las dos opciones son válidas. Si por el contrario, planea volar sobre bosque atlántico o selva, entonces el TV540 será más eficiente, ya que tiene más potencia y densidad de puntos para penetrar la vegetación.

“Vegetation encroachment” o inspección de vegetación cerca de torres eléctricas

Este tipo de trabajo suele conllevar vuelos de tipo pasillo, vuelos a variada altitud, y zonas complicadas de acceder. Aquí el TV540 sería la mejor opción, ya que el L2 estará limitado por la altura a la que puede modelar los cables, y penetrar la vegetación.

Cálculo de biomasa y segmentación de árboles

El cálculo de biomasa y segmentación de árboles, son dos tipos de proyectos complicados de realizar. Principalmente porque la diferenciación de un tronco desde un LiDAR aéreo no es fácil. En este caso la única opción sería el TV540, por la densidad de puntos generada, que ayudara a la segmentación individual de troncos y copas de los árboles.

7.2.4. Inspección de líneas eléctricas

La inspección de líneas eléctricas es un trabajo complicado, en el que se incluye el volar sobre zonas de alta radiación magnética, la detección de objetos muy pequeños (cables) y al mismo tiempo vuelos de tipo pasillo.

Al juntar estos 3 requisitos, el volar más alto ayuda considerablemente. A mayor sea la altura potencial de vuelo, menor será la interferencia magnética. Además, los vuelos de tipo pasillo ponen estrés en el IMU y reducen la efectividad de herramientas como “Strip Align”.

En este caso, lo ideal es usar el TV540. Aunque el DJI L2 se podría usar para líneas eléctricas pequeñas, por ejemplo, las que unen un generador con un vecindario.

7.2.5. Monitorización de deformaciones

En este caso depende del tipo de deformaciones que intentemos monitorizar. Pero en general cualquier objeto inferior a 10x10cm será muy difícil de identificar con un DJI L2. Esto hace el TV540 una opción mucho más atractiva.

7.2.6. Minería

En minería podríamos encontrar uso para los dos sensores.

Medición de material o “stockpiles”

Para este tipo de trabajo los dos sensores funcionarían, siendo más atractivo el L2 por su menor coste.

Monitorización del foso o “pit”

Dependerá de la profundidad de la mina, pero en general las minas suelen rondar una profundidad superior a los 100 metros. Para este tipo de trabajo el único sensor válido es el TV540 que puede funcionar hasta los 400 metros de distancia.

7.2.7. Otros usos

Agricultura de precisión

Los dos sensores funcionan. Si la extensión es pequeña el L2 es mejor, si las extensiones son grandes entonces el TV540 por su eficiencia a mayor altura y velocidad.

Monitorización ambiental

Medición de un terreno en dos estaciones diferentes, por ejemplo, una montaña antes y después que nieve. Para este uso los dos sensores son válidos, dependerá de la extensión de los proyectos.

Arqueología

Este tipo de trabajos requieren de la identificación de detalles muy pequeños, lo ideal es usar el TV540 que tiene una divergencia de laser menor y un sensor RGB de mayor potencia, juntando los dos se podrán revelar de forma más fácil patrones de estructuras arqueológicas.

Gestión de desastres naturales

Este tipo de trabajo conlleva mucho riesgo para la plataforma usada, y no se requiere de grandes precisiones. Lo ideal es el L2, ya que su coste es menor, y en caso de pérdida es fácilmente reemplazable.

Búsqueda y rescate

La búsqueda y rescate en zonas boscosas es muy difícil, la implementación de LiDAR en drones ayuda en la tarea, pero es complicada ya que requiere de mucha resolución debajo de la vegetación, y además suelen cubrirse áreas muy extensas. En este caso se podría usar los 2 sensores si se espera detectar objetos del tamaño de un coche. Pero si se espera detectar objetos menores, el TV540 tendría más posibilidades gracias a su densidad de puntos.

8. Conclusiones

En esta sección veremos las conclusiones de nuestro trabajo final de máster. Analizaremos los resultados obtenidos y intentaremos clarificar cuales de las mejores prácticas son más críticas de seguir, y como afectan a los sensores testeados.

Una de las primeras conclusiones que podemos llegar es que los dos sensores son diferentes, aunque comparten el mismo concepto de sistema (laser escáner, cámara y sensor de georreferenciación), la calidad entre ellos es diferente. El TV540 es un sensor de mayores prestaciones, mientras que el DJI L2 es un sensor con menores prestaciones, esto también está reflejado en el precio de cada solución, siendo el TV540 dos veces más cara que el DJI L2.

Durante el análisis técnico, vimos la importancia de la planificación del vuelo, ya que cualquier fallo en ella afecta directamente a los datos tomados. Así podríamos numerar:

- Mantenimiento de un solape mínimo, como vemos esto afecta a los 2 vuelos a 60 metros, en un proyecto, estos 2 vuelos tendrían que haberse repetido ya que muestran huecos

- en la parte superior del proyecto. Esto se podría haber solucionado usando una altura superior, o altura constante sobre el suelo (“terrain follow”).
- Solapes, como vimos debemos cumplir con los solapes recomendados (25% LiDAR y 80x40 cámara), al no cumplirlo la calidad de los datos bajar drásticamente, y se puede llegar a producir huecos en los datos.
 - La estación base, en este caso se usó una solución del VRS, hay una alta probabilidad que esto afectara a la calidad del vuelo TV540 120m 6ms. Confiar en estos servicios siempre conlleva un grado de incertidumbre, es mejor usarlos como medida de emergencia en caso de que falle la estación (nuestro caso).
 - Puntos de apoyo, aunque teníamos 6 puntos, la distribución no es ideal. Esto deja ciertas incertidumbres sobre cuál sería la precisión en los puntos más altos del proyecto. Ya que las dianas reflectantes estaban todas en un radio de 30 metros.
 - El tipo de vuelo fue de tipo área, y se ejecutó bien, ya que hay múltiples líneas de vuelo paralela y luego se añadió una perpendicular para ayudar con el ajuste de los datos.
 - La altura de vuelo, vemos que afecta a la toma de datos, y es uno de los valores más importantes, ya que aquí hablamos de calidad y precio de los datos. En general se debe volar un poco más bajo que la resolución u objetos a captar en el proyecto. En nuestro caso esto se demuestra en la densidad de puntos y la diferenciación de objetos pequeños.
 - Altura de vuelo para la captura de asfalto, esto viene dado por el rango del LiDAR para reflectividad del 20%. Los dos sensores lo cumplen, pero siempre hay que tenerlo en cuenta o aparecerán huecos en estos materiales.
 - La velocidad, la velocidad afecta en gran medida a la calidad de los datos obtenidos, como vimos, es mejor volar despacio que rápido.
 - Compromiso entre velocidad y altura, si se desea optimizar un vuelo, y estos dos parámetros están reñidos, es en general mejor aumentar la altura que la velocidad. Siempre que se cumpla con los requisitos del proyecto.
 - Densidad de puntos, la densidad de puntos varía según altura, velocidad y PRR del sensor. En este caso los dos sensores trabajan al PRR máximo que permiten, y esta suele ser la norma (los sensores están optimizados a volar a 120m). La recomendación aquí es hacer un vuelo lo más constante posible para obtener datos lo más homogéneos posibles.
 - Condiciones meteorológicas y radiación solar, en este proyecto las dos se cumplieron, pero en caso de que sean adversas, estas tienen un efecto directo en los datos capturados. Desde ruido en la nube de puntos, pero calidad en la trayectoria pos procesada, a mayor “smear” o borrosidad en las fotos...

También hacer una mención sobre las recomendaciones en el procesamiento:

- Se crearon copias de seguridad de los datos crudos, siempre hay que hacerlo ya que diversos programas pueden llegar a corromper estos datos durante su uso.
- Muy importante entender los sistemas de coordenadas o “CRS” usados. Un fallo en ellos se traducirá en un error al medir los puntos de apoyo, es crítico saber:
 - o El CRS de los productos finales
 - o El CRS de nuestra estación base
 - o El CRS de nuestros puntos de apoyo
- Procesamiento de la trayectoria, seguir las recomendaciones del fabricante, sobre todo es crítico hacer la maniobra de alineación de IMU. Revisar el tipo de algoritmo usado, y el informe de calidad. Cualquier fallo en la trayectoria se traduce en un error en los datos finales. Como vimos con el vuelo TV540 120m 6ms.
- Generación de líneas de vuelo, importante, sin ellas no es posible diferenciar problemas en la trayectoria y corregirlos. Sin ellas, tampoco es posible usar herramientas de tipo ajuste de líneas.
- Georreferenciación de las fotos, de forma clásica se generaba un archivo con la orientación externa, este archivo siempre incorporaba el CRS usado. Pero los nuevos sistemas suelen trabajar con información EXIF es decir guardan la posición de la foto dentro de ella. Cuidado con el CRS usado, y el CRS elegido en el programa de fotogrametría. Por defecto suelen elegir WGS84, pero no tienen por qué. También quiero mencionar que WGS84 tendrá el problema de elegir la época, las más comunes son 1997, 2010 y día de vuelo.

- Análisis y corrección del ajuste de líneas de vuelo, como vimos es muy importante, ya que puede llegar a reducir el grosor de la nube de puntos en a la mitad (L2 120m 6ms). Hay que mencionar que los vuelos tipo pasillo, tienen un uso reducido de esta herramienta.
- Generación de informe de calidad, lo ideal es siempre generar un informe comparando cualquier producto cartográfico con una referencia. Este informe debe contener la medición del punto de referencia, la medición en el producto cartográfico, la diferencia y estadísticas. También es importante mencionar la precisión del punto de referencia, e intentar descubrir si hay alguna desviación o “bias” con los productos generados. Este paso se debería también hacer en productos intermedios, como en nube de puntos pre-ajustada LiDAR, o durante el “bundle adjustment”, aerotriangulación y calibración de cámara en fotogrametría.
- También se mencionó en la investigación varias técnicas para la optimización de la ortofoto en estos sistemas, como el uso de cámara calibradas, el uso de la nube de puntos LiDAR (o MDE terreno + edificios) en vez de la nube de puntos “matching”. Por el gran tamaño del trabajo, no se pudo comparar los resultados. Pero en general se puede llegar a reducir el tiempo de procesamiento en un 50%, añadiendo ventajas como el mejor modelado de zonas boscosas, o la mejor representación de tejados de edificios.
- Aplicación de correcciones geométricas, antes de la clasificación y segmentación. Esto es obvio, pero se debe primero corregir la nube de puntos geoméricamente antes de realizar cualquier segmentación, esto se debe que la geometría de la nube de puntos puede afectar como las herramientas de segmentación funcionan. Cualquier modificación de la geometría puede afectar a la segmentación.

A continuación, mencionare algunas conclusiones sobre los dos sensores comparados:

- El TV540 es un sensor de mayor gama con mayores prestaciones, esto nos permite obtener mejores resultados que con el L2 a iguales parámetros de vuelo, o ser más eficiente si volamos con parámetros más altos, ya sea altura o velocidad.
- El DJI L2 es un sensor de gama baja, que es ideal para iniciarse con la tecnología LiDAR. Este sensor además tiene mucho margen de mejora, y un usuario veterano puede exprimir sus capacidades. Es cierto que es menos eficiente que el TV540, pero también cuesta la mitad. Además, permite al usuario empezar simplemente adquiriendo la plataforma y el sensor, y poco a poco añadir más piezas a la solución, como un programa profesional de procesamiento (Terra es muy limitado) o el añadir PPK con un receptor GNSS. Para vuelos pequeños y de tipo área es ideal. La limitación es cuando se pretende cubrir grandes extensiones, hacer vuelos de tipo pasillo o detectar pequeños detalles.

En general estas dos soluciones son ideales para su uso en drones, ya que son compactas y fácil de adquirir. Si se juntan con el programa LP360 Drone, entonces incluso empezar con el DJI L2 es más fácil, ya que ellos incluyen una capacitación gratuita en el manejo de estas soluciones y de LP360 Drone.

Siempre hay que tener en cuenta en la adquisición de soluciones la “economía de la precisión”, es decir, no siempre la solución más barata o cara es la ideal, la ideal es la que mejor se ajuste a los requisitos de tu proyecto y a la capacidad de adquisición de equipo. Una pequeña empresa siempre va a tener una gran barrera de entrada con el precio de nuevos sistemas, pero al mismo tiempo sino tiene el equipo adecuado puede llegar a hacer una doble inversión. Es por ello por lo que este análisis puede ayudar a nuevos usuarios a ver las diferencias entre sensores.

Para concluir, mencionar los proyectos exitosos son consecuencia de conocimiento, buenas prácticas, buenos sistemas y comunicación con el cliente. Saber en detalle los requisitos de un proyecto y las expectativas de un cliente son clave para elegir el equipo a usar. Saber cómo usar diferentes tecnologías y combinarlas, te ayuda a ser más eficiente. Por último, las buenas prácticas te ayudaran a no fallar en la toma de datos, y luego poder exprimir estos datos durante el procesamiento.

Es por todo ello que la elección de este proyecto fue mejores prácticas para el ultimo tipo de sensor generalizado (LiDAR + RGB compacto en drones), y luego se le añadió una comparativa de dos sensores para ver las diferencias de calidad. Espero que este trabajo final de máster pueda llegar a ser útil para usuarios y futuros usuarios de esta tecnología.

9. Limitaciones de la investigación

Esta investigación ha estado limitada por el alcance de los temas tratados, por los datos capturados y los sensores usados.

En primer punto que limito la investigación, es que esta se encuentra enmarcada como trabajo final de máster. Es decir, tiene una limitación en el tiempo invertido en ella. El tema para tratar era muy extenso, y se debía seleccionar bien donde invertir el tiempo limitado. Partes que se quedaron sin tocar fueron, la comparativa de otros productos cartográficos, como MDT, curvas de nivel o segmentación de nube de puntos. Comparativa entre flujos de trabajo, como ortofotos con fotogrametría pura vs ortofotos con nube de puntos LiDAR. Análisis técnico de por ejemplo, un vuelo procesado en cruz, con un vuelo en una sola dirección y un vuelo en una dirección con línea de vuelo perpendicular. Estos son algunos ejemplos de la limitación por el tipo de tema a tratar, por tener un referente, la guía de mejores prácticas con drones del ASPRS incluye más de 26 páginas.

Otro limitante, fue el tipo de solución usada, en este caso se optó por comparar dos sensores, pero se podrían haber incluido muchas más. Soluciones con láser escáneres producidos por RIEGL, Hesai, Optech, Velodyne, Triple In... Con diferentes cámaras, otras cámaras comerciales, cámaras oblicuas, cámaras métricas como las PhaseOne... O con diferentes sensores de georreferenciación, como Aplanix, SGB Systems...

El análisis, al final también ha sido limitado por la toma de datos, ya que esta no fue perfecta, y eso afecto a que no pudiéramos dar conclusiones a test como del sensor de georreferenciación, que los datos no fueran homogéneos por el solape en la zona elevada, o que la distribución de las dianas reflectantes fuera limitada. También la cantidad de vuelos se podía haber distribuido de otra forma, por ejemplo, añadiendo un vuelo a baja altitud con alta velocidad, o cambiando los solapes laterales usados.

Por último, añadir posibles investigaciones futuras, basándose en el trabajo hecho.

- Si se continua con los datos en los que me base, se podrían añadir los vuelos de los sensores fotogramétricos a la ecuación, ampliando los resultados y comparando diversos flujos de trabajo. También se podría analizar diferentes tipos de vuelo, cambiando las líneas de vuelo generadas, por ejemplo, se podría analizar el vuelo E-O al N-S.
- Si se repitiera la toma de datos, entonces revisaría la planificación del vuelo para hacerla con “terrain follow”, también cambiaria la distribución de las dianas, y añadiría puntos de apoyo. A todo esto, me aseguraría de tener una estación base trabajando durante todos los vuelos. Por último, haría una mejor revisión de datos en campo o “field QC”, para asegurarme que todos los datos obtenidos son de la mejor calidad
- Si se quisiera continuar con datos diferentes, entonces lo enfocaría en ampliar como diferentes sensores actúan en diferentes condiciones, por ejemplo, estresando el IMU con vuelos de tipo pasillo, zonas con desniveles y zonas llanas, o intentaría juntar varios vuelos con y sin solape, para ver cómo reacciona cada sensor.

10. Bibliografia

- Alsadik, B. (2020). Flight Planning for LiDAR-Based UAS Mapping Applications. *International Journal of Geo-Information*, 19.
- ASPRS. (2024). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data Edition 2, Version 2 (2024). doi:<https://doi.org/10.14358/pers.89.10.589>
- Casella, E. (2020). Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. *Geo-Marine Letters*, 14. doi:<https://doi.org/10.1007/s00367-020-00638-8>
- Corte, A. (2020). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. *Remote sensing*, 15. doi:10.3390/rs12050863
- DJI Enterprise. (2023). *Zenmuse L2 User Manual v1.0 ES*. Retrieved from https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_L2/20231110/Zenmuse_L2_User_Manual_v1.0_ES.pdf
- DJI Enterprise. (2024). *DJI Zenmuse L2*. Retrieved from <https://enterprise.dji.com/es/zenmuse-l2/specs>
- DJI Enterprise. (2024). *Specs M350. DJI*. Retrieved from <https://enterprise.dji.com/es/matrice-350-rtk/specs>
- García, J. (2002). *Fotogrametría moderna: Analítica y digital*. Universitat Poliècnica de València.
- Geocue. (2024). *Flight planning*. Retrieved from Geocue Support Knowledge Base: <https://support.geocue.com/flight-planning-lidar/>
- Geocue. (2024). *TrueView 540*. Retrieved from <https://geocue.com/sensors/drone-lidar/trueview-540/>
- Graham, L. (2012). *ASPRS*. Retrieved from The LAS 1.4 Specification: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_Specification.pdf
- International GNSS service. (2024). *IGS*. Retrieved from Products: <https://igs.org/products/>
- LP360. (2024). *LP360 Drone Users Guide*. Retrieved from Geocue Knowledge Base: <https://support.geocue.com/lp360-drone-users-guide/>
- Milla, J. C. (2023). *Pontos de controles. Um cafe com Jaume*.
- Mostafa, M. R. (2017). Accuracy assessment of professional grade unmanned systems for high precision airborne mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w6-257-2017>
- Nex, F. (2022). UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 28.
- NOAA. (2024). *Space weather and GPS systems*. Retrieved from <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/space-weather-and-gps-systems>
- Raid, A. (2015). INTEGRATING UAV INTO GEOMATICS CURRICULUM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4.
- RIEGL. (2004). *Reflectivity of Various Surfaces / Materials*. Retrieved from http://www.riegl.co.at/distancemeters_/distancemeter_applications_/notes_/e_gi004.htm
- Trimble. (2017). *TRIMBLE CENTERPOINT RTX POST-PROCESSING FAQs. Positioning Services*. Retrieved from <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-792295/TAP201606-0017-FAQ%20-%20Frequently%20Asked%20Questions%20-%20Trimble%20CenterPoint%20RTX%20Post-Processing.pdf>

Wagg, D. (2012). *Control Point Comparison QA-QC Analysis*. Retrieved from GeoCue Support Knowledge Base: <https://support.geocue.com/control-point-comparison-qa-qc-analysis/>

11. Anejos

11.1. Ortofotos



Vuelo: TV540 120m 6ms
Escala 1:4500





Vuelo: TV540 120m 6ms
Escala 1:4500



11.2. Tabla de precisiones en la nube de puntos LiDAR

Todos los valores están expresados en metros

TV540 60m 6ms			Control			Measured			Residuals		
ID	Type	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
4	CB	368836.529	5586357.238	428.694	368836.534	5586357.212	428.696	-0.005	0.026	-0.002	
3	CB	368824.675	5586366.913	428.487	368824.679	5586366.912	428.489	-0.004	0.001	-0.002	
2	CB	368807.239	5586351.693	428.483	368807.232	5586351.681	428.476	0.007	0.012	0.007	
21	FK	368753.244	5586176.028	424.639			424.644			-0.005	
23	FK	368763.221	5586509.431	457.553			457.543			0.010	
24	FK	368817.799	5586342.145	428.601			428.591			0.010	
								Mean	-0.001	0.013	0.003
								Std	0.005	0.010	0.012
								RMSE	0.005	0.016	0.014
TV540 120m 6ms			Control			Measured			Residuals		
ID	Type	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
4	CB	368836.529	5586357.238	428.694	368836.516	5586357.220	428.671	0.013	0.018	0.023	
3	CB	368824.675	5586366.913	428.487	368824.665	5586366.897	428.469	0.010	0.016	0.018	
2	CB	368807.239	5586351.693	428.483	368807.228	5586351.692	428.454	0.011	0.001	0.029	
21	FK	368753.244	5586176.028	424.639			424.627			0.012	
23	FK	368763.221	5586509.431	457.553			457.521			0.032	
24	FK	368817.799	5586342.145	428.601			428.567			0.034	
								Mean	0.011	0.012	0.025
								Std	0.001	0.008	0.008
								RMSE	0.011	0.014	0.026
TV540 120m 12ms			Control			Measured			Residuals		
ID	Type	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
4	CB	368836.529	5586357.238	428.694	368836.549	5586357.209	428.701	-0.020	0.029	-0.007	
3	CB	368824.675	5586366.913	428.487	368824.688	5586366.922	428.485	-0.013	-0.009	0.002	
2	CB	368807.239	5586351.693	428.483	368807.238	5586351.676	428.483	0.001	0.017	0.000	
21	FK	368753.244	5586176.028	424.639			424.638			0.001	
23	FK	368763.221	5586509.431	457.553			457.541			0.012	
24	FK	368817.799	5586342.145	428.601			428.588			0.013	
								Mean	-0.011	0.012	0.004
								Std	0.009	0.016	0.007
								RMSE	0.014	0.020	0.008
L2 60m 6ms			Control			Measured			Residuals		
ID	Type	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
4	CB	368836.529	5586357.238	428.694	368836.550	5586357.212	428.708	-0.021	0.026	-0.014	
3	CB	368824.675	5586366.913	428.487	368824.690	5586366.921	428.495	-0.015	-0.008	-0.008	
2	CB	368807.239	5586351.693	428.483	368807.221	5586351.695	428.485	0.018	-0.002	-0.002	
21	FK	368753.244	5586176.028	424.639			424.636			0.003	
23	FK	368763.221	5586509.431	457.553			457.563			-0.010	
24	FK	368817.799	5586342.145	428.601			428.597			0.004	
								Mean	-0.006	0.005	-0.005
								Std	0.017	0.015	0.012
								RMSE	0.018	0.016	0.012
L2 120m 6ms			Control			Measured			Residuals		
ID	Type	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
4	CB	368836.529	5586357.238	428.694	368836.529	5586357.191	428.719	0.000	0.047	-0.025	
3	CB	368824.675	5586366.913	428.487	368824.687	5586366.887	428.484	-0.012	0.026	0.003	
2	CB	368807.239	5586351.693	428.483	368807.215	5586351.676	428.494	0.024	0.017	-0.011	
21	FK	368753.244	5586176.028	424.639			424.634			0.005	
23	FK	368763.221	5586509.431	457.553			457.548			0.005	
24	FK	368817.799	5586342.145	428.601			428.607			-0.006	
								Mean	0.004	0.030	-0.005
								Std	0.015	0.013	0.015
								RMSE	0.016	0.032	0.015
L2 120m 12ms			Control			Measured			Residuals		
ID	Type	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
4	CB	368836.529	5586357.238	428.694	368836.535	5586357.246	428.691	-0.006	-0.008	0.003	
3	CB	368824.675	5586366.913	428.487	368824.684	5586366.933	428.487	-0.009	-0.020	0.000	
2	CB	368807.239	5586351.693	428.483	368807.224	5586351.725	428.466	0.015	-0.032	0.017	
21	FK	368753.244	5586176.028	424.639			424.697			-0.058	
23	FK	368763.221	5586509.431	457.553			457.571			-0.018	
24	FK	368817.799	5586342.145	428.601			428.588			0.013	
								Mean	0.000	-0.020	-0.007
								Std	0.011	0.010	0.029
								RMSE	0.011	0.022	0.029

11.3. Tabla de precisiones en la ortofoto

Todos los valores están expresados en metros.

TV540 120m 6ms		Control		Measured		Residuals		
ID	Type	X	Y	X	Y	dX	dY	
4	CB	368836.529	5586357.238	368836.52	5586357.242	0.009	-0.004	
3	CB	368824.675	5586366.913	368824.667	5586366.934	0.008	-0.021	
2	CB	368807.239	5586351.693	368807.236	5586351.697	0.003	-0.004	
21	FK	368753.244	5586176.028	368753.249	5586176.048	-0.005	-0.020	
23	FK	368763.221	5586509.431	368763.215	5586509.446	0.006	-0.015	
24	FK	368817.799	5586342.145	368817.796	5586342.156	0.003	-0.011	
						Mean	0.004	-0.013
						Std	0.005	0.007
						RMSE	0.006	0.014
L2 120m 6ms		Control		Measured		Residuals		
ID	Type	X	Y	X	Y	dX	dY	
4	CB	368836.529	5586357.238	368836.566	5586357.215	-0.037	0.023	
3	CB	368824.675	5586366.913	368824.725	5586366.929	-0.050	-0.016	
2	CB	368807.239	5586351.693	368807.26	5586351.668	-0.021	0.025	
21	FK	368753.244	5586176.028	368753.233	5586176.065	0.011	-0.037	
23	FK	368763.221	5586509.431	368763.259	5586509.452	-0.038	-0.021	
24	FK	368817.799	5586342.145	368817.815	5586342.134	-0.016	0.011	
						Mean	-0.025	-0.003
						Std	0.020	0.023
						RMSE	0.032	0.024