



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE AGRIMENSURA



Control de exactitud planialtimétrica de MDT
y comparación de modelos topográficos en
una centralidad de Ciudad del Plata:
apoyo al estudio de escurrimiento superficial.

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Katherine Ruth Lesparre Almada

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE DE INGENIERO AGRIMENSOR.

TUTOR

Prof. Adj. Ing. Agrim. Luis Calderón . . . Universidad de la República

Montevideo, Uruguay
Marzo, 2020

Página de Aprobación

El Tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Proyecto de grado:

“Control de exactitud planialtimétrica de MDT y comparación de modelos topográficos en una centralidad de Ciudad del Plata: apoyo al estudio de escurrimiento superficial.”

Autor: Katherine Ruth Lesparre Almada

Tutor: Profesor Adjunto Ing. Agrim. Luis Calderón

Carrera: Agrimensura

Puntaje:

Tribunal:

Profesor (Nombre y firma)

Profesor (Nombre y firma)

Profesor (Nombre y firma)

Fecha: 9 de marzo, 2020

*A mi familia, a mis amigos y a todas aquellas personas
que estuvieron presentes, haciendo esto posible.*

Agradecimientos

En primer lugar agradezco al tutor de este proyecto, Profesor Ingeniero Luis Calderón, quien constantemente brindó su apoyo y dedicación para la consecución de este trabajo. Así también a los Profesores Ingenieros Hebenor Bermúdez y Roberto “Tito” Pérez Rodino, quienes siempre estuvieron a disposición ante dudas y consultas, así como al Ing. Rodolfo Méndez por el préstamo del VANT, que hizo posible que este proyecto sea tal cual es.

A los docentes del IMFIA, por su buena disponibilidad y aportes a la concepción de este proyecto. En este mismo sentido, al Ing. Agrim. Roberto Velazco quien mediante su conocimiento, y como parte de la Intendencia de San José, orientó en lo referente a la zona de estudio y otros aspectos.

A Facultad de Ingeniería y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por la confianza depositada.

A Ana mi madre, a María mi abuela y a mis tíos Lourdes y Julio, quienes en conjunto me apoyaron desde la infancia permitiéndome el privilegio de asistir a la Universidad, y de estar hoy culminando la carrera.

A Daniel mi padre y a Andrés mi hermano, quienes en vida nunca dejaron de creer en mí, brindándome un amor incondicional.

Por último, a todos los amigos, compañeros y colegas, que a lo largo de la vida me apoyaron para superar mis límites en todos los aspectos, en particular en el ámbito académico.

A todos, *gracias*.

Índice

| Secciones | Página |
|--|-----------|
| Resumen | 6 |
| 1. Introducción | 8 |
| 1.1. Motivación para la elección del tema | 9 |
| 1.2. Relevancia de la investigación | 10 |
| 2. Objetivos | 13 |
| 2.1. Objetivo General | 13 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 13 |
| 3. Estado del Arte | 14 |
| 4. Marco Teórico | 23 |
| 5. Zona de estudio | 25 |
| 6. Planteo y ejecución de actividades | 28 |
| 6.1. Determinación del área de estudio | 28 |
| 6.2. Control de calidad planialtimétrica del MDT urbano de IDE | 28 |
| 6.3. Elaboración de un MDT a partir de vuelo de VANT | 34 |
| 6.3.1. Planificación | 34 |
| 6.3.2. Trabajo de campo | 37 |
| 6.3.3. Procesamiento | 39 |
| 6.4. Perfiles | 41 |
| 6.5. Ejemplo de aplicación | 43 |
| 7. Exposición de resultados | 44 |

| | |
|--|------------|
| 7.1. Determinación del área de estudio | 44 |
| 7.2. Control de calidad planialtimétrica del MDT-IDE | 45 |
| 7.3. Elaboración de un MDT a partir de vuelo de VANT | 62 |
| 7.3.1. Planificación | 62 |
| 7.3.2. Trabajo de campo | 65 |
| 7.3.3. Procesamiento: Pix4D | 71 |
| 7.3.4. Procesamiento: GIS | 82 |
| 7.4. Perfiles | 92 |
| 7.5. Ejemplo de aplicación | 102 |
| 8. Análisis crítico e interpretación | 105 |
| 8.1. Control de calidad planialtimétrica del MDT-IDE | 105 |
| 8.2. Elaboración de un MDT a partir de vuelo de VANT | 109 |
| 8.2.1. Planificación | 109 |
| 8.2.2. Trabajo de campo | 110 |
| 8.2.3. Procesamiento: <i>Pix4D</i> | 112 |
| 8.2.4. Procesamiento: <i>GIS</i> | 124 |
| 8.3. Perfiles | 130 |
| 9. Conclusiones | 134 |
| Bibliografía | 139 |
| Glosario y Acrónimos | 143 |
| Índice de Figuras | 148 |
| Índice de Tablas | 153 |
| Anexos | 154 |

Resumen

El mal funcionamiento o la falta de infraestructura de drenaje pluvial a nivel urbano puede generar inundaciones, las que dependen del nivel de descarga de cada cuenca. Relevamientos de la Dirección Nacional de Aguas, arrojan que son más de 60 centros poblados en el país los afectados por este tipo de inundaciones, en particular Ciudad del Plata (San José) se encuentra entre ellos.

En este contexto, el objetivo general del presente proyecto es aportar insumos desde el área de estudio de la Agrimensura, para la solución del drenaje pluvial de una zona de Ciudad del Plata, con el doble objetivo de evaluar diferentes metodologías de levantamiento de datos, comparando sus resultados.

Específicamente se puso el foco en el control de calidad de los nuevos insumos topográficos aportados por el Vuelo Fotogramétrico Nacional (VFN), cuyos productos fueron librados al público general a fines del año 2019, en particular, el modelo digital de terreno (MDT) urbano; así como en su comparación con los productos obtenidos a partir de un vuelo de VANT y de relevamiento de perfiles GNSS.

Con este objetivo, por un lado fueron relevados mediante DGNSS-RTK más de 100 puntos, distribuidos aleatoriamente en la zona de estudio, para la aplicación del estándar NSSDA. Por otro lado, se realizó un vuelo de VANT a partir del que se generaron diversos MDT, al variar tanto la cantidad de puntos de apoyo utilizados como la cantidad de imágenes procesadas. Por último fueron relevados perfiles topográficos mediante DGNSS-RTK.

Mediante el estándar NSSDA se obtiene una exactitud planimétrica, tanto para el producto ortofoto como para el MDT, de 26 cm; y una exactitud altimétrica de 32 cm para este último, ambas a un 95 % de nivel de confianza. Al evaluar las diferencias en cota entre el MDT del VFN y el obtenido mediante vuelo de VANT, se obtienen diferencias con una media de 1 cm y desviación estándar de 20 cm. Entre otros resultados obtenidos.

Los resultados adquiridos dan la pauta de las mejoras que puede suponer la utilización de los nuevos recursos topográficos disponibles, mostrando al uso del MDT urbano de IDE, como una herramienta con mucho potencial.

1. Introducción

El presente proyecto de grado se enmarca en las actividades de culminación de la carrera Agrimensura (Plan 1997) dictada por Facultad de Ingeniería, Universidad del la República. En este informe se documentará el trabajo realizado desde junio de 2019 hasta enero de 2020, así como los resultados obtenidos y su análisis.

El objetivo general del proyecto es aportar insumos, desde el área de estudio de la Agrimensura, para la solución del drenaje pluvial de una zona urbanizada, con el doble objetivo de evaluar diferentes metodologías de levantamiento de datos, comparando sus resultados.

En particular, se plantea estudiar la exactitud planialtimétrica del modelo digital de terreno (MDT) urbano obtenido a partir del Vuelo Fotogramétrico Nacional (VFN) entre 2017 y 2018 por la IDE¹, en busca de qbrindar un insumo para evaluar su uso en el diseño de una solución de drenaje pluvial, en la zona de estudio.

Con este objetivo por un lado se relevan mediante DGNSS-RTK unos 100 puntos, distribuidos aleatoriamente en la zona de estudio, para la aplicación del estándar NSSDA. Por otro lado se realiza un vuelo de VANT² a partir del que se generan diversos MDT, variando tanto la cantidad de puntos de apoyo utilizados como la cantidad de imágenes procesadas; estos modelos se comparan entre sí y con el VFN 2018.

¹Infraestructura de Datos Espaciales.

²Vehículo Aéreo No Tripulado; también conocidos como Drone o UAV por sus siglas en inglés para Unmanned Aerial Vehicle.

Por último se relevan diversos perfiles con la misma técnica GNSS, en zonas donde, según el MDT de la IDE, se hallan divisorias de subcuencas; comparando los perfiles relevados con los obtenidos del modelo de la IDE y evaluando las discrepancias en la determinación de la divisoria de aguas.

Estos datos son de utilidad, en la actividad profesional del Ingeniero Agrimensor, a la hora de decidir si es necesario realizar un relevamiento de campo, o si las precisiones exigidas por el trabajo al que se enfrenta son suficientes para simplemente utilizar el modelo producto del nuevo Vuelo Fotogramétrico Nacional.

1.1. Motivación para la elección del tema

El mal funcionamiento o la falta de infraestructura de drenaje pluvial a nivel urbano puede generar inundaciones, las que dependen del nivel de descarga de cada cuenca. Dado que las cuencas urbanas son en su mayor extensión impermeables, se puede caracterizar a estas inundaciones como “rápidas” [9]. Los relevamientos de DINAGUA³ arrojan que son más de 60 centros poblados en el país los afectados por este tipo de inundaciones, de las cuales un 70 % se considera de grado medio o grave.

Este proyecto se desarrolla territorialmente en los barrios de Playa Pascual y Villa Olímpica, pertenecientes a Ciudad del Plata, departamento de San José. Allí es donde he vivido los últimos 19 años, tiempo durante el cual he experimentado cómo nuestra Ciudad y en particular estos barrios se ven afectados por inundaciones causadas por deficiencias de drenaje pluvial.

³Dirección Nacional de Aguas – Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA).

Con motivo de este proyecto, e interesada en hacer un aporte a la comunidad en donde vivo, tuve contacto con profesionales de la Intendencia de San José, en particular con el Ing. Agrim. Roberto Velazco, para conocer qué aportes desde la Agrimensura podrían ser de utilidad para la resolución de alguna de las problemáticas de la zona, en particular dentro del tema de drenaje pluvial. Muy amablemente el Ingeniero me orientó y concedió un reunión en donde pude conocer más sobre los proyectos que está llevando a cabo la Intendencia en la Ciudad actualmente, en materia de drenajes.

De esta reunión surgió la zona de estudio, dado que es un área donde en el corto plazo las autoridades departamentales no tienen planificado intervenir, por lo que ir generando insumos y estudios en esa zona se valora como muy positivo. Particularmente esta zona necesita, toda, de un nuevo diseño de drenaje pluvial. En base a esto, el presente proyecto tiene por objeto, como se presentaba anteriormente: aportar insumos desde el área de estudio de la Agrimensura, para la solución del drenaje pluvial de una zona urbanizada.

1.2. Relevancia de la investigación

Conocer en qué medida los nuevos insumos topograficos existentes pueden ser utilizados para diseñar soluciones, tanto de drenajes pluviales, como de otras problemáticas, favorece la creación de proyectos civiles con estos objetivos. Esto se debe no solo a que reduce la necesidad de dedicar recursos en esta área, posibilitando su uso en otros rubros, sino que también facilita un primer acercamiento al análisis de cada zona, dado que estos datos son abiertos y de muy fácil acceso. Este primer acercamiento a la zona, si es fidedigno, puede ser un muy buen punto de partida para realizar diagnósticos precisos que re-

dunden en proyectos puntuales.

Este proyecto de grado se enmarca en esta dirección.

Más allá del uso del modelo topográfico de IDE, se evalúa el uso de nuevas tecnologías, como el VANT, para el modelado de la superficie topográfica. Este vuelo también persigue el objetivo de ser un insumo para poder evaluar, en cualquier tipo de trabajo, si “vale la pena” hacer un relevamiento fotogramétrico vía VANT, o si, utilizando el MDT de la IDE, las diferencias están dentro de las tolerancias del trabajo; economizando, agilizando y optimizando recursos.

Asimismo el vuelo de VANT se procesa con variantes en sus parámetros, desde un punto de vista de evaluación de la metodología empleada. El objetivo detrás de esto es conocer a qué resultados conduce cada variante, obteniendo un conocimiento que de otra forma sería difícil de lograr.

Por otra parte el estudio de perfiles topográficos es relevante dado que son una herramienta utilizada en los proyectos hidráulico-hidrológicos en general. De su estudio surgen dos objetivos que hacen su análisis interesante: por un lado comparar y conocer las diferencias entre el modelo de IDE y el relevamiento GNSS, evaluando la pertinencia de su uso para estos proyectos. Por el otro, conocer en general como Agrimensores si “vale la pena” ir a campo a relevar perfiles con topografía convencional, o si, obteniendo la información del modelo de la IDE es suficiente, por supuesto, dentro las tolerancias de cada trabajo.

Estas relevancias antes expuestas, son más allá del impacto social que pueda llegar a tener este estudio, si los insumos aquí desarrollados resultan un

aporte para las autoridades a cargo del proyecto de drenaje pluvial, u otros proyectos, en la zona de estudio.

Por último cabe destacar que todo el proceso de uso de VANT en este proyecto es un fin en sí mismo, dado que es algo con lo que no se trabaja durante la carrera (aún) pero que, sin embargo, es cada vez más común en la práctica profesional corriente del Ingeniero Agrimensor actual. Por lo que, a nivel de mi formación profesional, resulta sumamente enriquecedor.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Aportar insumos, desde el área de estudio de la Agrimensura, para el diseño de drenaje pluvial en una zona urbanizada, comparando diferentes metodologías de levantamiento de datos.

2.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar la exactitud posicional planialtimétrica del modelo digital de terreno urbano de la IDE para la zona de estudio, mediante el estándar NSSDA⁴. Diseñar y ejecutar un relevamiento de campo de 100 puntos GNSS.
- Elaborar un MDT por métodos de percepción remota: planificar y ejecutar vuelo de VANT; generar y controlar subproductos variando los parámetros de procesamiento. Comparar estos MDT con el de la IDE, tanto en altimetría como en pendientes.
- Relevar perfiles que, según el modelo de la IDE, incluyan divisorias de aguas y compararlos con los obtenidos en el MDT de la IDE.

⁴National Standard for Spatial Data Accuracy.

3. Estado del Arte

Para esta sección se realizó una búsqueda de publicaciones académicas que supusieran antecedentes para el presente trabajo. Si bien no se encuentran estudios que tengan objetivos exactamente en la misma línea, sí se hallan estudios relacionados, con alguna u otra característica en común, como estudios de precisión posicional de cartografía, o del uso de VANT en el estudio de inundaciones o como insumo para el diseño de obras civiles.

“Control de precisión posicional de la Cartografía Base de la Intendencia Municipal de Montevideo - Uruguay.”

M. Sc. Ing. Fabián D. Barbato (2002)

[1] En base a la necesidad de que un mapa, como fuente de información, sea un recurso confiable desde el punto de vista de la información temática y la precisión geométrica, el trabajo se propone desarrollar los conceptos teóricos necesarios, así como exponer el uso de un software específico para el control de la calidad de mapas, en particular para la determinación de precisiones geométricas y topológicas. Para ello utiliza testeos estadísticos y determina algoritmos capaces de producir parámetros de aceptación o rechazo de la cartografía a controlar, en este caso se trata de la cartografía 1:1000, base del Montevimap, el SIG de la Intendencia de Montevideo.

Este estudio incluye toma de puntos GNSS en relevamiento de campo, así como el uso de cartografía digital de comparación para la extracción de coordenadas de puntos de interés. De los casi 80 puntos relevados mediante DGNS, 51 de ellos fueron utilizados para los procesos siguientes, luego de las depuraciones estadísticas. Como resultado se obtienen errores en el entorno de

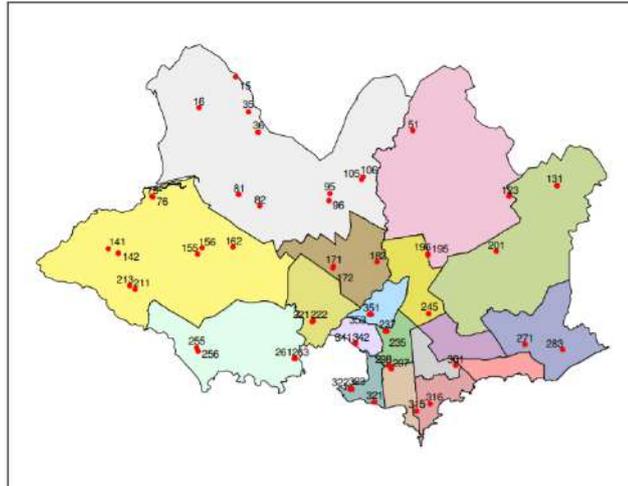


Figura 1: Distribución los puntos GNSS. Fuente [1].

lo 2 m para el 95 % de los casos.

“La importancia del modelo digital del terreno en modelos hidráulicos de crecidas.” Centro de Ciencias Medioambientales CSIC, Madrid (2004)

[2] En este estudio se analiza el efecto que tiene el insumo cartografía en los resultados derivados de modelos hidráulicos.

Con este objetivo se construyen siete modelos digitales de terreno, a partir de tres fuentes cartográficas: puntos relevados mediante GNSS (RTK - datos de terreno y batimetría), datos LiDAR de alta resolución (obteniendo un MDT de 1 metro de pixel) y curvas de nivel (cada 5 metros) en formato vectorial. Para cada uno de estos siete modelos se evalúan y comparan:

1. El caudal y la altura de la lámina de agua.
2. La sensibilidad relativa del modelo a cambios en la rugosidad de terreno
3. La delineación del área de inundación.

Los resultados del análisis indican la importancia de la base cartográfica utilizada, obteniendo por ejemplo, diferencias de 4,5 metros en la profundidad del agua y de un 50 % en la estimación del área inundada.

Se señala al modelo LiDAR como un importante medio para caracterizar llanuras de inundación, dada su adecuación para modelos hidráulicos, siendo económicamente viable para grandes áreas y ofreciendo resultados con bajo error cuadrático medio.

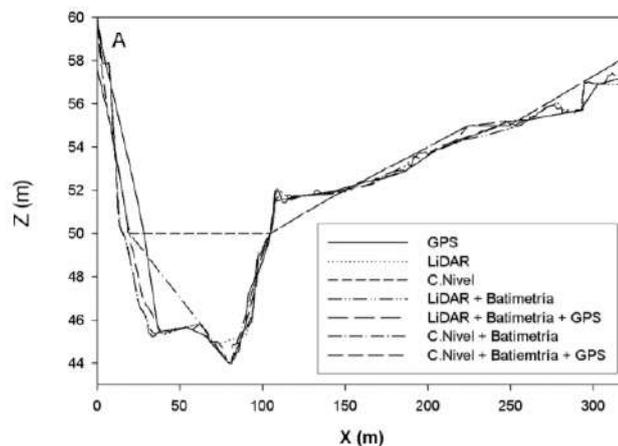


Figura 2: Ejemplo de sección transversal “representada por los diferentes modelos cartográficos, donde se observan importantes discrepancias en su representación”. Fuente [2].

“High-Resolution DEM Generated from LiDAR Data for Water Resource Management.” Centre for GIS, Monash University, Australia (2005)

[3] Este estudio parte de la base de la gran importancia que tienen los modelos digitales de terreno en el modelado hidrológico, afectando la precisión de cualquier característica hidrológica extraída.

Se plantea el uso de tres modelos: el primero “Vicmap DEM” producido a partir de la digitalización de cartas 1:25000 (con errores de horizontales de hasta 30m); el segundo, producto de un vuelo fotogramétrico y el tercero, a partir de datos LiDAR.

En el estudio se evalúan dichos modelos en cuanto a manejo de cuencas. Luego, para evaluar específicamente la mejora en la calidad de los productos hidrológicos extraídos que puede suponer el modelo LiDAR, se comparan los producidos por el Vicmap DEM (el modelo usado más comúnmente) y por el LiDAR.

Como resultado de última comparación se obtienen diferencias en alturas de hasta 65 metros en algunas áreas, donde además, las divisorias entre sub-cuencas también son significativamente diferentes y, a pesar de utilizar el modelo LiDAR en la misma resolución espacial que el Vicmap DEM, los resultados obtenidos por el primero resultan en unas definiciones de límites entre sub-cuencas mucho más detallada.

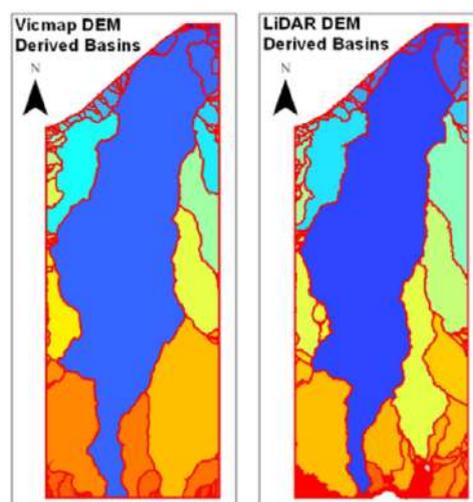


Figura 3: Límite de subcuencas derivados de Vicmap DEM y LiDAR DEM. Fuente [3].

“Diseño de un UAV para gestión de recursos hídricos.” Ing. Juan López (2017)

[4] El autor plantea un contexto en donde, a partir de la análisis actual de la situación de los recursos hídricos, diversos autores afirman que se darán graves problemas en su gestión en la próxima década; tanto a nivel global como local. Como solución se plantea el uso de la teldetección en tareas de supervisión y monitoreo de recursos hídricos.

A partir de esto se plantea como objetivo:

“ (...) la realización de un diseño conceptual de un UAV de ala fija para la toma de ortofotografías aéreas destinado a servir de apoyo para la toma de decisiones dentro de un sistema integrado de gestión del agua.”

(López, J. (2017) [4])

“El uso de las tecnologías de aeronaves no tripuladas en la prevención de desastres.” Matamoros, G. (2018)

[5] En este artículo el autor, en su calidad de integrante de la *Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE)* de Costa Rica, detalla los usos que se le da a la tecnología de vehículos aéreos no tripulados en el área de trabajo de dicha Comisión.

Estos usos incluyen mejoras en los mapas de amenazas naturales, actividades de inspección en casos de deslizamientos e inundaciones, identificación de áreas de inundación e inestables por deslizamientos, atención a emergencias, así como su uso para la elaboración de proyectos de obras civiles en el sentido de su prevención y la mitigación.

Este *CNE* adquirió un *Drone Phantom 3 Standard* en el año 2016, capacitando al personal de la *Unidad de Investigación y Análisis de Riesgo (UIAR)* para su uso.

“Modelo de elevación digital de alta resolución para identificar y evaluar zonas en riesgo de inundación: caso caña de azúcar.” Ing. Agr. Luis Ortiz Saenz (2019)

[6] Este estudio utiliza un modelo digital de terreno de alta resolución junto a un modelo de lluvia-escorrentía y datos pluviométricos para identificar y evaluar el área sembrada con caña de azúcar, que posee riesgo de inundación producto de las alteraciones que el cambio climático provoca en la distribución e intensidad de las precipitaciones (por ejemplo efectos como «El Niño» o «La Niña»).

Para este estudio se realizó un relevamiento mediante vuelo de VANT (de ala fija con cámara comercial de 24 Mpx) a 150 metros de altura, sobre una extensión de 206 hectáreas, con 80 % de solape y utilizando puntos de control. De esta manera se obtuvo un modelo de 0,19 metros de pixel, el cual es la base del posterior estudio hidrológico (Figura 4).

“Drone Based DSM Reconstruction for Flood Simulations in Small Areas: A Pilot Study.” Rinaldi, P., Larrabide, J. & D’Amato, J. P. (2019)

[7] El estudio presenta a los relevamientos del terreno mediante VANT como una solución de bajo costo y alta calidad para la simulación de inun-



Figura 4: “Identificación de zona en riesgo por inundación (2,6 ha). Las zonas en azul oscuro alcanzan profundidades de 1 m, mientras que, zonas en azul claro la lámina de agua es inferior a los 5 cm”. Fuente [6].

daciones, sobretodo para áreas urbanas, donde son necesarios más detalles y mayor resolución temporal.

Sobre esta base, los autores exponen el flujo de trabajo que implica la tarea de producir el modelo de inundaciones, partiendo, e incluyendo, el relevamiento mismo de los datos de campo.

Este modelado se llevó a cabo en una zona semi-urbana compleja, obteniéndose un modelo muy detallado que incluso reproduce pequeños charcos dados por depresiones del terreno.

Para la generación del modelo digital de superficie utilizaron un dron *DJI Phantom 4 Advance*, el software *Pix4Dcapture* en una plataforma *Android*. Se voló a una altura de 100 metros con un solape del 70 %, obteniéndose 584 imágenes en 24 minutos de vuelo. Para el procesamiento se utilizó el software «OpenDroneMap», un kit de herramientas *Open Source* para el procesamiento de imágenes aéreas.

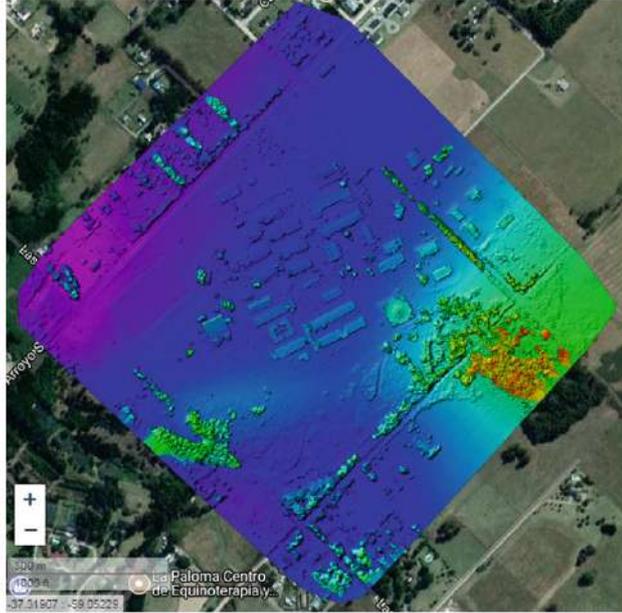


Figura 5: DSM generado sobre mapa base con imágenes satelitales de Google en WebODM. Fuente [7].

“Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tuluá – Río Frío.” Corredor Daza, J. G. (2015)

[8] Dados los avances en relevamientos mediante percepción remota, el autor plantea necesario realizar un estudio para determinar cuán eficiente son estos métodos a la hora de diseñar estructuras viales.

Con este objetivo es que se implementan dos modelos de elevación, uno obtenido vía VANT y el otro mediante topografía tradicional (con georreferenciación mediante GNSS), para el diseño de una vía de circulación. A partir de esta comparación el autor se propone resolver algunas interrogantes. Por ejemplo: “Determinar si el trabajo conjunto de estos dos métodos permite una

mejor interpretación de la información de la zona de estudio permitiendo un mejor desempeño a la hora de realizar el diseño de vías.”

El vuelo se realizó a 150 metros de altura con un dron *eBee* de ala fija. Se utilizó un traslape lateral del 80 % y longitudinal del 75 %, obteniéndose un modelo de 4 cm de pixel. Para su procesamiento se utilizó el software *Postflight Terra 3D-EB*.

Se concluye recomendando el uso de ambas técnicas en conjunto, presentado las ventajas de cada una de ellas a la hora de diseñar este tipo de proyectos viales.

4. Marco Teórico

Los fundamentos teóricos en los que se basa este proyecto fueron adquiridos en diferentes momentos de la carrera, en particular se destacan las siguientes unidades curriculares como base de este trabajo:

- Probabilidad y estadística (3° semestre)
- Sistemas de referencia (3° semestre)
- Ciencia, tecnología y sociedad (3° semestre)
- Computación 1 (4° semestre)
- Captura de datos por percepción remota (5° semestre)
- Fotogrametría (6° semestre)
- Topografía 3 (6° semestre)
- Caminos y calles 1 (7° semestre)
- Geodesia 1, 2 y 3 (7°, 8° y 9° semestre)
- Taller de datos espaciales y sistemas de información geográfica (9° semestre)
- Cartografía matemática (9° semestre)
- Sistemas de información geográfica avanzado (10° semestre)

En el Anexo 9 se hayan las formulaciones matemáticas de las herramientas estadísticas utilizadas, mientras que en el Anexo 9 se encuentran los procedimientos asociados a los controles posicionales llevados a cabo.

Los conceptos teóricos utilizados para la elaboración de este proyecto no serán expuestos como un capítulo en sí mismo, por entender que se encuentran altamente desarrollados en diversidad de textos académicos, así como en

proyectos de grado anteriores basados en los mismos principios teóricos, entre otros [23], [25] ó [26].

Por ejemplo, en el reciente proyecto de grado [26] (2019), se desarrollan todos los conceptos teóricos en lo relativo a: orientación interior, orientación exterior, aerotriangulación, planificación de vuelo, puntos de apoyo, control posicional, modelos digitales de terreno, GNSS, GNSS en vuelos fotogramétricos y proyecciones cartográficas.

5. Zona de estudio

El área geográfica a estudiar durante este proyecto se ubica dentro del departamento de San José y del área metropolitana de Montevideo. Se trata de una conurbación llamada desde 2006 “Ciudad del Plata” (ex-Rincón de la Bolsa), más específicamente se estudia dos de los barrios que la conforman: Playa Pascual y Villa Olímpica, estando el segundo bajo la fuerte influencia del primero, de hecho, si bien los barrios se diferencian en su conformación e infraestructura de bienes y servicios, comúnmente se los trata como un barrio único, donde se concibe a Villa Olímpica como una “continuación” de Playa Pascual.

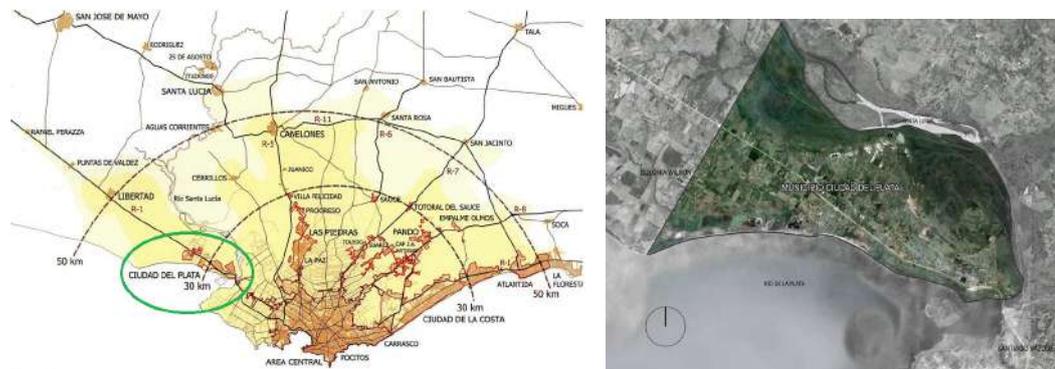
Municipio de Ciudad del Plata

Ciudad del Plata es una conurbación localizada en el límite sureste del departamento de San José, lindera a Montevideo y formando parte de su Área Metropolitana, dada su cercanía (Figura 6(a)-a). Se encuentra en promedio a 30km del centro de Montevideo y a 60 km de la capital departamental, San José de Mayo.

Este territorio está comprendido en la 3° sección catastral y la 6° sección judicial. Es una ciudad satélite de Montevideo, pero por sí misma es un polo industrial de plantas de montaje mecánico y automotriz, plantas procesadoras de semillas, alimentos, cueros para la industria automotriz, fertilizantes y productos químicos.

Su área es de más de 12 mil hectáreas, dentro de las cuales más del 20 % está ocupada con fraccionamientos urbanos que superan las 500 manzanas y 11 mil padrones. Cerca del 80 % de su superficie se caracteriza como rural,

además casi el 50 % de su área integra el SNAP⁵, Área Protegida Humedales de Santa Lucía.



(a) Ubicación dentro del Área Metropolitana.

(b) Municipio Ciudad del Plata.

Figura 6: Desde el año 2010 la Ciudad se define como el área comprendida entre el Río de la Plata, el Río Santa Lucía, el Camino 'Punta del Tigre' y su continuación hasta este último Río. Fuentes: [14], ISJ.

Se enumeran algunos de los barrios que conforman la ciudad: Delta El Tigre, Sofima, Villa Rives, San Fernando, Parque Postel, San Fernando Chico, Parque del Plata, Autódromo, SAFICI, Penino, Monte Grande, Las Violetas, Playa Linda, Santa Mónica, Santa María, Santa Victoria, Playa Pascual, Villa Olímpica, San Luis, entre otros.

Playa Pascual

Dentro del Municipio de Ciudad del Plata y sobre el lado Sur de la Ruta Nacional N°1 Brigadier General Manuel Oribe, a la altura del kilómetro 32 se encuentra el barrio «Playa Pascual». Su acceso se da a través de una rotonda en la Ruta N°1 “nueva”, rediseñada en 2019 a una rotonda cerrada, por una inversión del MTOP⁶ de más de 1 millón de dólares.

Playa Pascual es un barrio con características de balneario dado que es lindero a la costa del Río de la Plata, con playas aptas para el baño; su avenida

⁵Sistema Nacional de Áreas Protegidas.

⁶Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

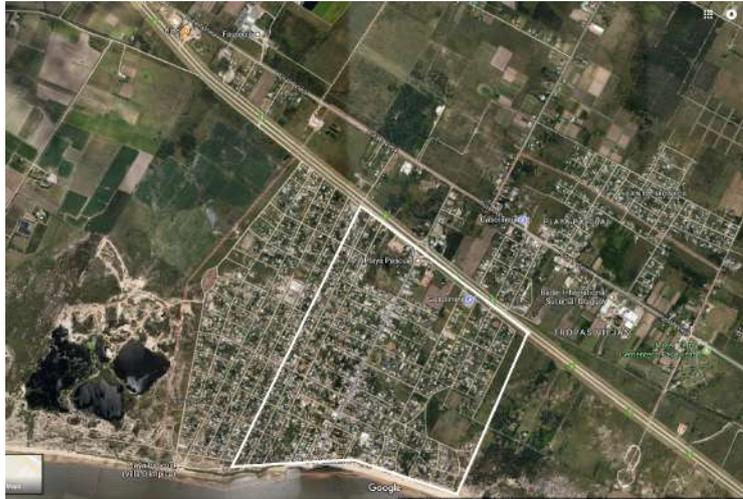


Figura 7: Ubicación de Playa Pascual en imagen satelital. *Google Earth*. Fuente: elaboración propia.

principal, la Avenida Río de la Plata, une la Ruta 1 nueva con la costa.

Villa Olímpica

El barrio «Villa Olímpica» se ubica al Oeste de Playa Pascual (Figura 8), linda al Oeste con una cantera de extracción de áridos, al Norte con la Ruta N°1 “nueva”, al Este con Playa Pascual y al Sur con el Río de la Plata.

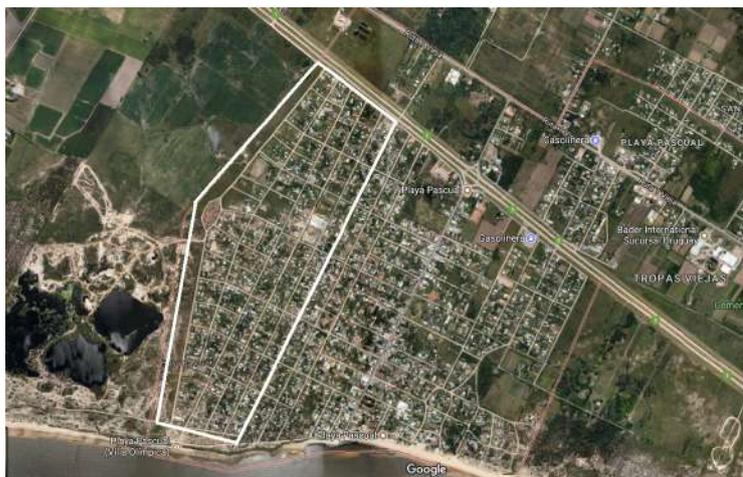


Figura 8: Delimitación de Villa Olímpica en imagen satelital. *Google Earth*. Fuente: elaboración propia.

6. Planteo y ejecución de actividades

En este apartado se plantearán las actividades realizadas y las metodologías llevadas a cabo para su ejecución.

6.1. Determinación del área de estudio

Si bien las charlas con el Ingeniero de la Intendencia de San José apuntaron a trabajar la totalidad del barrio «Villa Olímpica» y buena parte de «Playa Pascual», se decidió estudiar la totalidad de ambos barrios, ya que resulta en un estudio más integral de la zona, sin agregar complejidad al trabajo.

6.2. Control de calidad planialtimétrica del MDT urbano de IDE

Realizar el control de calidad planimétrico del MDT urbano de la IDE (MDT-IDE) equivale a realizar el control de la ortofografía obtenida durante el mismo vuelo, dado que ambos productos poseen la misma georreferenciación (este dato surge de consultas con profesionales de IDE, en particular con el Ing. Agrim. Germán Iglesias, quien muy amablemente estuvo abierto a responder todas las consultas que fueron surgiendo durante el proyecto sobre los productos del VFN). Esto determina que en esta etapa el producto a controlar sea un ortofografía.

De estudios de variabilidad del estándar NSSDA [10–12] llevados a cabo por Ariza López, F. J. y Atkinson, A. D. J., donde se evalúa el tamaño de la muestra en relación al nivel de confianza alcanzado, se desprende que es necesario contrastar al menos 100 puntos para que el estándar NSSDA llegue a un nivel de confianza efectivo del 95 % en su resultado.

Puntos a relevar En base a estas investigaciones, se plantea relevar 100 puntos, los cuales se sorteán al azar dentro de la zona de estudio mediante el software *QGIS* (v.3.6.3). Dado que en planimetría el producto a controlar es una ortofoto, cada uno de los puntos aleatorios se mueve, dentro de su entorno y lo menos posible, hasta hacerlo coincidir con un punto claramente identificable, bien definido y que pueda ser relevado mediante GNSS. El procedimiento de elección de estos puntos se lleva a cabo siguiendo las recomendaciones de la “Guía para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales” [13] del IPGH⁷.

Dado que el VFN es del año 2017-2018, y el relevamiento de campo se realiza a fines de 2019, es que para la definición de los puntos claramente identificables se utilizan imágenes satelitales actuales de *Google Earth Pro*, como herramienta adicional. De esta manera se chequea que los elementos que se visualizan en la ortofoto sigan existiendo actualmente y por ende, sus coordenadas sean relevables en campo.

En campo se da cierta flexibilidad en cuanto a los puntos a relevar, admitiendo relevar puntos cercanos a los planificados y no exactamente estos últimos. Esto se da por varios motivos, principalmente:

- Falta de definición de los objetos en campo (aunque aparentemente en la ortofoto sí lo eran).
- Inexistencia del objeto que se observa en las fotografías.
- Cambios en el arbolado que hacen probable que, durante el relevamiento GNSS del punto planificado, se incurra en error multicamino.

⁷Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

Dificultades en la elección de los puntos Dado que la mayor parte de los puntos aleatorios caía dentro de las manzanas, y dada la imposibilidad de invadir la propiedad privada para relevar, se decide sortear los puntos aleatorios en un polígono que no contenga la mayor parte de las manzanas. De este modo, el hacer que el punto aleatorio coincida con un punto claramente identificable, se hace más sencillo, teniendo que mover menor distancia el punto desde su posición aleatoria original, minimizando el posible sesgo que introduce el operador que elige los puntos bien definidos.

El bajo nivel de urbanización de algunos sectores del barrio, sobretodo en los literales, dificultaron encontrar puntos claramente identificables que sean pasibles de relevarse con GNSS tanto planimétrica como altimétricamente. Esto, junto al criterio de no relevar puntos demasiado lejos de los puntos aleatorios originales, llevó a que en algunos casos un punto a relevar se “dividiera” en dos puntos diferentes: uno utilizable para el control planimétrico y otro para el control altimétrico.

Diseño del caminamiento Una vez que la ubicación de los puntos a relevar estuvo bien definida, se procedió a diseñar el revelamiento de campo a modo de generar un caminamiento que optimice la distancia a recorrer. Para ello se modeló el problema como una red y se resolvió usando la extensión *Network Analyst* del software *ArcMAP* [15]. De esta manera se obtuvo el camino que es necesario seguir en campo, optimizando el procedimiento y ahorrando recursos.

Instrumental a utilizar Dado que se necesita relevar una alta cantidad de puntos no intervisibles y a una distancia media amplia, es que el uso de GNSS resulta acorde. Sin embargo, que su uso sea apropiado para el control de calidad vía estándar NSSDA implica que la precisión que logra este instrumento sea

del orden de 3 veces menor que la que se espera posea el objeto a controlar [16].

Por un lado, el orden de precisión que logra el equipo GNSS en modalidad diferencial RTK es centimétrico, más precisamente su precisión teórica es menor de 5 cm⁸ [25, p. 378]. Por otro lado, la exactitud planialtimétrica para las ortofotos urbanas de todo el país es de 0,2 m al 95 % de confianza y 0,3 m exactitud vertical al mismo nivel de confianza, si asimilamos este valor como la precisión de la ortofoto y MDT respectivamente, entonces la técnica DGNSS-RTK cumple con el requerimiento antes planteado.

Específicamente se utiliza el equipo GNSS *Leica Viva GS8* (Figura 9), préstamo del Departamento del Geodesia del Instituto de Agrimensura. Este consta de controladora, antena, bastón y baterías.



Figura 9: Equipo GNSS *Leica Viva GS8* utilizado en los relevamientos. Fuente [25].

⁸Considerando una base a no más de 30 kilómetros, como se aconseja en distintas secciones del mismo texto.

Trabajo de campo El relevamiento se lleva a cabo en dos jornadas, ambas desde la mañana hasta pasado el mediodía aproximadamente. La principal dificultad que se presenta durante el mismo es la pérdida de la señal RTK en los momentos que se da el desplazamiento entre un punto y otro a relevar, siendo este desplazamiento en automóvil (principalmente debido a las largas distancias a recorrer). Este efecto trae aparejado un mayor costo del insumo tiempo, dado por la espera a que se reinicie el RTK y que las precisiones bajen lo suficiente.

El método diferencial se aplicó conectándose a la CORS⁹ de Montevideo «UYMO» del servicio REGNA-ROU¹⁰ [18]. En general se ocuparon los puntos hasta llegar a una incertidumbre teórica en pantalla menor a 2 cm, además se tuvo cuidado de no seleccionar ubicaciones comprometidas en cuanto a error multicamino. Se relevaron el sistema de referencia WGS84 con proyección UTM21S (EPSG:32721) y cotas elipsoidales.

Procesamiento En primera instancia se procesan los datos relevados para llevarlos al mismo sistema de referencia de coordenadas (SRC) que los datos de la IDE, esto es planimétricamente en SIRGAS-ROU98 UTM21S (EPSG:5382) y altimétricamente cotas ortométricas referidas al geoide EGM2008 (EPSG:3855). Para esto se utilizaron los softwares de *ArcMAP* (v.10.5) y *Leica Geo Office* (v.8.4), respectivamente.

Luego se evalúan las diferencias en la coordenada X e Y entre los puntos relevados y los extraídos de la ortofotografía, y las diferencias en cota para los valores extraídos del modelo de elevaciones. Primero se realiza un análisis

⁹Continuously Operating Reference Station.

¹⁰Red Geodésica Nacional Activa - República Oriental del Uruguay.

estadístico de tres elementos principales: outliers o valores atípicos, normalidad y correlación. Para su análisis se aplicaron los siguientes tests, mediante el uso del software estadístico *Minitab* (v.19) y *GNU Octave*(v.4.2.1):

- Outliers: prueba de Grubbs, diagrama de cajas (rango intercuartil).
- Normalidad: prueba de Anderson-Darling, Ryan-Joiner (similar a la prueba de Shapiro-Wilk) y Kolmogorov-Smirnov.
- Correlación: coeficiente de Pearson y de Spearman.

Luego se calculan errores cuadráticos y se aplica el estándar NSSDA, estos cálculos se ejecutan en una planilla de *Excel* (v.2016). Asimismo se utiliza la Fórmula de Koppe para estudiar los efectos de las pendientes del terreno sobre el error medio en la componente vertical [24], para ello se utiliza un modelo de pendientes elaborado a partir del MDT de IDE mediante *ArcMap*.

Las formulaciones matemáticas de todas estos cálculos pueden encontrarse en los Anexos.

6.3. Elaboración de un MDT a partir de vuelo de VANT

6.3.1. Planificación

Instrumental En primer lugar es necesario verificar que se puede acceder al instrumental necesario, en ese aspecto el Ing. Agrim. Rodolfo Méndez tuvo la amabilidad de poner a disposición su Drone *Phantom 4 Pro* para su uso en este proyecto, brindando además útiles recomendaciones sobre su mejor uso.



Figura 10: Equipo VANT *Phantom 4 Pro* utilizado en el vuelo. Fuente: elaboración propia.

Elección de la zona a volar En este aspecto se decide volar una zona relativamente pequeña (unas 20 hectáreas), poco transitada y en donde haya ocurrido una alta tasa de cambios en la morfología de los terrenos, a nivel de rellenos y viviendas nuevas, por ejemplo.

La justificación de estas decisiones se basan en que dichas características traen las siguientes ventajas: permite volar toda el área de estudio con una sola batería; que se hallen pocos vehículos en movimiento por las calles y por ende

en las fotografías (lo que va en detrimento del modelo); posibilidad de evaluar si la desactualización del vuelo afecta sustancialmente el MDT producido o no.

Dentro de las zonas más tranquilas, esto es principalmente los litorales Este y Oeste, se comparan imágenes satelitales actuales de *Google Earth* con las ortofotos del VFN en busca de cambios del tipo antes mencionados. Una vez se encuentra la zona más adecuada, se define el polígono que la comprenda.

Planificación del vuelo La planificación inicial se realizó a través de la plataforma web *DroneDeploy* [19]. Si bien lo allí planificado, como las líneas de vuelo y los lugares de partida y llegada del VANT, no será ejecutado tal cual, se utiliza para tener una idea bastante acercada de las características del vuelo.

Seteando la altura de vuelo, los solapamientos y la velocidad del vuelo; se llegó a los datos aproximados de tamaño de *pixel*, tiempo de vuelo, cantidad de imágenes a capturar y cantidad de baterías a utilizar; todo esto para un área cubierta de 24 hectáreas.

Algunos de estos resultados cambian ligeramente al modificar la dirección de las líneas de vuelo.

La planificación definitiva, con la que se va a volar se setea el mismo día del vuelo, según las condiciones de momento, teniendo en cuenta por ejemplo el factor viento. Veremos esta configuración en detalle más adelante.

Puntos de apoyo y de control Distintas fuentes bibliográficas proponen distintas cantidades de puntos de control, ante esto se buscaron estudios que comparen diferentes distribuciones, entre ellas se destacan: “Estudio de las configuraciones de puntos de control terrestres para fotogrametría con dron.” [20], “The impact of number and spatial distribution of GCP on the positional ac-

curacy of geospatial products derived from low-cost UASs” [21], “Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points” [22]. Como conclusión se decide tomar una distribución de puntos distribuida homogéneamente sobre los bordes [21, 22] más una distribución de puntos homogénea en el interior del área [21]. En definitiva se toman ocho puntos en los bordes (esquinas y medios) y cinco en el interior (centro y diagonales).

Además de esta configuración de puntos de control, se plantea también utilizar la sugerida por los Ingenieros Martínez y Abbate en [23], conformada por cinco puntos, uno por esquina más uno central. En base a esta cantidad de puntos de control, se define relevar unos 20 puntos extra, a modo de cumplir con los criterios mínimos “clásicos” del estándar NSSDA (20 puntos). Para este procedimiento se utiliza el software *QGIS* (v.3.6.3).

En cuanto a la materialización de los puntos de apoyo: dada la presencia de calles en el borde y en el interior de la zona a relevar, se decide conveniente utilizar marcas en las calles. Estas se materializan mediante la técnica de stencil usando pintura en aerosol, en particular y por experiencia del tutor del proyecto se utilizan marcas con forma de “L”. El molde es un aporte del tutor, quien lo dona al Instituto de Agrimensura para trabajos posteriores, habiendo sido confirmada su eficacia en el presente proyecto. Esta “L” está formada por tres cuadrados de 21 cm de lado, siendo sus medidas totales 42 cm de lado y 1323 cm³ de área.

Elección de la hora del vuelo Con el objetivo de relevar en un momento donde el Sol se encuentre lo más vertical posible, se busca a qué hora sale y se oculta dicho astro ese día; estos horarios se suman y dividen a la mitad,

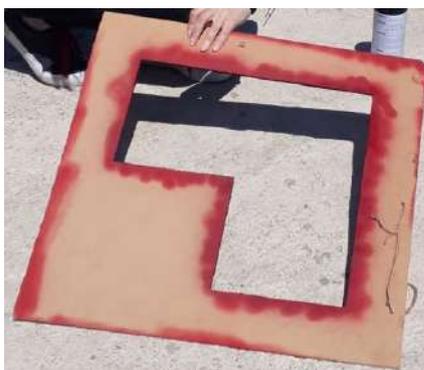


Figura 11: Molde utilizado. Fuente: elaboración propia.

obteniendo una hora de referencia para los trabajos de campo. El relevamiento de referencia se lleva a cabo el día 3 de noviembre de 2019.

6.3.2. Trabajo de campo

Vuelo de prueba En la mañana del día del relevamiento lo primero que se hace es un vuelo de prueba. El objetivo es, por un lado, probar el correcto funcionamiento del VANT y del software que lo controla, chequeando la calidad de las imágenes obtenidas y verificando la ausencia de cualquier error grosero. Otro objetivo implica hacer que el operador tenga un primer contacto con el software de vuelo y con la dinámica del procedimiento, evacuando todas las dudas que surgieren. Por otro lado, es parte del objetivo evaluar cualitativamente con qué calidad se observan las marcas que serán materializadas para los puntos de apoyo y/o control. Para ello se materializan dos marcas sobre pavimento, una al sol y otra la sombra. Especialmente se verifica que posean buen tamaño, forma, definición y buen contraste de colores. Se puso una marca a la sombra de un árbol para evaluar, en particular, cuán problemático sería que se diera dicho caso en el vuelo real.

Este vuelo se realiza en las cercanías de la zona de estudio.

En particular se utilizaron en conjunto dos softwares de *Pix4D* disponibles para la plataforma *Android*, estos son *Ctrl+DJI* y *Pix4Dcapture*(v.4.7.0).

Materialización y relevamiento de puntos de control y apoyo Una vez que el vuelo de prueba es realizado se procede a la materialización de puntos de apoyo y control, estos se ubicaron en los sitios que fueron planificados en gabinete. En cuanto al uso del stencil, no todos los puntos se materializan mediante su uso sino que también son usadas esquinas de tapas convenientemente ubicadas. Estas esquinas, de ser posible, son coloreadas con pintura en aerosol de color rojo.

Por practicidad al manejar las diferentes herramientas de materialización y relevamiento, es que primero se materializan todos los puntos y luego se relevan mediante DGNS-RTK. Al igual que el relevamiento GNSS anterior, se utiliza el mismo instrumental, esta vez ocupando cada punto hasta obtener una precisión en pantalla ligeramente menor a los 2 cm, en torno a la mitad del tamaño de pixel esperado para los productos del vuelo.

Ejecución de vuelo Ya llegando a la hora del mediodía tomada como referencia se comienzan los preparativos para el vuelo. Se elige un lugar convenientemente despejado y cercano a una de las esquinas de la zona a volar, donde despegar el VANT. Allí se prepara el software, configurando el área a volar y los parámetros del vuelo. Finalmente se ejecuta el vuelo, donde quedan determinadas las siguientes características, las cuales serán expuestas más adelante:

- Altura de vuelo
- Solape

- Tamaño de pixel
- Tiempo de vuelo
- Imágenes obtenidas
- Velocidad
- Baterías utilizadas

6.3.3. Procesamiento

Software y hardware El procesamiento se lleva a cabo mediante una licencia de prueba del software *Pix4Dmapper* (v.4.4.12). En particular se procesa en un equipo *laptop*¹¹ con las siguientes características:

- Sistema Operativo: *Windows 10 Home Single Language, 64 bits*.
- CPU: *Intel(R) Core(TM) i5-6300HQ (2.3 GHz, hasta 3.2 GHz, 6 MB de caché, 4 núcleos)*.
- Memoria RAM: 8 GB de *SDRAM DDR4-2133*.
- GPU: *Intel(R) HD Graphics 530 (integrada), NVIDIA GeForce GTX 960M (4 GB de GDDR5 dedicados)*.
- Disco Duro: 960 GB *SSD*.

Pix4D En primer lugar se procesa el vuelo utilizando todas las fotografías obtenidas y todos los puntos de apoyo relevados, 14 en total. De este proceso se obtienen los siguientes productos:

- Reporte de calidad
- Nube de puntos LAS clasificada
- Modelo digital de superficie DSM, ráster

¹¹Laptop *OMEN by HP - 15-ax001la*.

- Modelo digital de terreno DTM, ráster
- Ortomosaico

El mismo proceso se ejecuta para 5 puntos de apoyo, 4 en las esquinas y uno central. Los tiempos que implican estos procesos serán expuestos en la siguiente sección.

Por último se vuelve a ejecutar el proceso con estos mismos 5 puntos de apoyo (GCP¹²), pero esta vez con la mitad de fotografías, deshabilitando para el proceso una fotografía de por medio.

NSSDA Al nuevamente enfrentarnos a un estándar NSSDA, el primer paso que se ejecuta es el depuración de outliers y el testeo estadístico de sus hipótesis. En este paso se eliminan algunos outliers, siendo que los restantes no alcanzan a ser 20, el mínimo recomendado, igualmente se ejecuta el estándar a modo aproximado.

No se debe perder de vista que esta vez la metodología DNGSS-RTK probablemente se encuentra al límite en cuanto a la exigencia de ser al menos 3 veces más preciso que el objeto a controlar.

Comparaciones Las discrepancias entre los modelos que se desprenden de VFN y los creados mediante el vuelo de VANT, así como los productos que se derivan de ellos (especialmente el modelo de pendientes), son evaluadas utilizando el software *ArcMAP*. Asimismo mediante este software GIS se ejecuta un nuevo MDT a partir de la nube de puntos clasificada, obtenida del procesamiento del vuelo.

¹²Ground Control Point.

Para hacer una comparación más específica entre el modelo de terreno que se obtiene mediante el vuelo VANT con 14 GCP, 5 GCP y el de IDE, es que se crea una malla regular de puntos cada 5 metros, evaluando en cada uno de ellos la diferencia de elevación entre modelos. Para esta comparación se resampléa y snapea los MDT producido a partir del vuelo VANT, al MDT de la IDE. Para estos puntos también se evalúan las diferencias existentes en el modelo de pendientes derivados de dichos MDT.

6.4. Perfiles

Características A partir del MDT de la IDE se elaboró un modelo de cuencas, el que viene dado por el tutor. Sobre este modelo de cuencas y utilizando el software *QGIS* (v.3.6.3), se seleccionan 6 perfiles tal que satisfagan las siguientes características:

- Contener una divisoria de aguas;
- Desarrollarse a lo largo de caminerías poco transitadas;
- Uno de ellos debe encontrarse en la zona volada con VANT, su longitud aproximada debe ser unos 200 metros;
- Los restantes 5, deben estar esparcidos por los barrios, su longitud debe rondar los 50 metros.

Estos requerimientos fueron definidos junto con el tutor del proyecto.

Relevamiento Los perfiles se relevan tomando puntos GNSS cada 10 pasos, nuevamente se utiliza la técnica diferencial RTK.

Estando en campo los perfiles planificados se flexibilizan, siendo que al ver la morfología del terreno se decide relevar “de más”, haciéndose más extensos

hacia uno o ambos extremos. Esto responde a aparentes divisorias de agua que se observan fuera del perfil planificado, y cuya conclusión en el perfil se evalúa como enriquecedora.

Procesamiento De igual manera a lo procedido anteriormente, se transforma las coordenadas relevadas, en especial en cuanto a cota, pasando de alturas elipsoidales a ortométricas.

Mediante el software de *ArcMap* se procesan los perfiles, de tal manera de obtener una diagramación con dos gráficas, una respondiendo al perfil relevado y otra al perfil que surge del MDT de la IDE para el mismo recorrido.

Son comparadas las diferencias entre ambos perfiles así como la ubicación, a lo largo de las progresivas, de las divisorias de agua en uno y otro perfil.

6.5. Ejemplo de aplicación

Por último se realiza un ejemplo de aplicación, donde se comparan tres MDT, estos son: MDT de RENARE¹³ (*pixel* de 30 m), IDE producto nacional (*pixel* de 250 cm) e IDE producto urbano (*pixel* de 100 cm); siendo este último, sobre el que se trabajó durante todo este proyecto. En este ejemplo se calculan algunos parámetros topográficos asociados a los cálculos de drenajes superficiales, como lo son área de la cuenca y longitud hidrológica del cauce principal.

En este punto se introduce el MDT de RENARE dado que es el modelo anterior al publicado por la IDE, que cuenta con cobertura nacional. Luego, se utiliza el MDT de IDE de cobertura nacional para contrastar sus resultados, ya que el producto urbano sólo cubre el centro poblado en sí mismo, por lo que los efectos hidrológicos de los alrededores no son incluidos. El objetivo es conocer cómo afecta la característica de cada producto en la determinación de los parámetros de área y longitud hidrológica de cauce principal de una cuenca al azar.

Los cálculos se ejecutan mediante el módulo de herramientas de Hidrología de *ArcMap*, los que incluyen relleno (*fill*), cálculo de dirección de flujo, flujo acumulado, longitud de flujo y cuenca hidrológica (*Watershed*).

¹³Dirección de Recursos Naturales Renovables.

7. Exposición de resultados

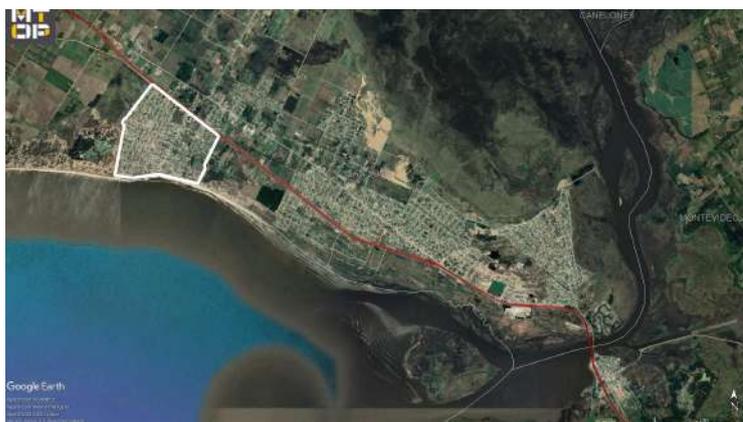
En esta sección se expondrán los resultados obtenidos a partir de las metodologías y procedimientos descritos anteriormente.

7.1. Determinación del área de estudio

Como consecuencia de los criterios adoptados el área geográfica donde se desarrollaran todos los estudios aquí expuestos se muestra a continuación (Figura 12). Esta zona involucra la totalidad de los barrios Playa Pascual y Villa Olímpica, cubriendo un área aproximada de 300 hectáreas.



(a) Área de estudio.



(b) Ubicación dentro de la Ciudad.

Figura 12: Ubicación mediante imágenes satelitales del área de estudio. *Google Earth Pro*. Fuente:elaboración propia.

7.2. Control de calidad planialtimétrica del MDT-IDE

Puntos a relevar Mediante el sorteo aleatorio de puntos y su posterior coincidencia con puntos claramente identificables, se obtienen los puntos teóricos a relevar, mostrados en la Figura 13.

Caminamiento El caminamiento planificado (Figura 13) es seguido en campo y resulta ser una herramienta excelente. Sin embargo no se previeron algunas situaciones, por ejemplo, que uno de los días de relevamiento iba a ser Domingo, día en el que hay feria vecinal. Esto resultó en que algunas calles se “deshabilitaran” en nuestro recorrido, sin embargo fue fácil adaptar esta situación en campo, recorriendo algunos tramos a pie.



Figura 13: Caminamiento planificado en *ArcMap*. Imagen obtenida utilizando *QGIS*. Fuente: elaboración propia.

Trabajo de campo Producto del trabajo de campo se relevaron los puntos expuestos en la Figura 16, estos suman un total de 131 puntos, los que se dividen de la siguiente manera:

- 64 puntos para el control en X, Y, Z (inicialmente 66, donde 2 se descartan. Uno de ellos es un punto “repetido”, el otro no fue fotoidentificable);
- 30 para el control sólo en X, Y (inicialmente 31, donde 1 es descartado);
- 34 para el control sólo en Z (inicialmente serían 31: uno por cada punto sólo (X, Y) . En cuanto a los tres restantes: se releva un punto sólo (Z) extra por un descuido; dos son puntos originalmente (X, Y, Z) , donde sus coordenadas (X, Y) son descartadas);
- 3 descartados (en total, incluyendo los aclarados en puntos anteriores).



(a) Punto solo (Z) .

(b) Punto sólo (X, Y)

(c) Punto (X, Y, Z)

Figura 14: Ejemplo de puntos relevados: solo (Z) , sólo (X, Y) y (X, Y, Z) . Fuente: elaboración propia.

En total se tienen 94 puntos disponibles para su uso en el estándar NSSDA en (X, Y) y 98 para la coordenada (Z) .

A continuación, en las Tablas 1 y 2, se muestran las coordenadas iniciales obtenidas para los 131 puntos¹⁴ del relevamiento, el SRC es WGS84 UTM21S (EPSG:32721) con alturas elipsoidales.



Figura 15: Fotografías del trabajo de campo. Fuente: elaboración propia.

¹⁴Los puntos 76 a 117 son eliminados ya que corresponden a puntos de un trabajo ajeno al proyecto, pero que fueron grabados en el mismo archivo por otro usuario del instrumental.

| Id. | Este | Norte | Alt. Elip. | Obs. | Id. | Este | Norte | Alt. Elip. | Obs. |
|-----|-----------|------------|------------|--------|-----|------------|------------|------------|--------|
| 1 | 549241,12 | 6155299,52 | 24,78 | XY | 59 | 549637,98 | 6155829,96 | 28,23 | |
| 2 | 549240,15 | 6155293,99 | 25,20 | Z | 60 | 549558,32 | 6155918,93 | 28,03 | |
| 3 | 549218,48 | 6155448,16 | 25,31 | | 61 | 549449,24 | 6155986,86 | 29,47 | XY |
| 4 | 549131,75 | 6155542,84 | 26,07 | Z | 62 | 549440,42 | 6155995,79 | 27,72 | Z |
| 5 | 549266,36 | 6155580,26 | 26,83 | | 63 | 549524,58 | 6156084,26 | 27,48 | XY |
| 6 | 549460,01 | 6155682,63 | 28,02 | XY | 64 | 549523,33 | 6156093,00 | 27,97 | Z |
| 7 | 549460,40 | 6155673,04 | 27,70 | Z | 65 | 549576,86 | 6156157,58 | 28,48 | |
| 8 | 549451,74 | 6155753,07 | 28,23 | | 66 | 549758,81 | 6156264,74 | 29,20 | XY |
| 9 | 549329,72 | 6155724,58 | 28,47 | XY | 67 | 549768,95 | 6156267,37 | 29,00 | Z |
| 10 | 549339,82 | 6155733,30 | 27,99 | Z | 68 | 549698,74 | 6156162,35 | 28,25 | XY |
| 11 | 549146,27 | 6155638,82 | 27,08 | | 69 | 549700,91 | 6156163,17 | 28,56 | Z |
| 12 | 549155,40 | 6155638,49 | 26,57 | | 70 | 549644,06 | 6156084,23 | 28,31 | |
| 13 | 549073,16 | 6155374,81 | 25,28 | XY | 71 | 549716,01 | 6155928,28 | 28,14 | XY |
| 14 | 549061,86 | 6155376,38 | 25,04 | Z | 72 | 549713,79 | 6155923,07 | 28,34 | Z |
| 15 | 549093,58 | 6155227,32 | 24,33 | | 73 | 549809,85 | 6156164,01 | 28,64 | XY*, Z |
| 16 | 549096,65 | 6155112,31 | 23,68 | | 74 | 549864,82 | 6156029,77 | 28,92 | |
| 17 | 548993,63 | 6154955,71 | 23,39 | | 75 | 549852,51 | 6155860,65 | 28,66 | |
| 18 | 549082,99 | 6154786,83 | 22,80 | XY | 118 | 549128,91 | 6155536,75 | 25,75 | |
| 19 | 549075,96 | 6154781,27 | 22,36 | Z | 119 | 549995,88 | 6156073,24 | 28,22 | XY |
| 20 | 548936,56 | 6154648,89 | 22,53 | | 120 | 549991,63 | 6156080,68 | 28,53 | Z |
| 21 | 548988,60 | 6154487,15 | 22,16 | | 121 | 550013,44 | 6155948,37 | 27,73 | XY |
| 22 | 549066,19 | 6154354,57 | 21,18 | XY | 122 | 550018,734 | 6155947,35 | 28,69 | Z |
| 23 | 549066,07 | 6154361,12 | 20,67 | Z | 123 | 549966,81 | 6155854,08 | 28,66 | |
| 24 | 549451,62 | 6154376,13 | 21,04 | | 124 | 550142,77 | 6155808,95 | 28,87 | |
| 25 | 549260,33 | 6154425,68 | 21,22 | XY | 125 | 549943,53 | 6155607,75 | 28,18 | |
| 26 | 549263,28 | 6154424,34 | 21,39 | Z | 126 | 550058,23 | 6155502,55 | 27,62 | XY |
| 27 | 549219,45 | 6154508,82 | 22,15 | | 127 | 550062,5 | 6155506,87 | 27,34 | Z |
| 28 | 549233,44 | 6154787,96 | 22,68 | | 128 | 550193,02 | 6155435,08 | 26,99 | |
| 29 | 549297,20 | 6154872,43 | 22,83 | | 129 | 550375,63 | 6155423,75 | 26,92 | |
| 30 | 549181,49 | 6154930,43 | 22,89 | | 130 | 550550,35 | 6155340,26 | 27,60 | |
| 31 | 549337,40 | 6155126,26 | 24,73 | | 131 | 550457,17 | 6155266,35 | 26,77 | Z |
| 32 | 549571,10 | 6155416,53 | 27,14 | | 132 | 550460,79 | 6155265,69 | 26,66 | XY |
| 33 | 549691,50 | 6155263,67 | 27,34 | | 133 | 550216,58 | 6155325,84 | 26,64 | |
| 34 | 549603,37 | 6155088,19 | 25,12 | XY*, Z | 134 | 550194,57 | 6155250,50 | 26,09 | |
| 35 | 549585,69 | 6155002,16 | 24,30 | | 135 | 550119,94 | 6155107,39 | 25,75 | |
| 36 | 549635,04 | 6154800,20 | 23,17 | XYZ* | 136 | 549967,53 | 6155126,40 | 26,87 | |
| 37 | 549635,04 | 6154800,22 | 23,15 | | 137 | 549986,07 | 6154925,90 | 24,57 | |
| 38 | 549566,95 | 6154663,55 | 22,57 | | 138 | 550268,22 | 6154772,59 | 23,47 | |
| 39 | 549681,03 | 6154691,35 | 23,07 | | 139 | 549930,29 | 6154834,05 | 22,44 | XY |
| 40 | 549839,08 | 6154597,88 | 22,66 | | 140 | 549930,44 | 6154832,18 | 23,73 | Z |
| 41 | 549708,78 | 6154433,68 | 23,35 | XY | 141 | 550058,05 | 6154785,94 | 22,93 | |
| 42 | 549717,92 | 6154431,39 | 22,77 | Z | 142 | 549783,17 | 6154909,61 | 23,92 | |
| 43 | 549977,49 | 6154494,18 | 21,81 | | 143 | 549746,87 | 6155024,55 | 24,84 | |
| 44 | 550115,40 | 6154536,23 | 21,57 | | 144 | 549840,57 | 6155171,81 | 25,32 | |
| 45 | 549956,42 | 6154593,93 | 22,56 | XY* | 145 | 549840,22 | 6155298,64 | 26,34 | |
| 46 | 549960,96 | 6154604,11 | 22,87 | Z | 146 | 549864,70 | 6155455,50 | 27,68 | |
| 47 | 550224,90 | 6154628,25 | 23,42 | XY | 147 | 549765,32 | 6155442,52 | 27,39 | XY |
| 48 | 550232,64 | 6154624,13 | 22,95 | Z | 148 | 549769,33 | 6155441,31 | 27,45 | Z |
| 49 | 550161,93 | 6154424,97 | 22,50 | | 149 | 550331,14 | 6155071,54 | 26,04 | |
| 50 | 550431,75 | 6154472,84 | 22,35 | XYZ* | 150 | 550560,72 | 6155183,33 | 26,59 | |
| 51 | 549390,40 | 6155332,65 | 25,40 | | 151 | 550681,29 | 6155204,87 | 26,80 | XY |
| 52 | 549450,17 | 6155452,21 | 26,96 | | 152 | 550679,96 | 6155210,05 | 26,81 | Z |
| 53 | 549704,52 | 6155518,27 | 28,50 | XY | 153 | 550886,39 | 6155377,22 | 27,93 | XY |
| 54 | 549708,47 | 6155517,65 | 28,55 | Z | 154 | 550889,62 | 6155370,08 | 28,55 | Z |
| 55 | 549811,96 | 6155625,33 | 28,29 | | 155 | 550937,10 | 6155016,28 | 25,52 | XY |
| 56 | 549719,21 | 6155736,15 | 28,22 | | 156 | 550938,49 | 6155008,21 | 26,22 | Z |
| 57 | 549642,53 | 6155621,68 | 28,94 | XY | 157 | 550835,42 | 6154784,10 | 25,77 | |
| 58 | 549639,87 | 6155601,26 | 29,05 | Z | 158 | 550866,30 | 6155104,04 | 26,52 | |

Tabla 1: Coordenadas iniciales de los puntos relevados. XY: punto sólo XY. XY*: descartado en XY. Z: punto sólo Z. XYZ*: punto descartado en XYZ. (Parte 1). Fuente: elaboración propia.

| Id. | Este | Norte | Alt. Elip. | Obs. |
|-----|-----------|------------|------------|------|
| 159 | 550625,95 | 6155094,65 | 26,35 | |
| 160 | 550739,31 | 6155077,71 | 26,39 | |
| 161 | 550471,97 | 6154768,23 | 23,48 | XY |
| 162 | 550474,97 | 6154763,42 | 23,62 | Z |
| 163 | 550679,88 | 6154473,92 | 22,79 | XY |
| 164 | 550672,95 | 6154471,22 | 23,45 | Z |
| 165 | 550511,86 | 6154287,38 | 22,51 | XY |
| 166 | 550522,27 | 6154300,85 | 22,55 | Z |
| 167 | 550339,39 | 6154590,20 | 22,69 | |
| 168 | 550416,16 | 6154867,53 | 24,68 | XY |
| 169 | 550411,10 | 6154873,09 | 24,60 | Z |
| 170 | 550481,12 | 6154995,38 | 25,80 | |
| 171 | 550551,49 | 6155626,03 | 28,08 | |
| 172 | 550425,63 | 6155728,12 | 29,33 | Z |
| 173 | 550409,87 | 6155745,77 | 28,88 | XY |

Tabla 2: Coordenadas iniciales de los puntos relevados. XY: punto sólo XY. Z: punto sólo Z. (Parte 2). Fuente: elaboración propia.



Figura 16: Distribución de los puntos relevados en campo. Software *QGIS*. Fuente: elaboración propia.

Procesamiento A la hora de reproyectar las coordenadas planas (X, Y) de los SRC EPSG:32721 a EPSG:5382 se utiliza el software *ArcMap* (Figura 17). De esta operación se obtiene que las diferencias entre una y otra proyección no son de relevancia, ya que, evaluadas al milímetro, son exactamente iguales.

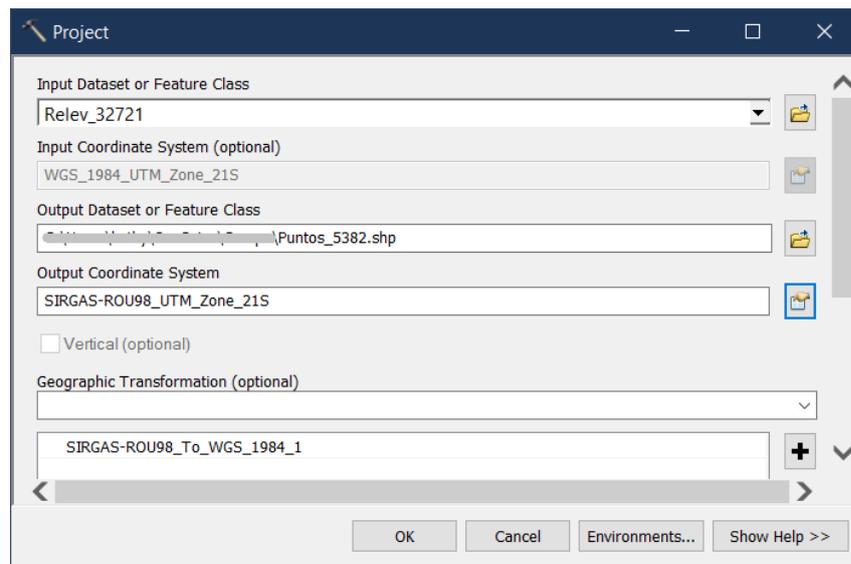


Figura 17: Captura de pantalla de la herramienta de reproyección en *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la altura, se procesan las coordenadas elipsoidales para transformarlas en ortométricas EGM2008, como fue adelantado, para ello se utiliza el software *Leica Geo Office*. En la Figura 19 se muestra una captura de pantalla de la interfaz del software donde aparecen: coordenadas Este y Norte, alturas elipsoidales y ortométricas, así como la separación geoidal. Las separaciones geoidales van desde 15,00 m a 15,03 m, habiendo 3 cm de variación máxima en los puntos relevados.

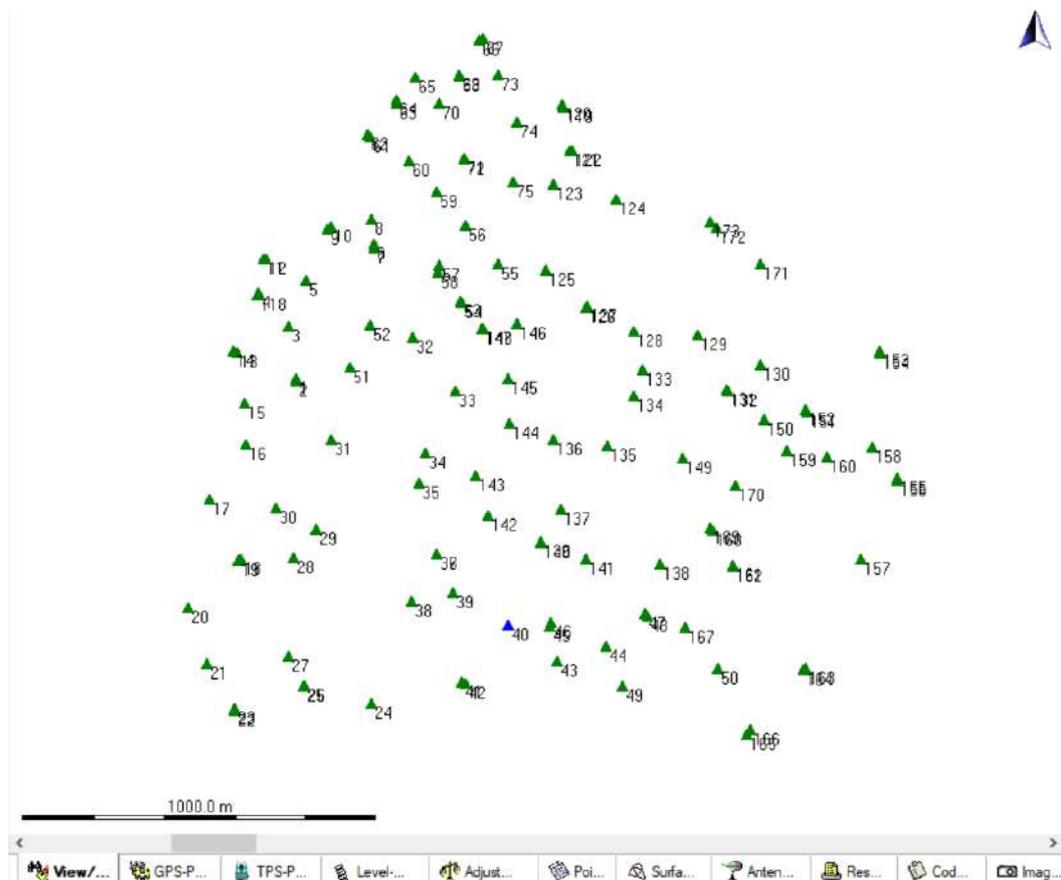


Figura 18: Captura de pantalla de *Leica Geo Office*. Mapa con los puntos cargados al proyecto. Fuente: elaboración propia.

Para hacer este procesamiento fue necesario contar con el archivo que contiene la información necesaria respecto al geoide EGM2008. Este archivo fue suministrado muy amablemente por el Prof. Ing. Agrim. Roberto Pérez Rodino, del Departamento de Geodesia.

En la Tabla 3 exponen las alturas ortométricas EGM2008 para los puntos relevados.

| Poi... | Easting | Northing | Ellip. Hgt. | Geoid Sep. | Ortho. Hgt. |
|--|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> 1 | 549241.120 | 6155299.523 | 24.778 | 15.030 | 9.748 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2 | 549240.151 | 6155293.990 | 25.201 | 15.030 | 10.171 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 3 | 549218.476 | 6155448.161 | 25.314 | 15.032 | 10.282 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 4 | 549131.755 | 6155542.845 | 26.067 | 15.034 | 11.033 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 5 | 549266.359 | 6155580.256 | 26.830 | 15.033 | 11.797 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 6 | 549460.012 | 6155682.633 | 28.018 | 15.031 | 12.987 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 7 | 549460.405 | 6155673.040 | 27.705 | 15.030 | 12.675 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 8 | 549451.744 | 6155753.074 | 28.227 | 15.032 | 13.195 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 9 | 549329.723 | 6155724.577 | 28.473 | 15.033 | 13.440 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 10 | 549339.819 | 6155733.306 | 27.988 | 15.033 | 12.955 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 11 | 549146.275 | 6155638.820 | 27.082 | 15.035 | 12.047 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 12 | 549155.401 | 6155638.486 | 26.571 | 15.035 | 11.536 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 13 | 549073.158 | 6155374.810 | 25.278 | 15.034 | 10.244 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 14 | 549061.861 | 6155376.382 | 25.045 | 15.034 | 10.011 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 15 | 549093.577 | 6155227.317 | 24.329 | 15.032 | 9.297 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 16 | 549096.649 | 6155112.306 | 23.682 | 15.030 | 8.652 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 17 | 548993.634 | 6154955.706 | 23.388 | 15.030 | 8.358 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 18 | 549082.993 | 6154786.827 | 22.799 | 15.027 | 7.772 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 19 | 549075.963 | 6154781.266 | 22.363 | 15.027 | 7.336 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 20 | 548936.561 | 6154648.892 | 22.533 | 15.027 | 7.506 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 21 | 548988.596 | 6154487.155 | 22.163 | 15.024 | 7.139 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 22 | 549066.189 | 6154354.568 | 21.179 | 15.022 | 6.157 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 23 | 549066.071 | 6154361.117 | 20.674 | 15.022 | 5.652 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 24 | 549451.625 | 6154376.122 | 21.038 | 15.016 | 6.022 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 25 | 549260.331 | 6154425.681 | 21.220 | 15.019 | 6.201 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 26 | 549263.276 | 6154424.336 | 21.387 | 15.019 | 6.368 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 27 | 549219.450 | 6154508.821 | 22.147 | 15.021 | 7.126 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 28 | 549233.445 | 6154787.962 | 22.685 | 15.024 | 7.661 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 29 | 549297.197 | 6154872.433 | 22.834 | 15.024 | 7.810 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 30 | 549181.491 | 6154930.434 | 22.894 | 15.027 | 7.867 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 31 | 549337.405 | 6155126.261 | 24.732 | 15.026 | 9.706 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 32 | 549571.097 | 6155416.535 | 27.143 | 15.026 | 12.117 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 33 | 549691.497 | 6155263.666 | 27.341 | 15.022 | 12.319 |

 View/Edit
  GPS-Proc
  TPS-Proc
  Level-Proc
  Adjustment

Figura 19: Captura de pantalla de *Leica Geo Office*. Lista de puntos del proyecto. Fuente: elaboración propia.

| Id. | Alt. Ort. | Obs. | Id. | Alt. Ort. | Obs. |
|-----|-----------|--------|-----|-----------|--------|
| 2 | 10,17 | Z | 65 | 13,45 | |
| 3 | 10,28 | | 67 | 13,97 | Z |
| 4 | 11,03 | Z | 69 | 13,53 | Z |
| 5 | 11,80 | | 70 | 13,28 | |
| 7 | 12,67 | Z | 72 | 13,31 | Z |
| 8 | 13,19 | | 73 | 13,61 | XY*, Z |
| 10 | 12,95 | Z | 74 | 13,89 | |
| 11 | 12,05 | | 75 | 13,64 | |
| 12 | 11,54 | | 118 | 10,71 | |
| 14 | 10,01 | Z | 120 | 13,50 | Z |
| 15 | 9,30 | | 122 | 13,67 | Z |
| 16 | 8,65 | | 123 | 13,64 | |
| 17 | 8,36 | | 124 | 13,85 | |
| 19 | 7,34 | Z | 125 | 13,16 | |
| 20 | 7,51 | | 127 | 12,32 | Z |
| 21 | 7,14 | | 128 | 11,97 | |
| 23 | 5,65 | Z | 129 | 11,91 | |
| 24 | 6,02 | | 130 | 12,59 | |
| 26 | 6,37 | Z | 131 | 11,76 | Z |
| 27 | 7,13 | | 133 | 11,63 | |
| 28 | 7,66 | | 134 | 11,08 | |
| 29 | 7,81 | | 135 | 10,73 | |
| 30 | 7,87 | | 136 | 11,86 | |
| 31 | 9,71 | | 137 | 9,56 | |
| 32 | 12,12 | | 138 | 8,46 | |
| 33 | 12,32 | | 140 | 8,71 | Z |
| 34 | 10,09 | XY*, Z | 141 | 7,92 | |
| 35 | 9,27 | | 142 | 8,90 | |
| 36 | 8,15 | | 143 | 9,83 | |
| 37 | 8,13 | | 144 | 10,30 | |
| 38 | 7,56 | | 145 | 11,32 | |
| 39 | 8,06 | | 146 | 12,66 | |
| 40 | 7,65 | | 148 | 12,43 | Z |
| 42 | 7,75 | Z | 149 | 11,03 | |
| 43 | 6,80 | | 150 | 11,58 | |
| 44 | 6,57 | | 152 | 11,81 | Z |
| 46 | 7,86 | Z | 154 | 13,55 | Z |
| 48 | 7,95 | Z | 156 | 11,23 | Z |
| 49 | 7,50 | | 157 | 10,77 | |
| 50 | 7,35 | | 158 | 11,52 | |
| 51 | 10,37 | | 159 | 11,34 | |
| 52 | 11,93 | | 160 | 11,39 | |
| 54 | 13,53 | Z | 162 | 8,62 | Z |
| 55 | 13,27 | | 164 | 8,45 | Z |
| 56 | 13,19 | | 166 | 7,55 | Z |
| 58 | 14,03 | Z | 167 | 7,68 | |
| 59 | 13,20 | | 169 | 9,60 | Z |
| 60 | 12,99 | | 170 | 10,80 | |
| 62 | 12,68 | Z | 171 | 13,07 | |
| 64 | 12,94 | Z | 172 | 14,32 | Z |

Tabla 3: Alturas ortométricas de los puntos relevados. XY*: descartado en XY. Z: punto sólo Z. Fuente: elaboración propia.

Procesamiento estadístico Una vez extraídas las coordenadas (X, Y) de la ortofoto de la IDE, y la coordenada (Z) del MDT, se procede a evaluar sus diferencias con los datos relevados en campo. Estas diferencias en las coordenadas, dX , dY y dZ , son evaluadas estadísticamente obteniendo los siguientes resultados:

En dX :

- Outliers:
 - Prueba de Grubbs: 1 valor atípico (nivel de significancia $\alpha = 0,05$).
 - Diagrama de cajas (rango intercuartil): 3 valores atípicos.

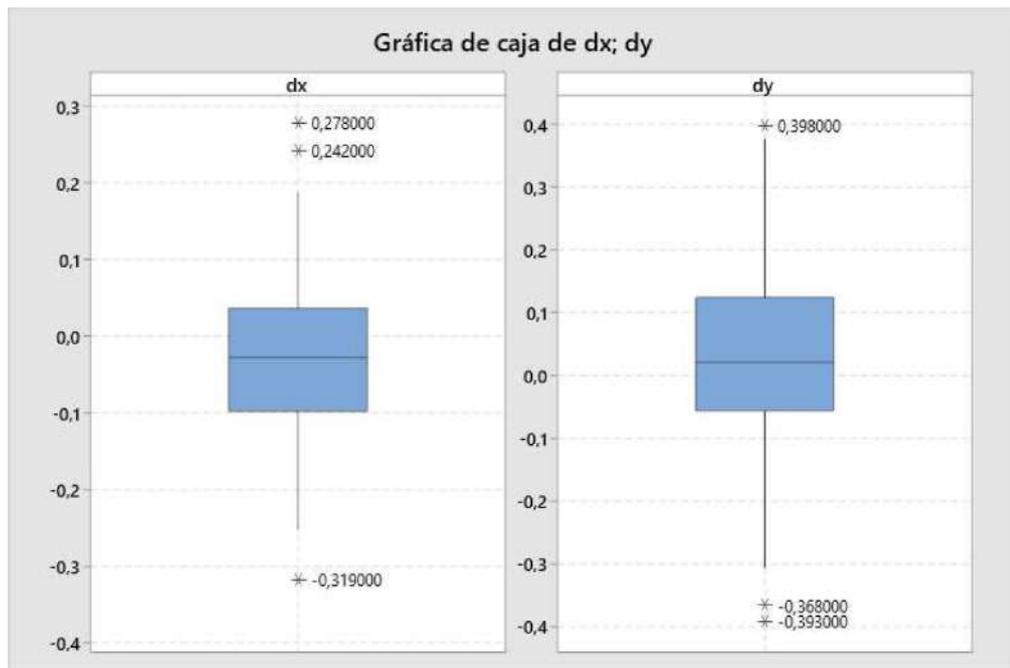


Figura 20: Diagrama de Cajas para dX y dY , unidades en metros. Software estadístico *MiniTab*. Fuente: elaboración propia.

- Normalidad: $H_0 \rightarrow$ Los datos siguen una distribución normal
 - Anderson-Darling: $p = 0,503 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .

- Ryan-Joiner (símil Shapiro-Wilk): $p > 0,100 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .
- Kolmogorov-Smirnov: $p > 0,150 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .

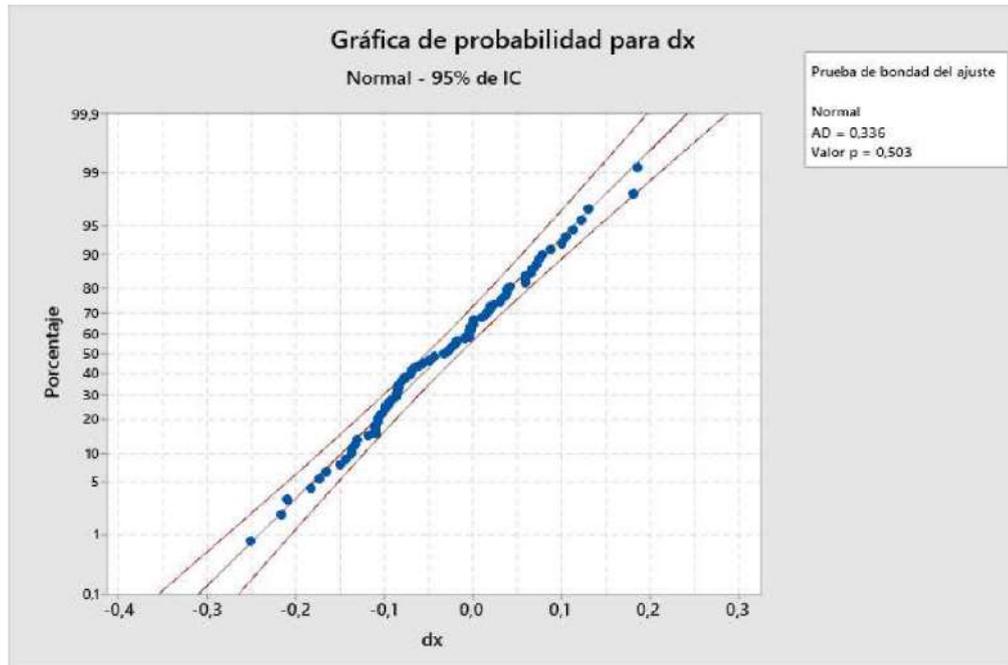


Figura 21: Identificación de distribución para dX , software estadístico *Mini-Tab*. Fuente: elaboración propia.

En dY :

- Outliers:
 - Prueba de Grubbs: 1 valor atípico (nivel de significancia $\alpha = 0,05$)
 - Diagrama de cajas (rango intercuartil): 3 valores atípicos.
- Normalidad: $H_0 \rightarrow$ Los datos siguen una distribución normal
 - Anderson-Darling: $p = 0,700 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .
 - Ryan-Joiner (símil Shapiro-Wilk): $p > 0,100 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .
 - Kolmogorov-Smirnov: $p > 0,150 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .

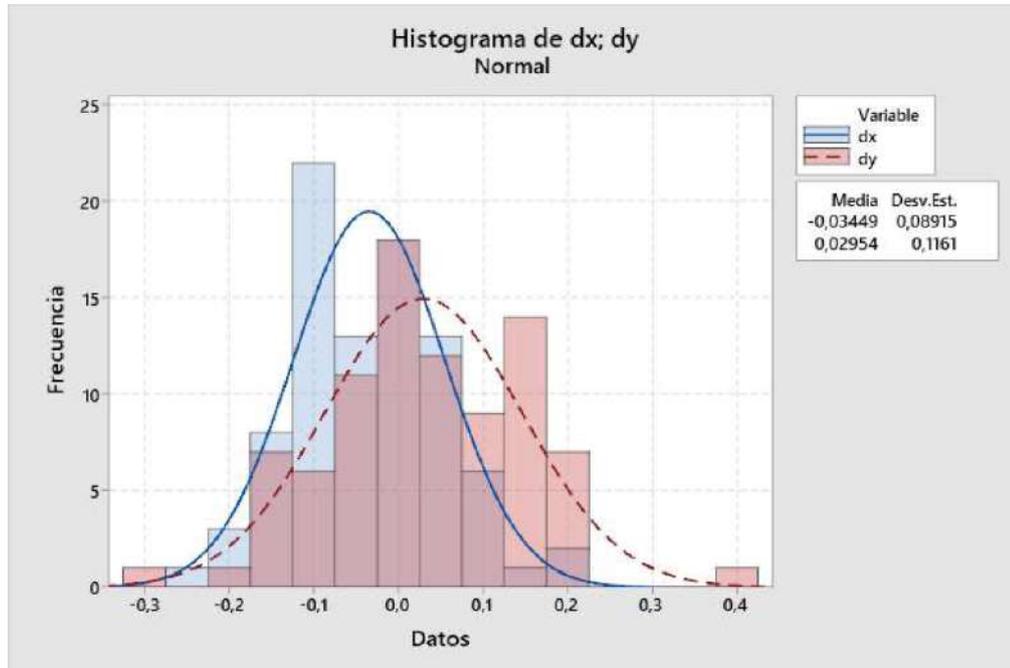


Figura 22: Histograma para dX y dY ; distribuciones normales. Software estadístico *MiniTab*. Fuente: elaboración propia.

En (dX, dY) :

- Correlación (Figura 23):
 - Coeficiente de Pearson: $\rho = -0,306$; $IC^{15} = (-0,485; -0,102)$
 - Coeficiente de Spearman: $\rho = -0,270$; $IC = (-0,485; -0,059)$
- Covarianza:

| | dX | dY |
|----|---------|--------|
| dX | 0,0079 | |
| dY | -0,0032 | 0,0135 |

Tabla 4: Matriz de covarianzas dX, dY .

Utilizando el software *GNU Octave* se grafican los vectores de diferencia en X e Y (dX, dY) a partir de las coordenadas relevadas (Figura 24).

¹⁵Intervalo de confianza, nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

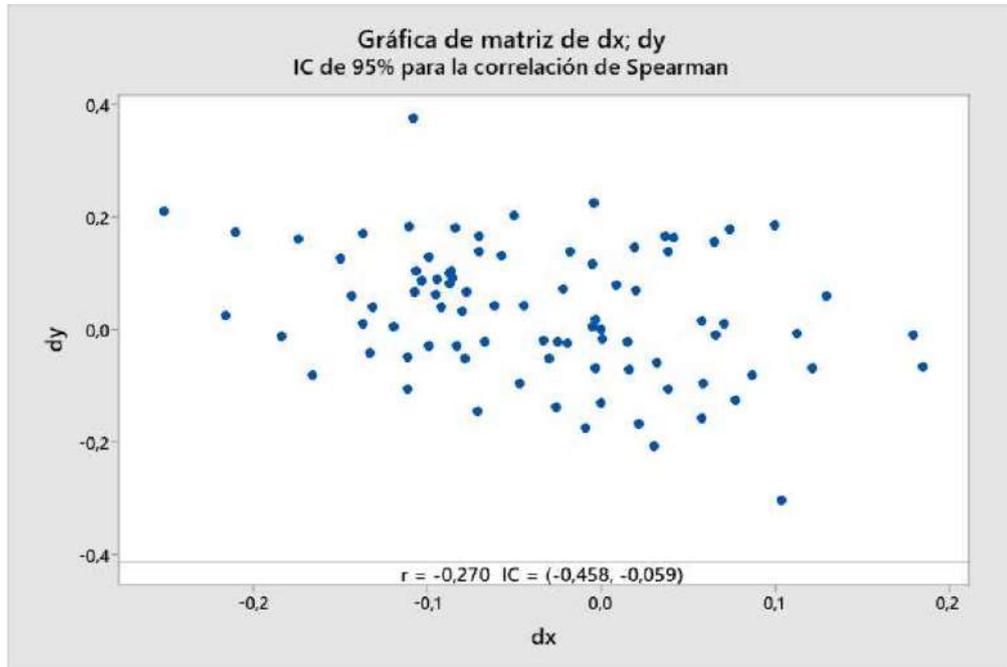


Figura 23: Correlación de Spearman para dX y dY . Software *MiniTab*. Fuente: elaboración propia.

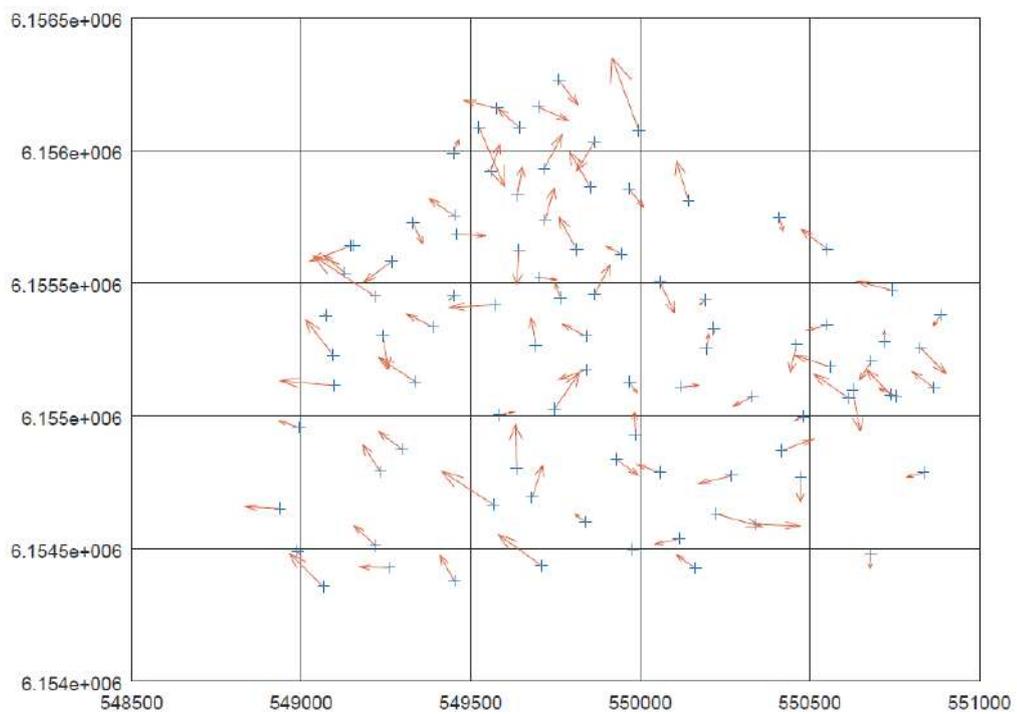


Figura 24: Vectores (dX, dY) , escala conveniente. Software *GNU Octave*. Fuente: elaboración propia.

En dZ :

- Outliers:
 - Prueba de Grubbs: 1 valor atípico (nivel de significancia $\alpha = 0,05$)
 - Diagrama de cajas (rango intercuartil): 2 valores atípicos.



Figura 25: Diagrama de Cajas para dZ , unidades en metros. Software estadístico *MiniTab*. Fuente: elaboración propia.

- Normalidad: $H_0 \rightarrow$ Los datos siguen una distribución normal
 - Anderson-Darling: $p = 0,869 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .
 - Ryan-Joiner (símil Shapiro-Wilk): $p > 0,100 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .
 - Kolmogorov-Smirnov: $p > 0,150 > \alpha = 0,05 \Rightarrow$ se acepta H_0 .

En la Figura 27 se expone el histograma para dZ con el gráfico de la distribución normal correspondiente, asimismo se muestran diagramados los intervalos de confianza ($\alpha = 0,05$) para la media y la mediana.

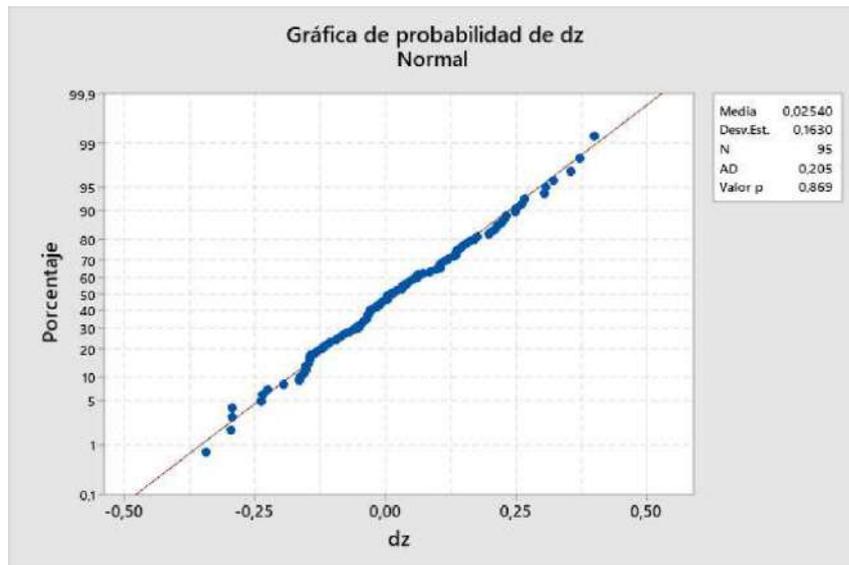


Figura 26: Evaluación de ajuste a una distribución normal para dZ , test Anderson-Darling. Software estadístico *MiniTab*. Fuente: elaboración propia.

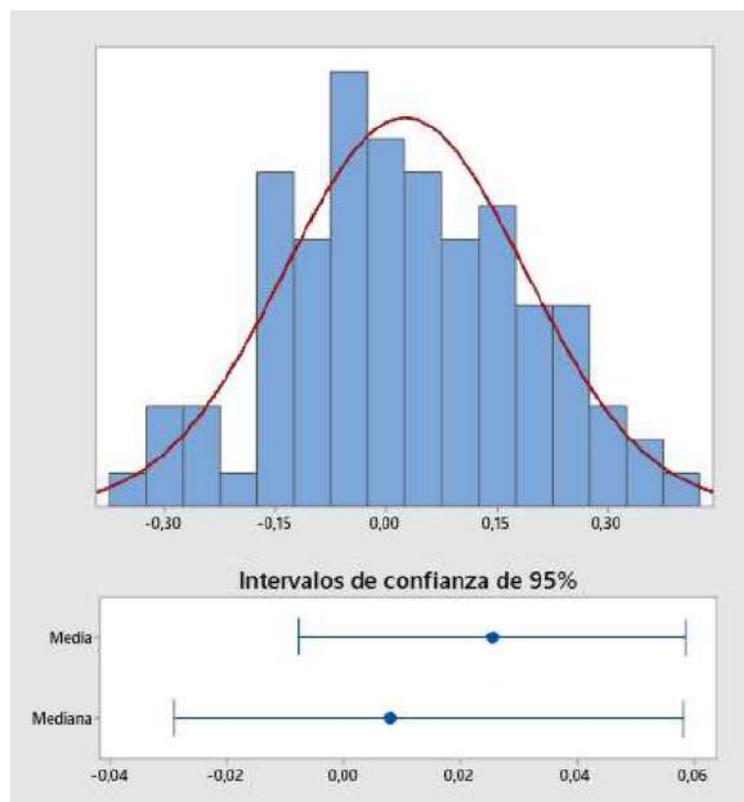


Figura 27: Histograma para dZ , IC de media y mediana. Software estadístico *MiniTab*. Fuente: elaboración propia.

Estándar NSSDA Cumplidas las hipótesis del estándar se procede a realizar el cálculo del estándar NSSDA. Cabe aclarar que los puntos atípicos en dX y/o en dY , determinaron la eliminación del punto, determinado por la dupla (dX, dY) .

Antes del proceso estadístico se tenían 94 puntos (X, Y) y 98 puntos en (Z) . Luego de la depuración se tienen 87 puntos (X, Y) , descartándose 7; y 95 puntos en (Z) , descartándose sólo 3. Siguiendo las referencias bibliográficas ([13, 24]) se calcula el estándar NSSDA, obteniéndose:

- (X, Y)

- ▷ $RMSE_X = 0,09m$

- ▷ $RMSE_Y = 0,12m$

- ▷ $RMSE_r = 0,15m$

- ▷ $Exactitud_r = 0,26m$

“Comprobado para 0,26 metros de exactitud horizontal al 95 % de nivel de confianza.”

- (Z)

- ▷ $RMSE_Z = 0,16m$

- ▷ $Exactitud_Z = 0,32m$

“Comprobado para 0,32 metros de exactitud vertical al 95 % de nivel de confianza.”

Fórmula de Koppe Los resultados de este test no son los esperados, la recta de ajuste a la regresión planteada se ajusta con un valor de $R^2=0,009$ (Figura 28). Procediendo de todas formas e ignorando la no linealidad del problema, se obtiene un error vertical de 0,49 m y uno horizontal mayor a 100 m.

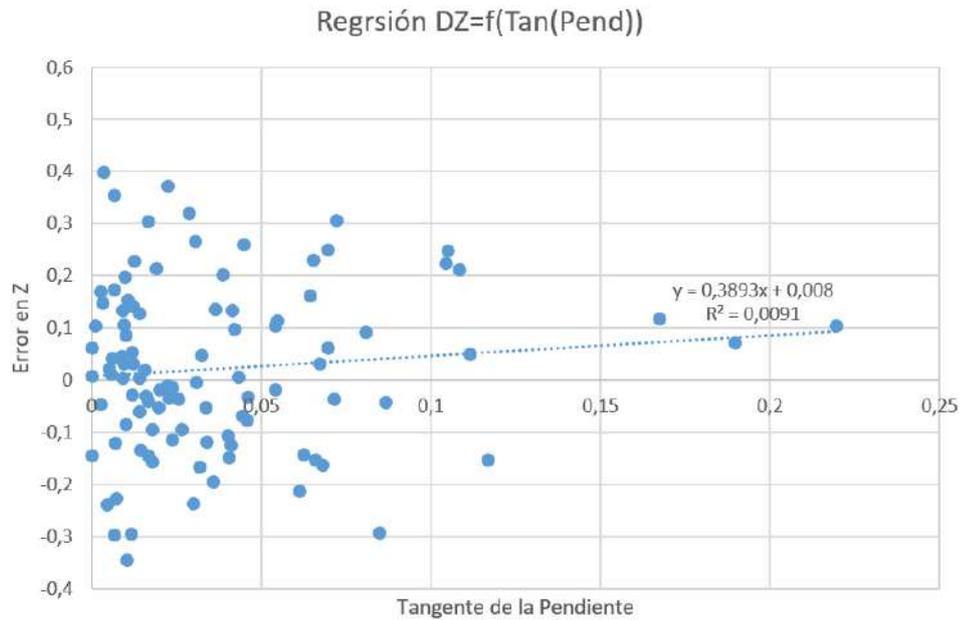


Figura 28: Error en altura en función de la tangente de la pendiente. *ArcMap*, *Excel*. Fuente: elaboración propia.

7.3. Elaboración de un MDT a partir de vuelo de VANT

7.3.1. Planificación

Elección de la zona a volar Siguiendo la metodología propuesta se evalúan distintas zonas donde han ocurrido cambios en las parcelas desde el VFN 2017-2018, a la actualidad. Como resultado de los análisis de las ortofotos del vuelo e imágenes satelitales actuales, se da con una zona que presenta buena actividad de cambios en los últimos años.

Dado que esta zona es pequeña, siendo de unas 5 a 6 hectáreas, se decide volar toda la “microzona” a su alrededor, la que surge del mismo fraccionamiento, con lo que el área se eleva a poco más de 20 hectáreas. La zona que concentra muchos cambios se encuentra en su esquina Norte (Figura 29).



Figura 29: Zona elegida para volar. *Google Earth Pro*. Fuente: elaboración propia.

Esta área es una zona tranquila y de baja circulación de vehículos, probablemente esto se deba a que esta zona presenta la particularidad de no tener calles que la unan a la Avenida principal directamente, sino sólo en sus extremos. Esto ocurre porque las tres calles que nacen en la Avenida a esa altura no tienen salida (esto se puede observar en la Figura 29).

Planificación del vuelo Mediante el uso de la web *DroneDeploy* e ingresando los datos necesarios se obtienen los siguientes resultados:

Seteando una altura de vuelo de 100 metros, con los solapamientos mínimos recomendados ¹⁶ y con la velocidad de vuelo por defecto¹⁷, se llegó a los siguientes datos aproximados para un área cubierta de 24 hectáreas:

- Tamaño de pixel: 3 cm
- Tiempo de vuelo: 10 minutos
- Imágenes obtenidas: 152
- Baterías utilizadas: 1

Algunos de estos resultados cambian ligeramente al modificar la dirección de las líneas de vuelo. Los datos anteriores son para líneas de vuelo paralelas al lado más largo del polígono a volar. Al modificar estas líneas haciendo que formen un ángulo con los bordes, el tiempo de vuelo aumenta ligeramente y disminuye la cantidad de fotos tomadas.

¹⁶Frontal del 70 %, lateral del 60 %.

¹⁷12 m/s.

Puntos de apoyo y control Siguiendo los lineamientos de las referencias bibliográficas, se planifican los puntos de apoyo a relevar. Estos se definen convenientes en las ubicaciones indicadas en la Figura 30.



Figura 30: Puntos de apoyo planificados dentro de la zona a volar. *Google Earth Pro*. Fuente: elaboración propia.

Además de los 13 puntos de apoyo expuestos, se relevarn 12 puntos extra. Totalizando 25 puntos, donde, si se utilizan sólo cinco de apoyo, teóricamente restan los necesarios para analizar la exactitud mediante estándar NSSDA.

Elección de la hora del vuelo Para la fecha de referencia, 3 de noviembre de 2019, se tienen los siguientes datos:

- Salida del Sol → 5:41
- Puesta del Sol → 19:16
- ⇒ Duración 13 horas 35 minutos

Según estos datos el “medio día solar” acontecería en torno a las 12:29.

7.3.2. Trabajo de campo

Vuelo de prueba Durante el vuelo de prueba todo acontece acorde a lo planificado. En particular se evalúa cómo se visualizan las marcas de apoyo, tanto al Sol como a la sombra, obteniéndose buenos resultados, las fotos que las contienen se exponen en las Figuras 31 y 32. Producto de este vuelo se obtienen 32 imágenes, cubriendo un área aproximada de 1,5 hectáreas. La marca que se encuentra expuesta al Sol aparece en 11 de las fotografías, mientras que la que se encuentra a la sombra aparece en 10 de ellas.



(a) Marca tipo al sol, fotografía completa. (b) Marca tipo al sol, 400 % de zoom.

Figura 31: Imágenes obtenidas en el vuelo de prueba. Fuente: elaboración propia.



(a) Marca tipo a la sombra de un árbol, fotografía completa. (b) Marca tipo en sombra, zoom.

Figura 32: Imágenes obtenidas en el vuelo de prueba. Fuente: elaboración propia.

Las fotos expuestas en las Figuras 31 y 32 son elegidas al azar.

Materialización y relevamiento de puntos de apoyo y control La materialización de los puntos fueron de tres formas:

- Marchas con forma de “L” hechas con stencil (Figura 33)
- Esquinas de tapas, marcadas con pintura en aerosol (Figura 34-a)
- Esquinas de piezas claramente identificables en su entorno, que no fueron pintadas (Figura 34-b)



(a) Marca tipo recién pintada, la pieza molde se encuentra aún colocada.

(b) Resultado del stencil, marca tipo.

Figura 33: Materialización de puntos mediante stencil. Fuente: elaboración propia.

Luego de su materialización todos los puntos fueron relevados mediante GNSS (Figura 35).



(a) Esquina marcada con pintura en aerosol. (b) Punto en esquina no pintada, losa de entrada a casa particular.

Figura 34: Formas alternativas para la identificación de puntos de apoyo/control. Fuente: elaboración propia.



(a) Relevamiento GNSS de marca hecha con stencil. (b) Relevamiento GNSS de esquina de tapa marcada con pintura en aerosol.

Figura 35: Relevamiento GNSS de puntos de apoyo/control. Fuente: elaboración propia.

Ejecución del vuelo Para ejecutar el vuelo se elige un lugar convenientemente despejado y cercano a la zona a volar, en particular se opta por un espacio libre frente a una escuela pública, sitio lindero a la esquina Oeste del polígono que define la zona a volar. Allí se prepara el software, configurando el área a volar y los parámetros del vuelo. Finalmente se ejecuta el vuelo, con los siguientes características:

- Altura de vuelo: 100 m
- Solape: 80 %
- Tamaño de pixel: 2,73 cm
- Tiempo de vuelo: 16 min. 30 s
- Imágenes obtenidas: 342
- Velocidad: 9 m/s
- Baterías utilizadas: 1

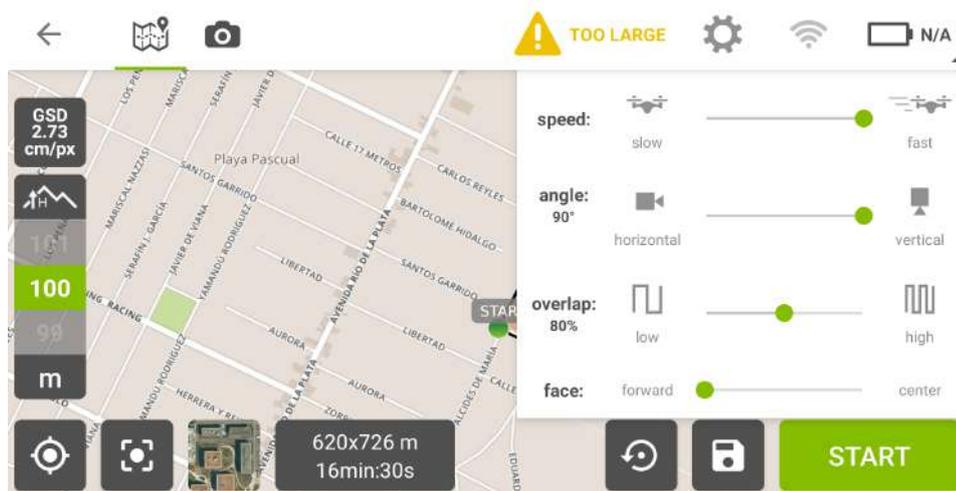


Figura 36: Captura de pantalla, se observan los parámetros expuestos. Aplicación *Android, Pix4Dcapture*. Fuente: elaboración propia.

Estos datos pueden observarse en la Figura 36, asimismo en la Figura 37 se muestran los puntos que son configurados como inicio y fin del vuelo, así

como las líneas que sigue el mismo (la captura que se muestra es tomada una vez que el VANT ya realizó la misión).

Cabe aclarar que el modelo del VANT (*Phantom 4 Pro*) y otros datos iniciales, como el tipo de misión “*Grid Mission*”, fueron ingresados en la aplicación durante el procedimiento previo al vuelo de prueba.

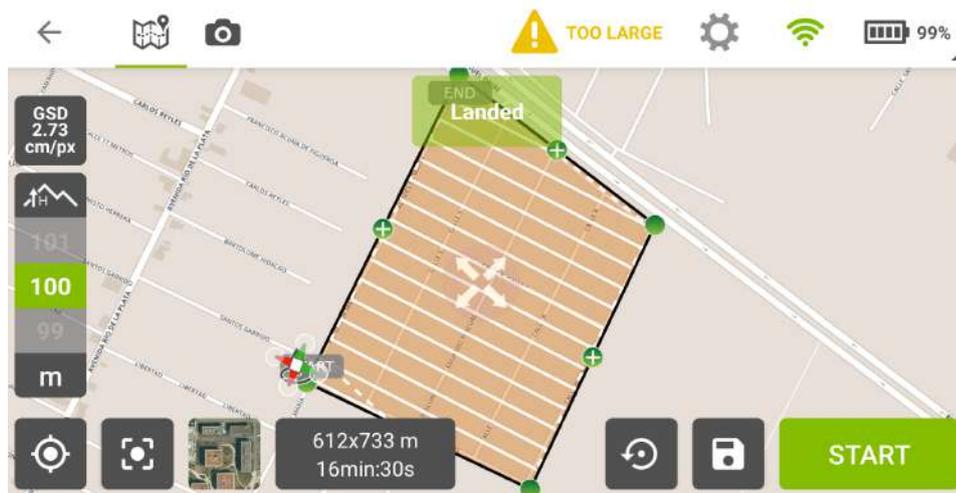


Figura 37: Captura de pantalla: inicio, fin y líneas del vuelo. Aplicación *Android, Pix4Dcapture*. Fuente: elaboración propia.

Una vez que el VANT se encuentra en medio de la misión, desde la *App* se pueden visualizar distintos datos (Figura 38):

- Estado del VANT (*In mission, Going to land, ...*)
- Ubicación del VANT en el mapa
- Altura y velocidad del VANT
- Distancia entre el operador y el VANT
- Sitios en donde fueron tomadas fotografías
- Sitio de despegue y de fin de la misión
- Memoria disponible en la memoria SD insertada en el VANT

- Cantidad de satélites disponibles
- Porcentaje de batería restante en el VANT
- Porcentaje de señal entre el VANT y el controlador remoto

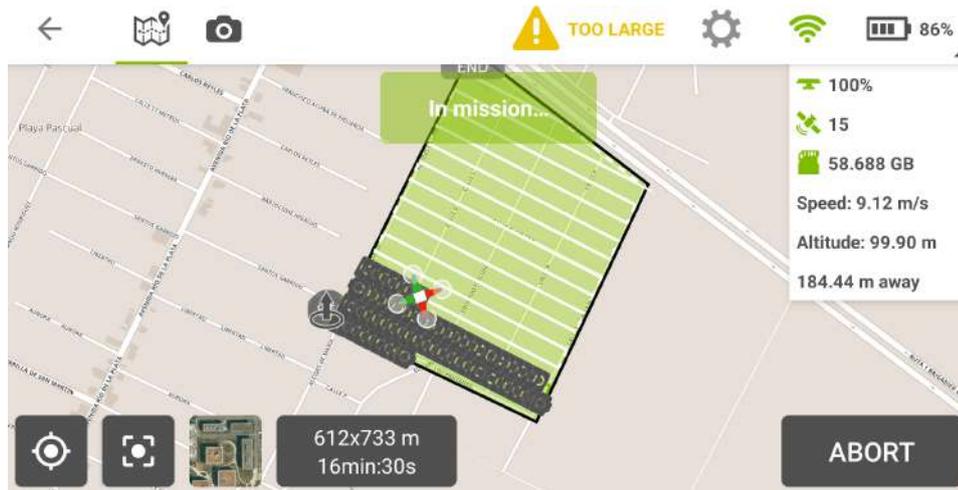


Figura 38: Captura de pantalla, VANT durante la misión. Aplicación *Android*, *Pix4Dcapture*. Fuente: elaboración propia.

La aplicación también cuenta con una opción en donde se muestra en pantalla la vista de la cámara del VANT en el momento de consulta, esta opción se muestra en la Figura 39.

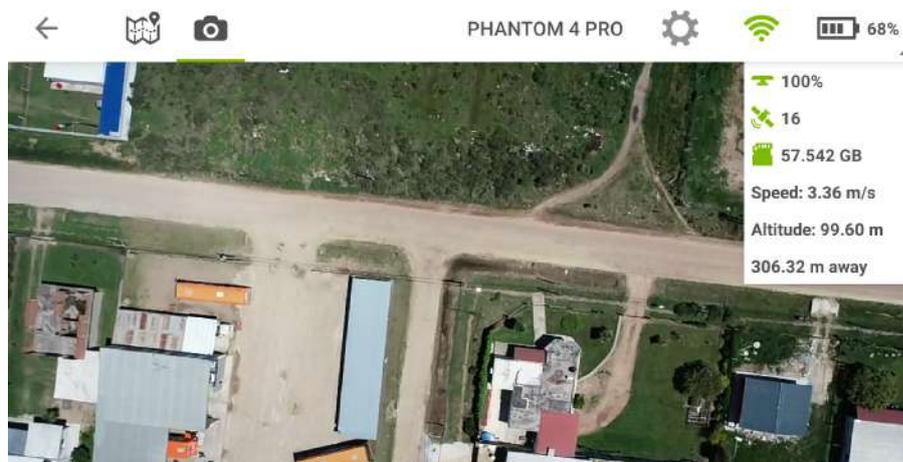


Figura 39: Captura de pantalla, imagen obtenida por la cámara en el momento de consulta. Aplicación *Android*, *Pix4Dcapture*. Fuente: elaboración propia.

7.3.3. Procesamiento: Pix4D

En esta parte se van a exponer los resultados de procesar las imágenes con dos grupos distintos de puntos de apoyo:

- 13 puntos (8 en los bordes + 5 en el interior), que terminan siendo 14, dado que se decidió agregar un punto extra al momento de procesar
- 5 puntos. A su vez con estos puntos de apoyo se volverá a procesar las fotografías pero esta vez utilizando la mitad de las mismas.

En cuanto a sistemas de referencia, antes de ingresar los puntos GNSS relevados al software de *Pix4D*, se procesan sus alturas, llevándolas de elipsoidales a ortométricas (nuevamente esto último se realiza mediante el software *Leica Geo Office*).

Por más detalles sobre el proceso paso a paso en el software, se recomienda consultar el proyecto de grado [26], donde este se expone de manera clara y detallada.

14 puntos de apoyo El resumen del procesamiento arroja los siguientes datos iniciales:

- Tamaño de *pixel* promedio: 2,51 cm
- Área cubierta: 33 hectáreas
- Imágenes calibradas: 342 (100 %)
- Georreferenciación: 14 GCP, RMSE=0,016 m

Asimismo muestra una previsualización de los productos de ortofoto y MDS previo a la densificación del modelo, estas imágenes se exponen en la Figura 40.

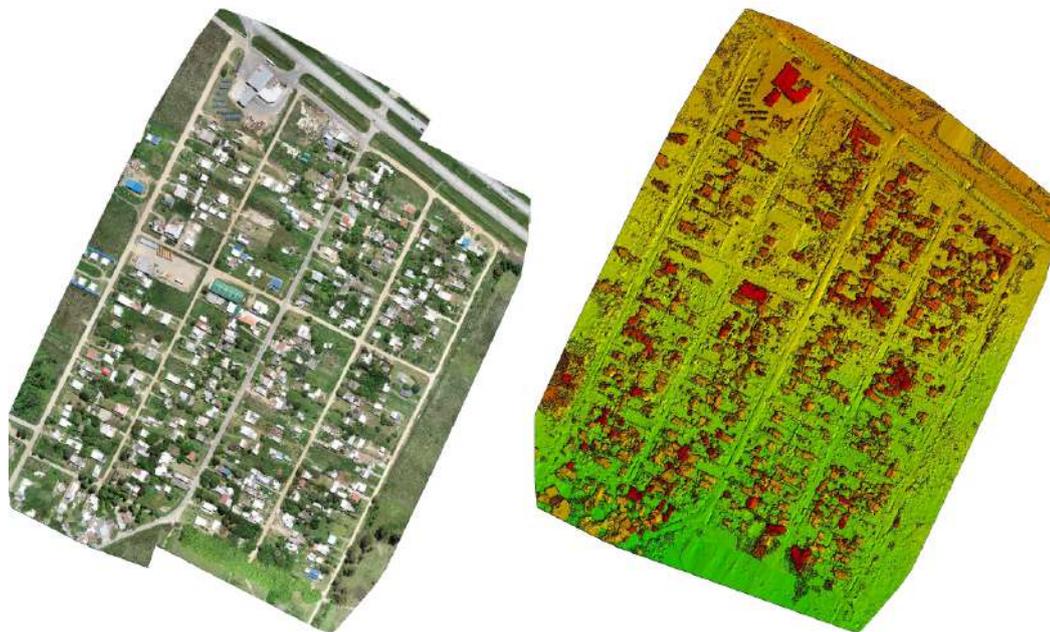


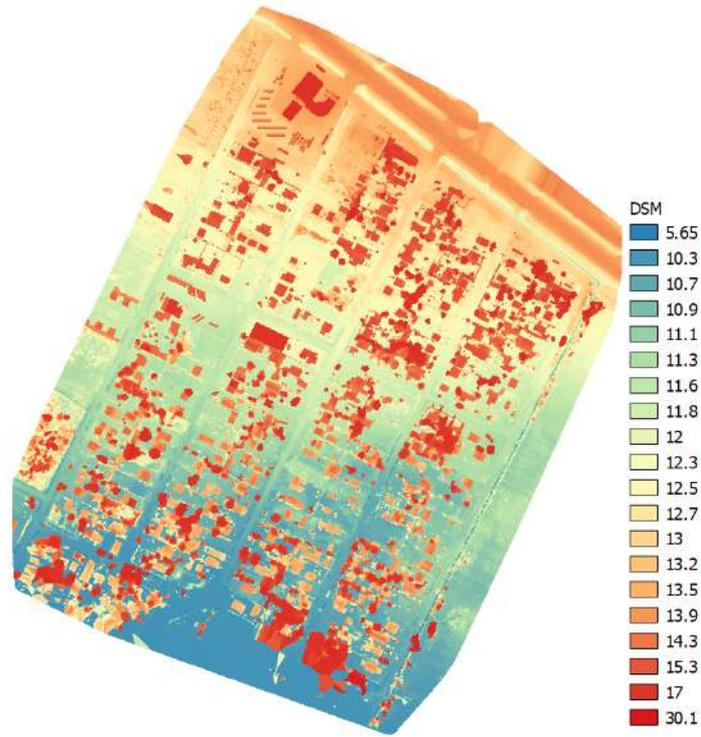
Figura 40: Previsualización de ortofoto y MDS. *Quality Report, Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.

En cuento a los resultados de la densificación, fueron producidos 44:595.609 puntos, con una densidad de 192,76 puntos por m^3 . En lo que refiere a tiempos de procesamiento se obtienen los valores expuestos en la Tabla 5.

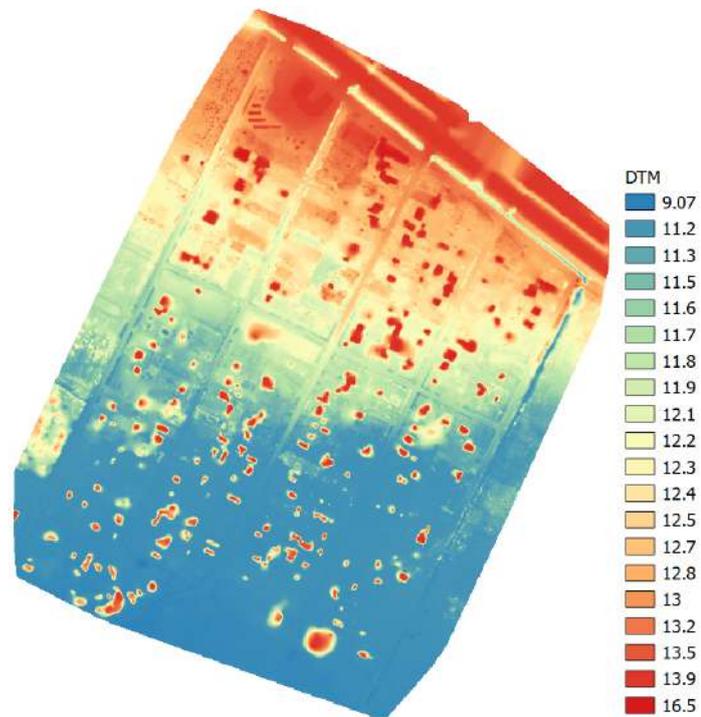
| Proceso | Tiempo insumido |
|------------------------------------|-----------------|
| Procesamiento inicial | 28m:15s |
| Densificación de nube de puntos | 2h:04m:00s |
| Clasificación de nube de puntos | 30m:58s |
| Generación de malla texturizada 3D | 09m:45s |
| Generación de DSM | 53m:38s |
| Generación de ortomosaico | 1h:27m:49s |
| Generación de DTM | 42m:10s |
| Total | 6h:16m:35s |

Tabla 5: Tiempos insumidos por cada proceso, 14 GCP. *Quality Report, Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la Figura 41, se muestra la visualización del MDS y MDT final, en herramienta *QGIS*.



(a) MDS



(b) MDT

Figura 41: Productos del procesamiento con 14 GCP. *Pix4Dmapper*, *QGIS*.
Fuente: elaboración propia.

5 puntos de control El resumen del procesamiento arroja los siguientes datos iniciales:

- Tamaño de *pixel* promedio: 2,51 cm
- Área cubierta: 33 hectáreas
- Imágenes calibradas: 342 (100 %)
- Georreferenciación: 5 GCP, RMSE=0,005 m

Respecto a la previsualización de los productos de ortofoto y MDS, previo a la densificación del modelo, estas imágenes se exponen en la Figura 42.

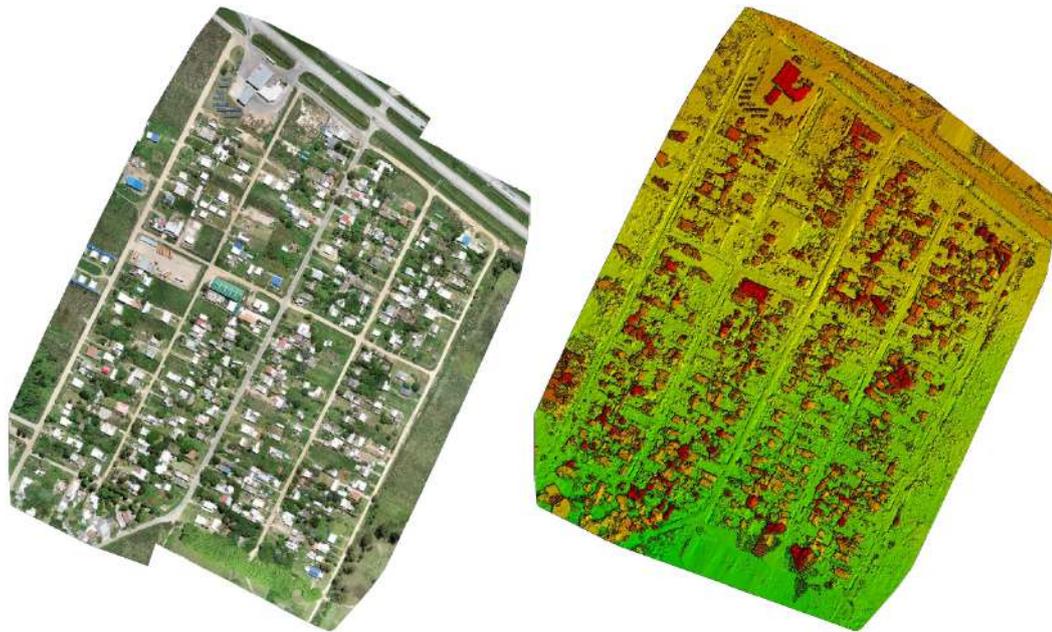
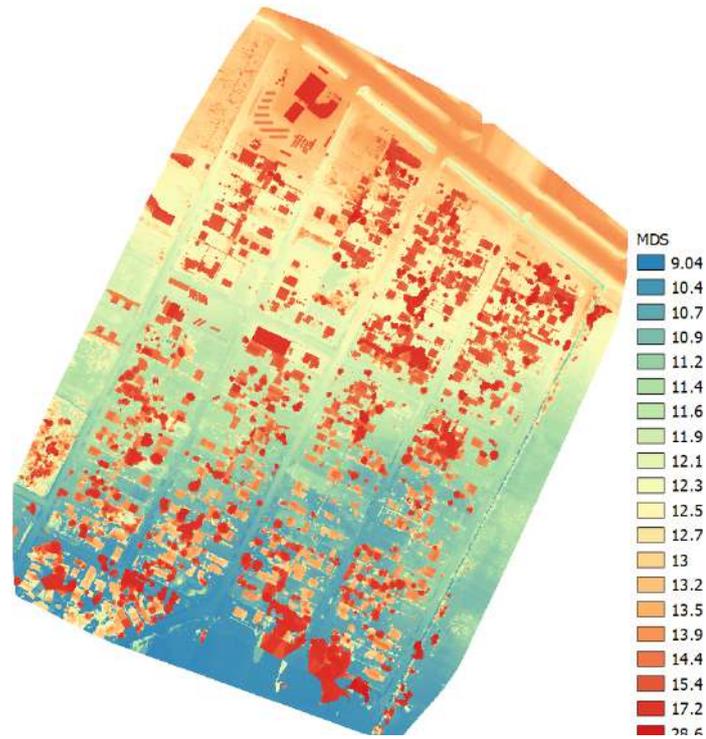


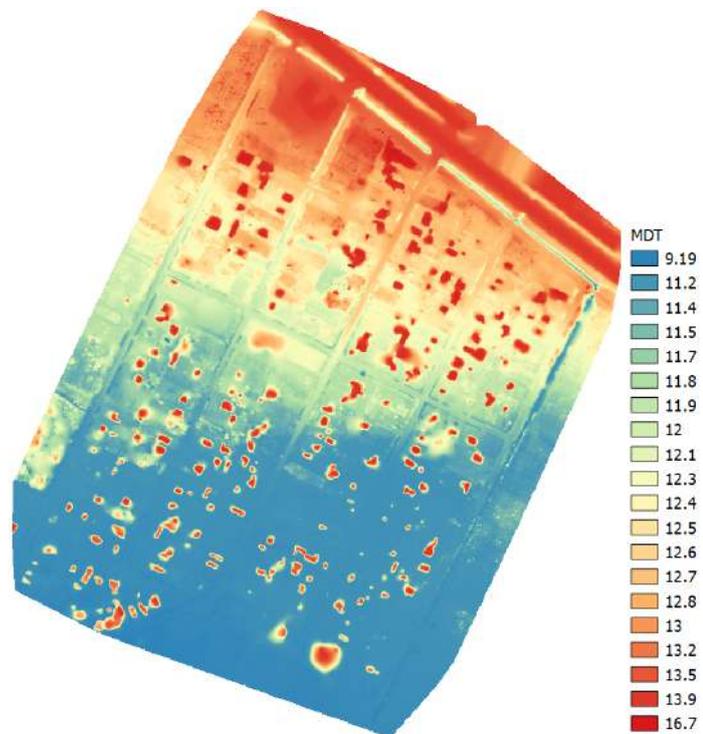
Figura 42: Previsualización de ortofoto y MDS. 5 GCP. *Quality Report*, *Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los resultados de la densificación, fueron producidos 44:751.465 puntos, con una densidad de 195,19 puntos por m³. En lo que refiere a tiempos de procesamiento se obtienen los valores expuestos en la Tabla 6.

A continuación (Figura 43) se muestra la visualización del MDS y MDT final, en herramienta *QGIS*.



(a) MDS



(b) MDT

Figura 43: Productos del procesamiento con 5 GCP. *Pix4Dmapper*, *QGIS*.
Fuente: elaboración propia.

| Proceso | Tiempo insumido |
|------------------------------------|-----------------|
| Procesamiento inicial | 24m:05s |
| Densificación de nube de puntos | 2h:08m:12s |
| Clasificación de nube de puntos | 34m:31s |
| Generación de malla texturizada 3D | 10m:14s |
| Generación de DSM | 59m:57s |
| Generación de ortomosaico | 1h:57m:43s |
| Generación de DTM | 46m:02s |
| Total | 7h:00m:44s |

Tabla 6: Tiempos insumidos por cada proceso, 5 GCP. *Quality Report, Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.

5 puntos de control - mitad de las imágenes El resumen del procesamiento arroja los siguientes datos iniciales:

- Tamaño de *pixel* promedio: 2,52 cm
- Área cubierta: 31 hectáreas
- Imágenes calibradas: 171 (100 %)
- Georreferenciación: 5 GCP, RMSE=0,007 m

Respecto a la previsualización de los productos de ortofoto y MDS (previo a la densificación del modelo) las imágenes se exponen en la Figura 44.

En cuanto a los resultados de la densificación, fueron producidos 28:134.569 puntos, con una densidad de 170,49 puntos por m³. En lo que refiere a tiempos de procesamiento se obtienen los valores expuestos en la Tabla 7.

Nuevamente, en la Figura 45, se muestra la visualización del MDS y MDT final, en herramienta *QGIS*.

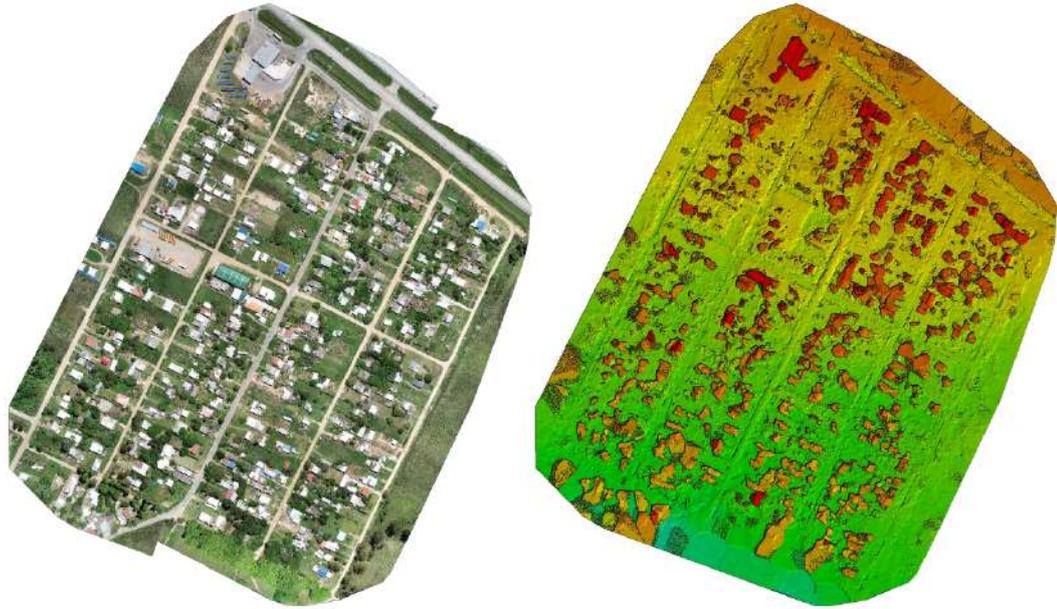
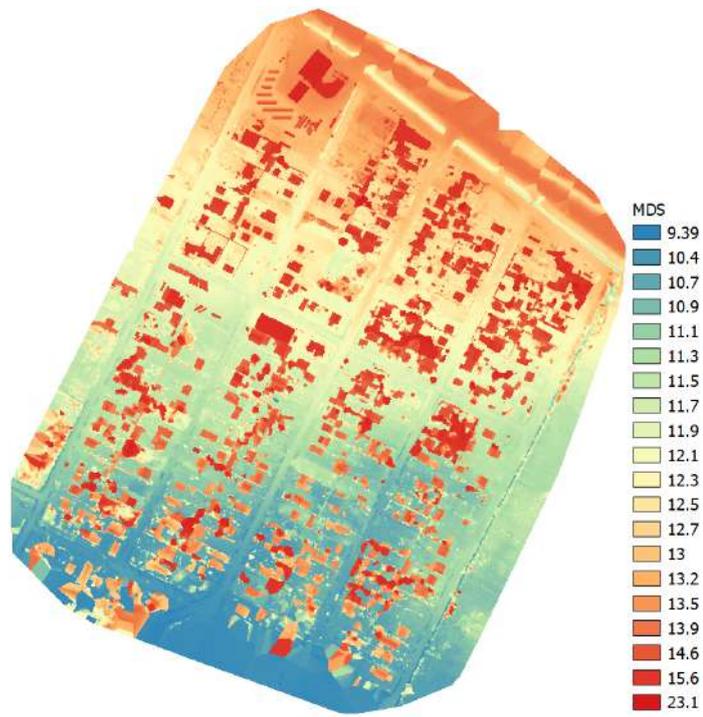


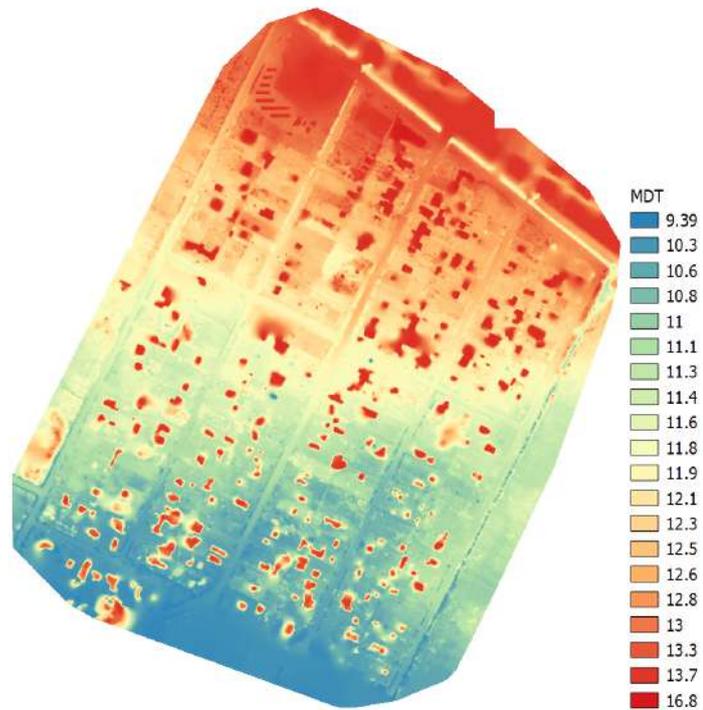
Figura 44: Previsualización de ortofoto y MDS. 5 GCP. *Quality Report*, *Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.

| Proceso | Tiempo insumido |
|------------------------------------|-----------------|
| Procesamiento inicial | 8m:00s |
| Densificación de nube de puntos | 54m:51s |
| Clasificación de nube de puntos | 18m:52s |
| Generación de malla texturizada 3D | 5m:40s |
| Generación de DSM | 34m:28s |
| Generación de ortomosaico | 46m:08s |
| Generación de DTM | 30m:30s |
| Total | 3h:18m:29s |

Tabla 7: Tiempos insumidos por cada proceso, 5 GCP - mitad de las fotografías. *Quality Report*, *Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.



(a) MDS



(b) MDT

Figura 45: Productos del procesamiento con 5 GCP y la mitad de las fotografías. *Pix4Dmapper*, *QGIS*. Fuente: elaboración propia.

Comparaciones A fin de facilitar la comparación de los resultados al lector, en este apartado se resumen algunos de los datos recién expuestos.

| | 14 GCP | 5 GCP | 5 GCP - 50 % Fotos |
|---------------------------------|------------|------------|--------------------|
| Pixel (cm) | 2,51 | 2,51 | 2,52 |
| Área (Hás) | 32,9963 | 32,9957 | 30,7229 |
| Imágenes | 342 | 342 | 171 |
| Georref. RMSE (m) | 0,016 | 0,005 | 0,007 |
| Puntos | 44:595.609 | 44:751.465 | 28:134.569 |
| Densidad, puntos/m ³ | 192,76 | 195,19 | 170,49 |
| Tiempo de proceso | 6h:16m:35s | 7h:00m:44s | 3h:18m:29s |

Tabla 8: Comparación de resultados entre los procesos con distinta cantidad de GCP. *Quality Report, Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.

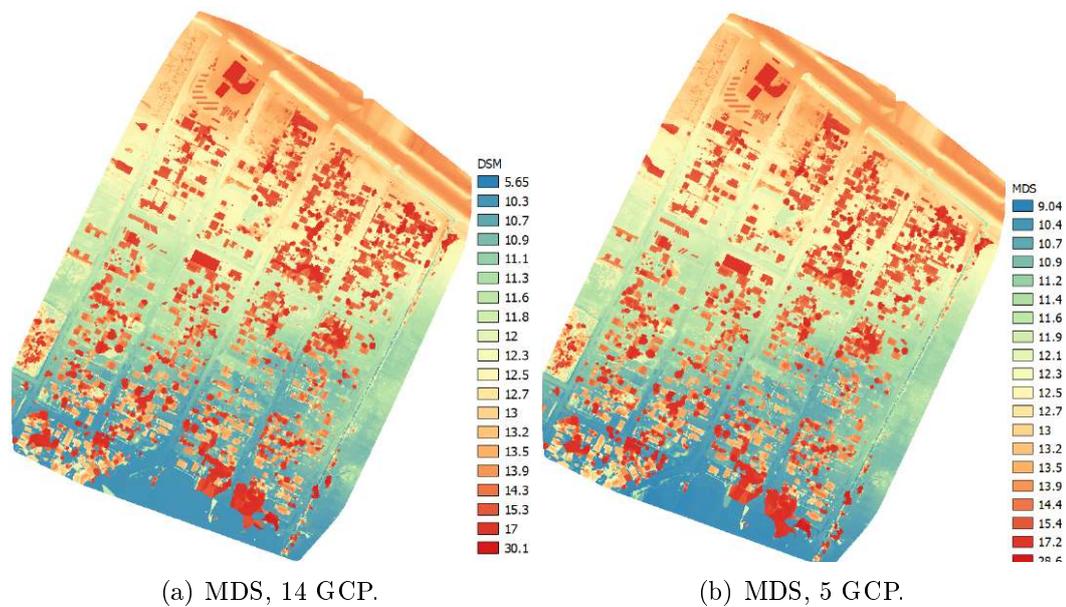


Figura 46: Comparación entre MDS, con 14 y 5 puntos de control. *Pix4Dmapper, QGIS*. Fuente: elaboración propia.

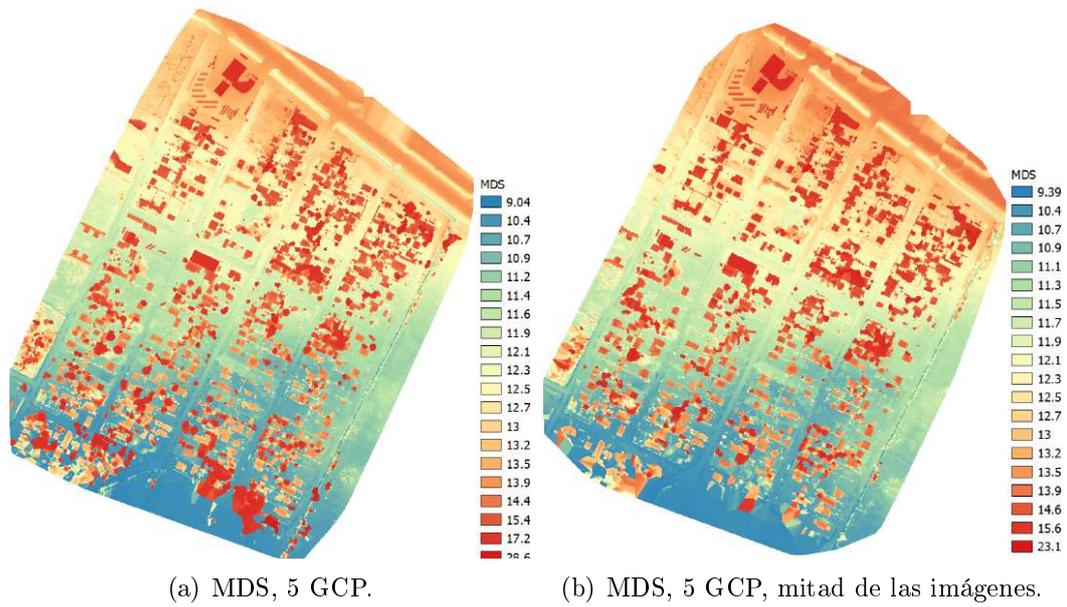


Figura 47: Comparación de MDS con 5 puntos de control, entre 100 % y 50 % de las fotografías. *Pix4Dmapper*, *QGIS*. Fuente: elaboración propia.

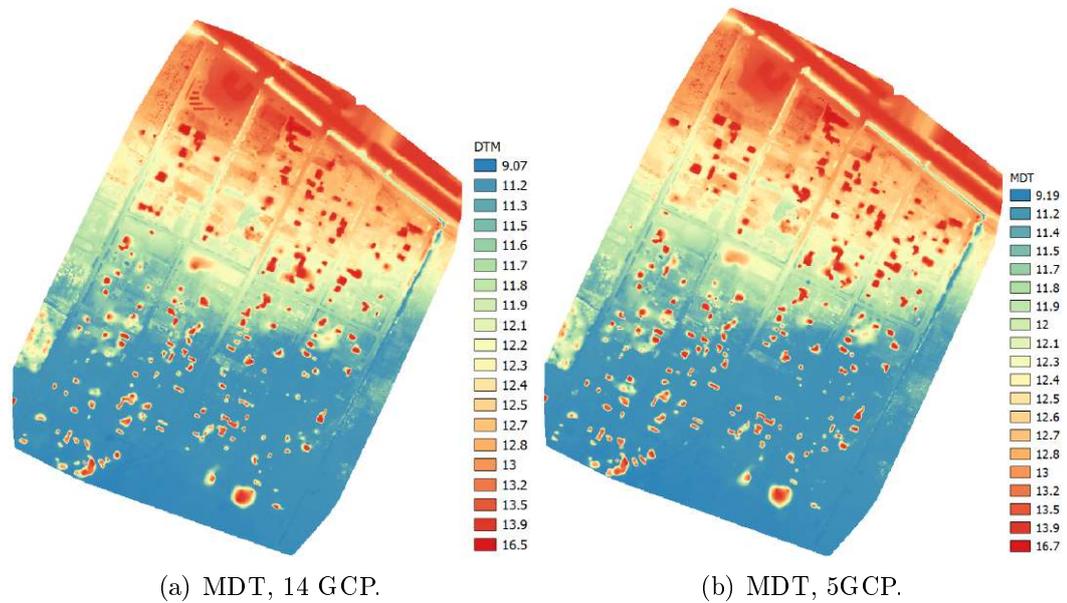


Figura 48: Comparación entre MDT, con 14 y 5 puntos de control. *Pix4Dmapper*, *QGIS*. Fuente: elaboración propia.

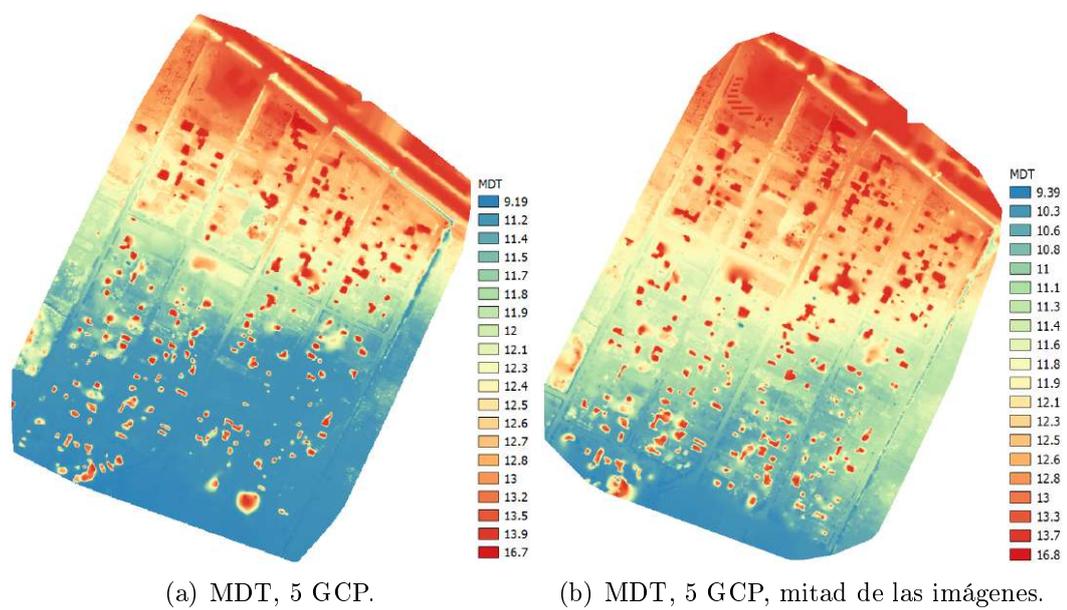
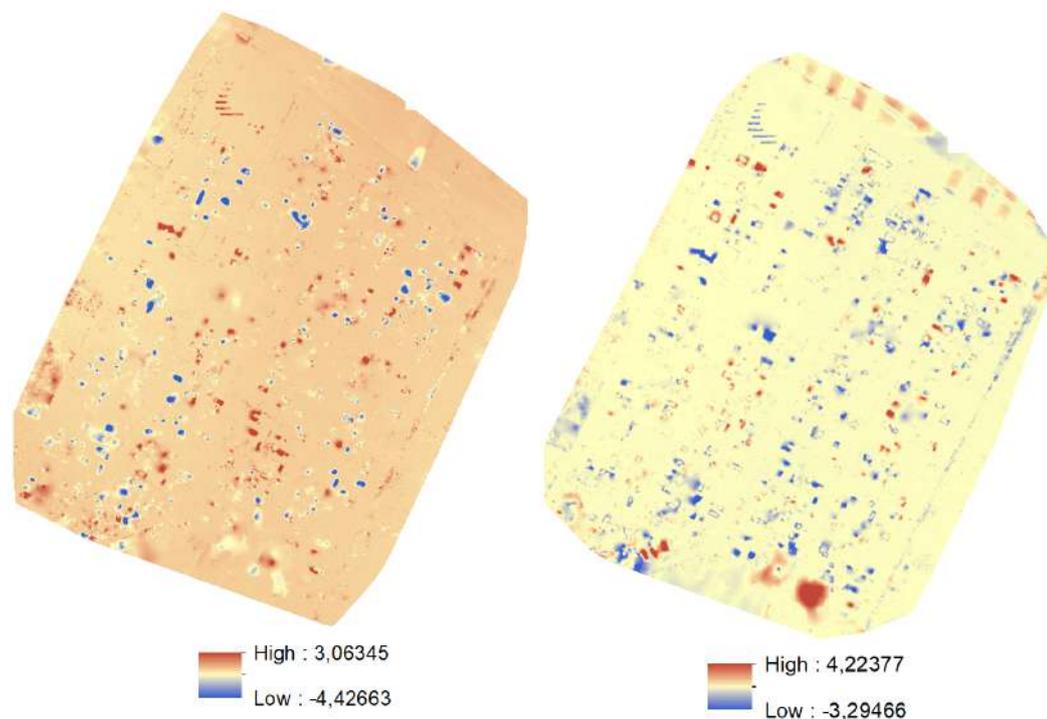


Figura 49: Comparación de MDT con 5 puntos de control, entre 100 % y 50 % de las fotografías. *Pix4Dmapper*, *QGIS*. Fuente: elaboración propia.

7.3.4. Procesamiento: GIS

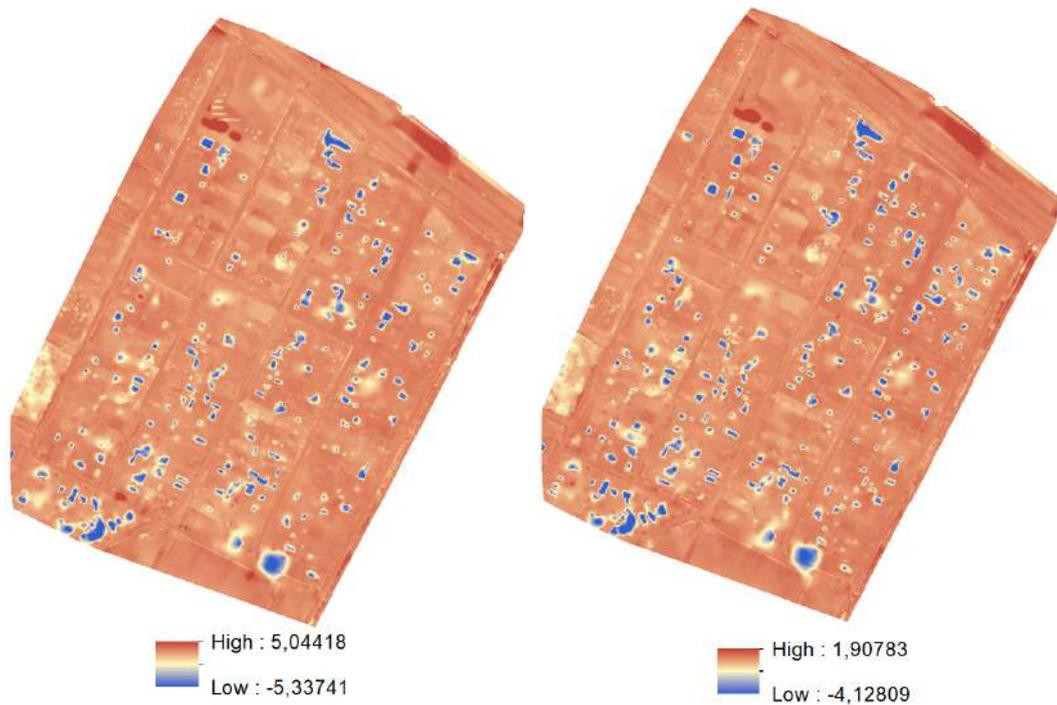
En esta parte de la exposición de resultados, se mostrarán los modelos de pendientes obtenidos de cada procesamiento (Figura 52). También se mostrarán resultados obtenidos a través de álgebra de mapas, específicamente en cuanto a diferencias entre los MDT elaborados (Figura 50) y el de la IDE (Figura 51); y sus respectivos modelos de pendiente (Figuras 54 y 53). Por otra parte se expodrá el nuevo MDT elaborado a partir de la herramienta *ArcMap* utilizando la nube de puntos clasificada obtenida de procesar el vuelo con 14 GCP (Figuras 55 y 56).

Diferencias entre MDTs



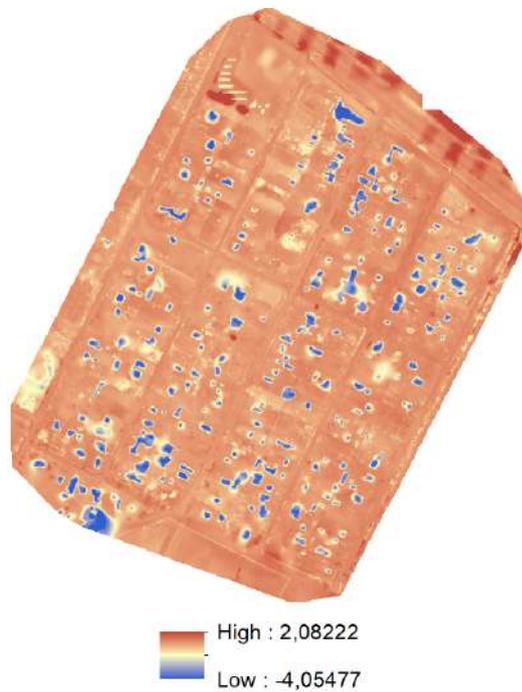
(a) MDT 14 GCP menos MDT 5 GCP. (b) MDT 5 GCP menos MDT 5 GCP con 50 % de las imágenes.

Figura 50: Diferencias entre el MDT con 14 y 5 puntos de control; y entre 5 GCP con 100 % y 50 % de las fotografías. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.



(a) MDT IDE menos MDT 14 GCP.

(b) MDT IDE menos MDT 5 GCP.



(c) MDT IDE menos MDT 5 GCP con 50 % de las imágenes.

Figura 51: Restas entre los MDT de IDE y los MDT con 14 y 5 puntos de control, con 100 % y 50 % de las fotografías. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Pendientes

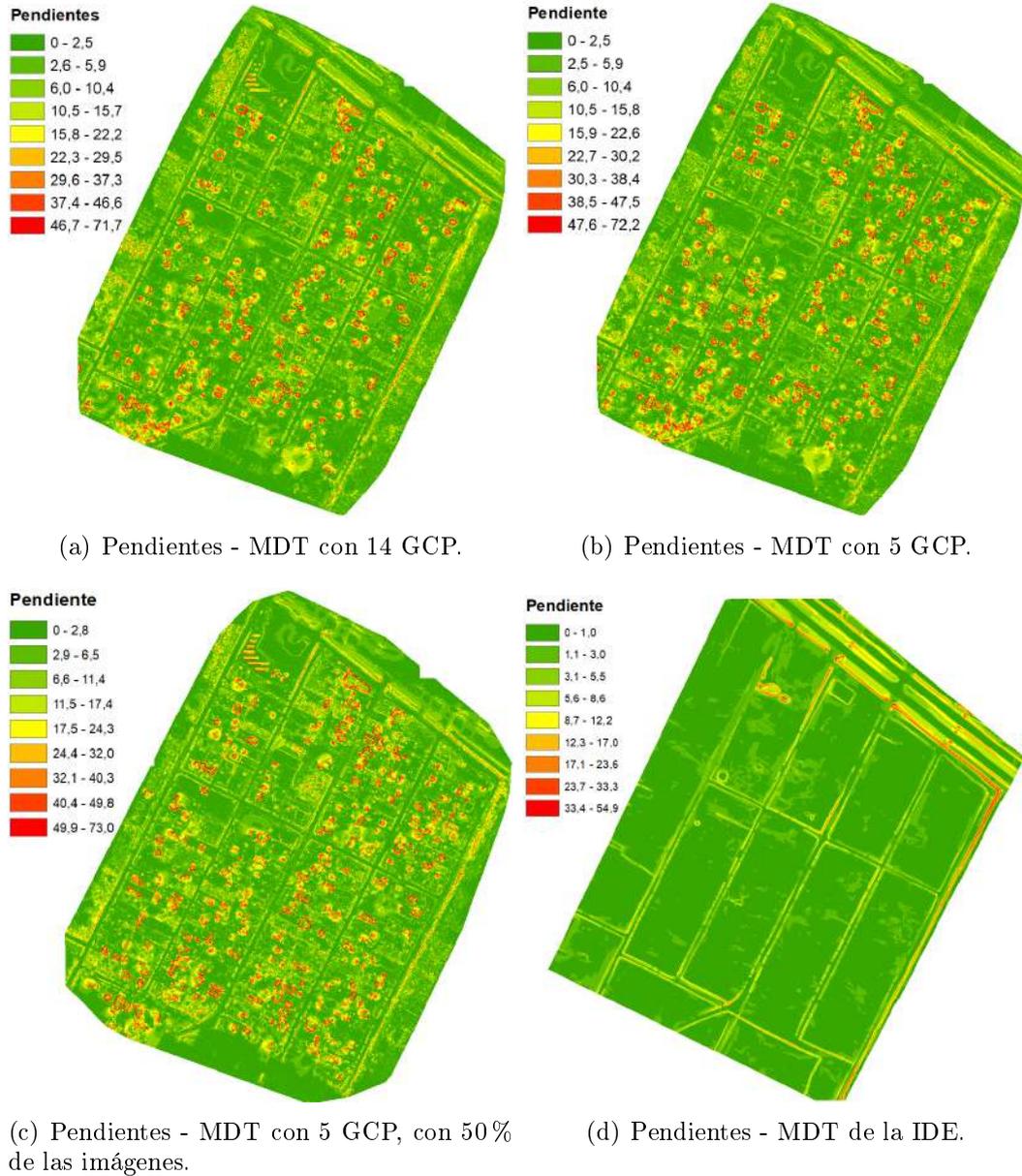


Figura 52: Modelos de pendiente realizados a partir del MDT de IDE y los MDT con 14 y 5 puntos de control, con 100 % y 50 % de las fotografías. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Diferencias en pendientes

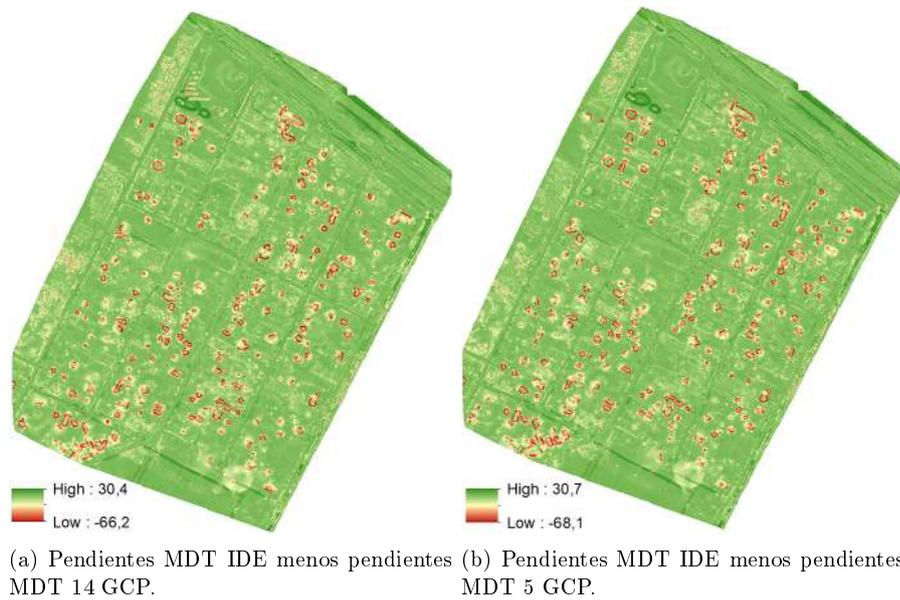


Figura 53: Diferencias entre los modelos de pendientes realizados a partir del MDT de IDE y los MDT con 14 y 5 puntos de control, con 100 % y 50 % de las fotografías. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

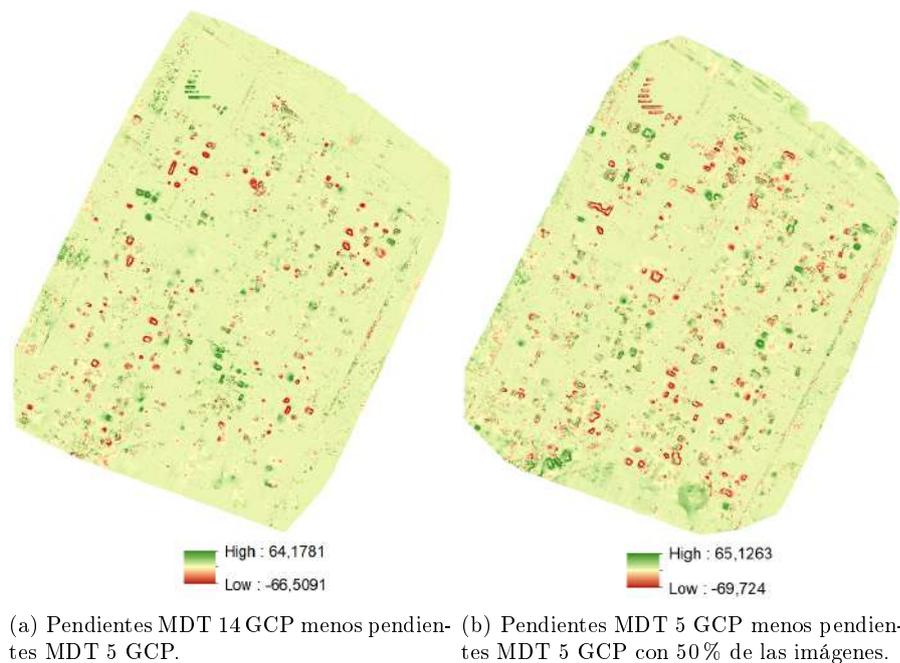
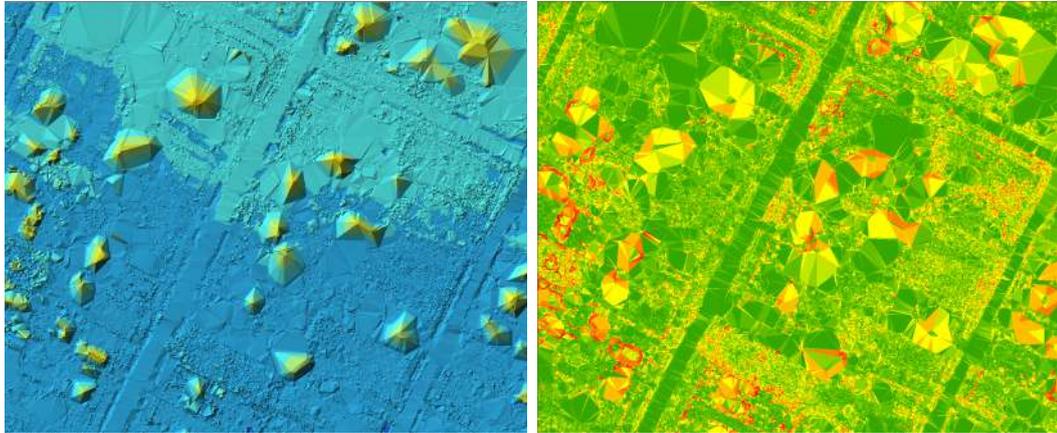


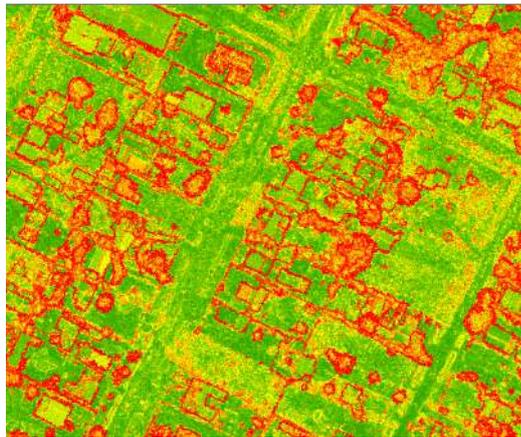
Figura 54: Diferencias entre el modelo de pendientes del MDT con 14 y 5 puntos de control; y entre 5 GCP con 100 % y 50 % de las fotografías. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Nube de puntos LAS



(a) Elevaciones, LAS.

(b) Pendientes del terreno, LAS.



(c) Pendientes, todos los puntos, LAS.

Figura 55: Representaciones de la nube de puntos LAS, zoom en un área de ejemplo. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Nuevo MDT a partir de nube de puntos LAS

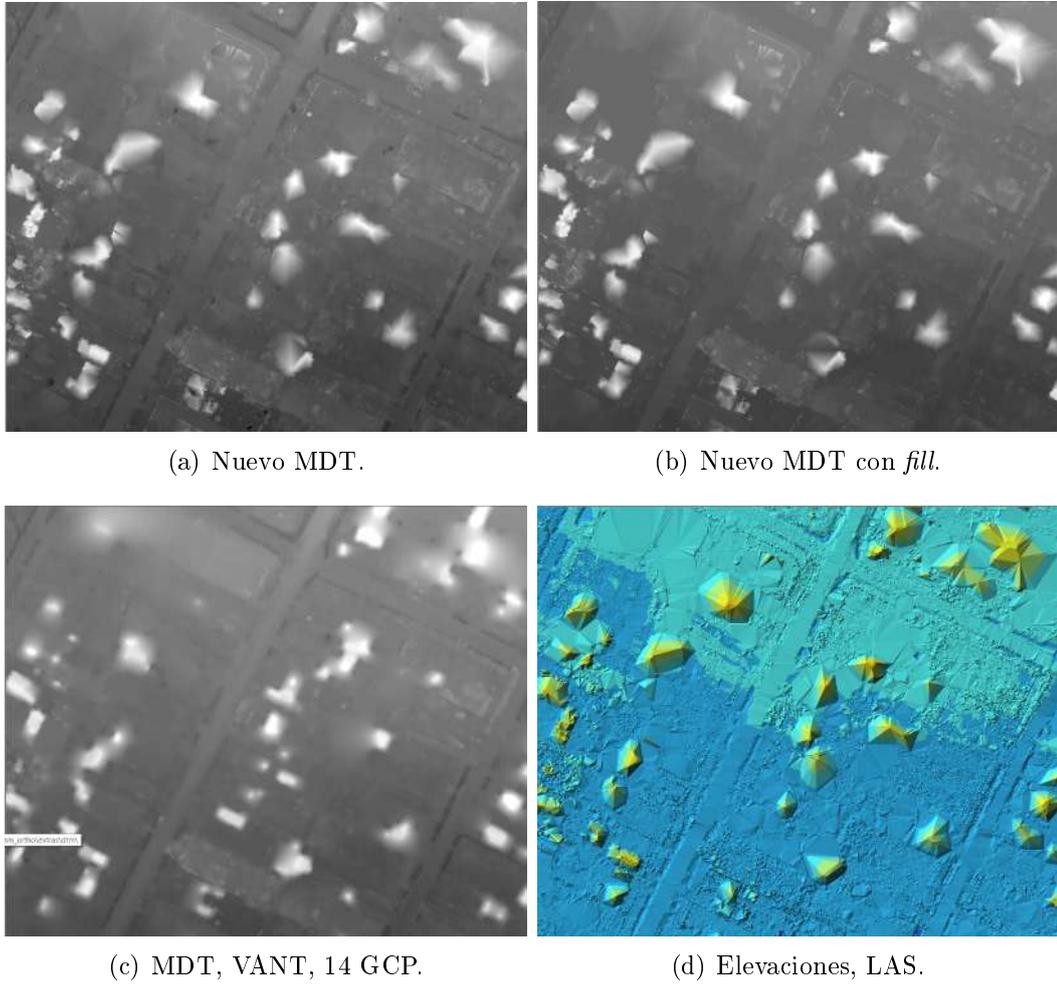


Figura 56: Comparación entre el nuevo MDT elaborado en *ArcMap* y el obtenido en *Pix4Dmapper*. Nube LAS, representando elevaciones. Fuente: elaboración propia.

Malla de puntos regulares Como última instancia de comparación, se elaboró una malla de puntos regulares cada 5 metros (*QGIS*). Para estos puntos se extrajo el valor en el raster del MDT de IDE, el MDT creado a partir de 14 GCP y 5 GCP, estando estos dos últimos resampleados y snapeados al MDT de la IDE (*ArcMap*).

Inicialmente se evalúan las diferencias en MDT, para toda la malla, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 9 y Figura 57.

| | IDE-14GCP | 14-5GCP |
|----------------|-----------|---------|
| Mínimo | -4,21 | -3,11 |
| Máximo | 2,91 | 2,77 |
| Media | -0,14 | -0,03 |
| Desv. estándar | 0,52 | 0,23 |

Tabla 9: Estadísticas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular. Medidas en metros. *ArcMap*. Fuente:elaboración propia.

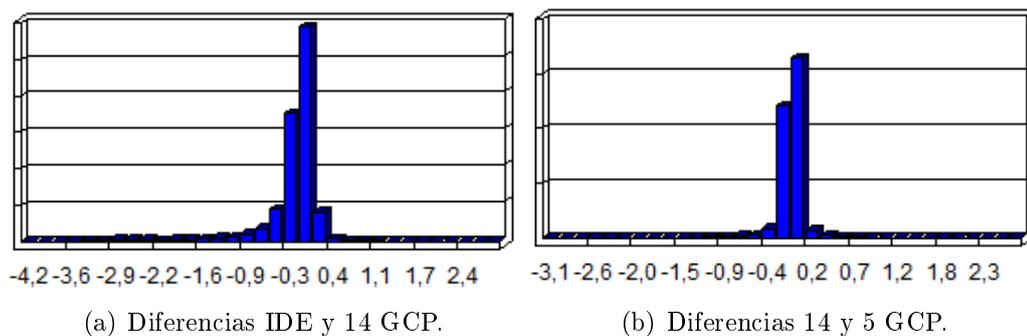


Figura 57: Histogramas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Para intentar mejorar estos resultados, se quitan del análisis los puntos que caen sobre árboles y construcciones (Figura 58). Estos puntos se eliminan manualmente mediante fotointerpretación de ortofoto producida a partir del vuelo con el VANT.



Figura 58: Puntos de la malla sobre los que se realizan las comparaciones posteriores. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

En esta nueva malla “con agujeros” se vuelven a evaluar las diferencias anteriores, obteniéndose los resultados de la Tabla 10 y Figura 59.

| | IDE-14GCP | 14-5GCP |
|----------------|-----------|---------|
| Mínimo | -1,86 | -1,49 |
| Máximo | 1,89 | 0,83 |
| Media | 0,01 | -0,02 |
| Desv. estándar | 0,20 | 0,08 |

Tabla 10: Estadísticas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. Medidas en metros. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Ampliando este procesamiento, se buscan los outliers de ambas series de diferencias, ubicando geográficamente dichos puntos para intentar especular a qué responden estas diferencias (Figura 60).

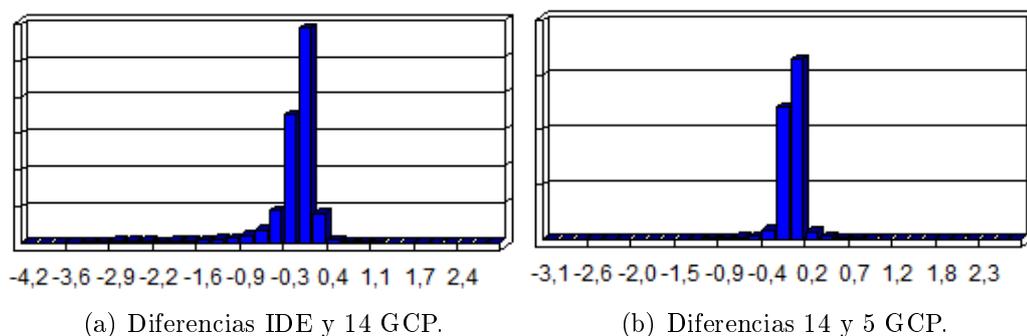


Figura 59: Histogramas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.



Figura 60: Ubicación geográfica de los outliers de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las comparaciones en las diferencias de pendientes se obtienen los siguientes resultados (Tabla 11):

| | IDE-14GCP | 14-5GCP |
|----------------|-----------|---------|
| Mediana | -0,84° | 0,02° |
| Media | -1,33° | 0,01° |
| Desv. estándar | 3,74° | 1,93° |

Tabla 11: Estadísticas de las diferencias en pendiente entre los modelos basados en el MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. *ArcMap*. Fuente:elaboración propia.

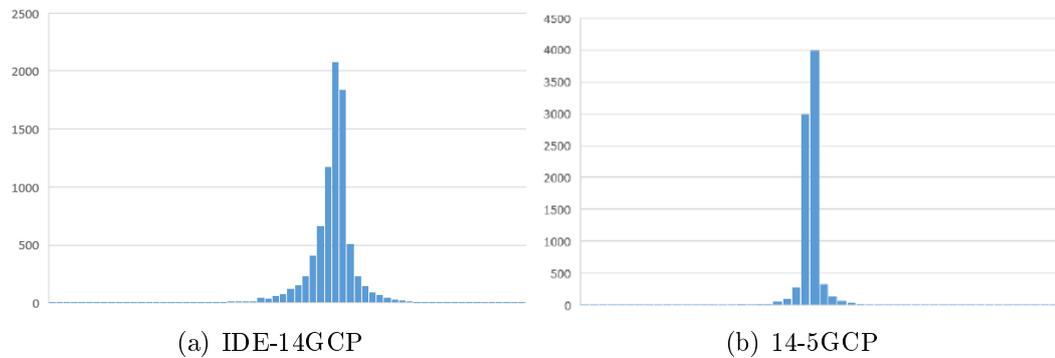


Figura 61: Histograma de las diferencias en pendiente entre los modelos basados en el MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. Divisiones reglares cada 1°. Fuente:elaboración propia.

7.4. Perfiles

Planificación La planificación de los perfiles se realiza partiendo del modelo de cuencas aportado por el tutor del proyecto, este se expone en la Figura 62 (modelo que se realiza a partir del MDT urbano de la IDE procesado previamente con la herramienta de relleno (*fill*) en *ArcMap*). En base a este raster y de acuerdo a las especificaciones elaboradas fueron elegidos los siguientes perfiles (Figura 62):

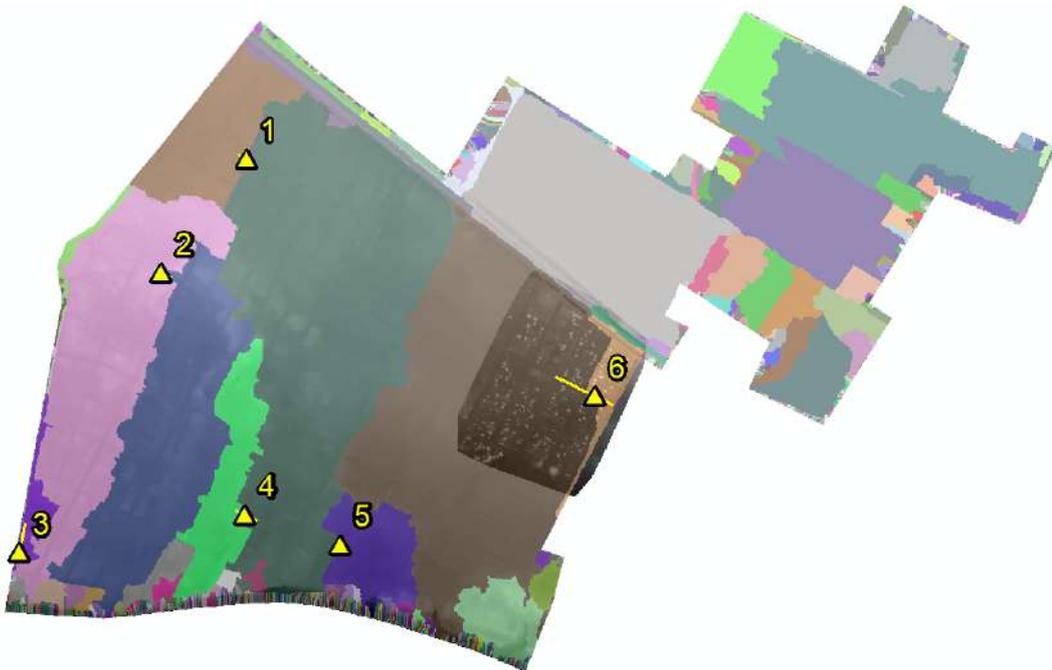


Figura 62: Perfiles planificados en gabinete. *QGIS*. Fuente: elaboración propia.

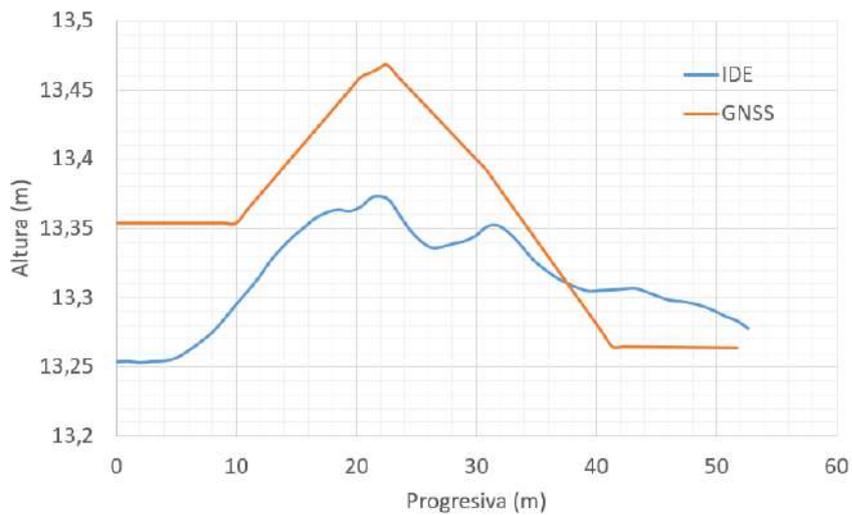
Relevamiento Al momento del relevamiento lo único que varía son las extensiones de los mismos, en general aumentando hacia un lado.

El relevamiento totalizó 69 puntos divididos en 6 perfiles. Cada uno de ellos se expondrá a continuación, siguiendo la numeración de la Figura anterior (N°62). En las planimetrías se observarán zonas de distintos colores, con cierto grado de transparencia; cada una de ellos responde a una cuenca diferente.

· Perfil 1



(a) Planimetría.



(b) Altimetría GNSS vs. IDE.

Figura 63: Perfil 1, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. *ArcMap, Excel*. Fuente: elaboración propia.

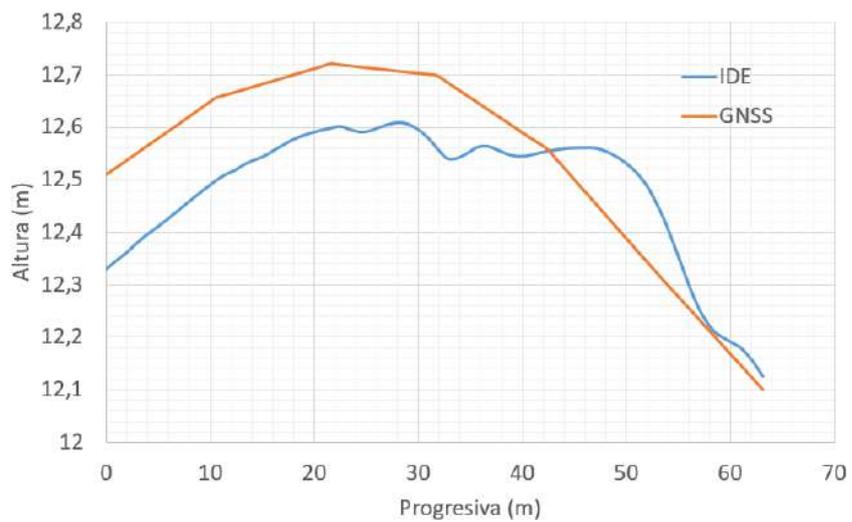
Estadísticos:

- ▷ Mediana → -0,05 m
- ▷ Media → -0,05 m
- ▷ Desviación Estándar → 0,06 m

· Perfil 2



(a) Planimetría.



(b) Altimetría GNSS vs. IDE.

Figura 64: Perfil 2, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

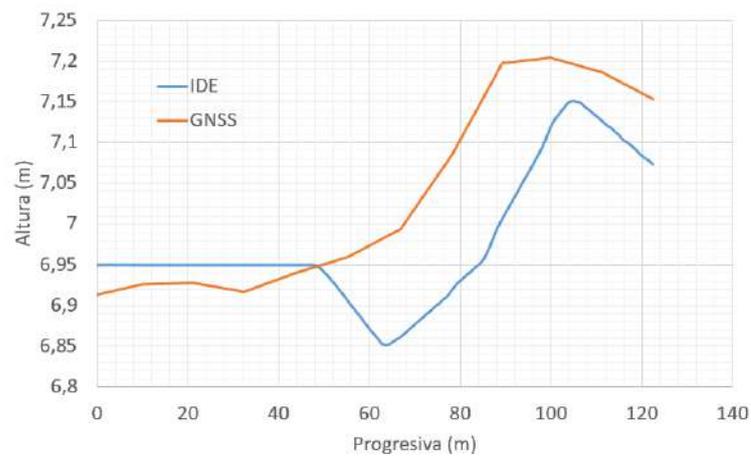
Estadísticos:

- ▷ Mediana → -0,11 m
- ▷ Media → -0,07 m
- ▷ Desviación Estándar → 0,12 m

· Perfil 3



(a) Planimetría.



(b) Altimetría GNSS vs. IDE.

Figura 65: Perfil 3, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. *ArcMap*, *Excel*. Fuente: elaboración propia.

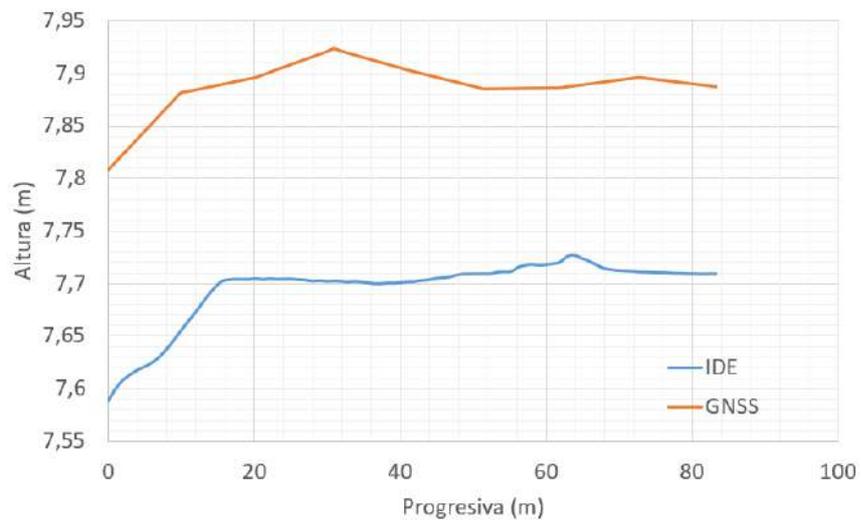
Estadísticos:

- ▷ Mediana → -0,06 m
- ▷ Media → -0,05 m
- ▷ Desviación Estándar → 0,08 m

· Perfil 4



(a) Planimetría.



(b) Altimetría GNSS vs. IDE.

Figura 66: Perfil 4, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. *ArcMap*, *Excel*. Fuente: elaboración propia.

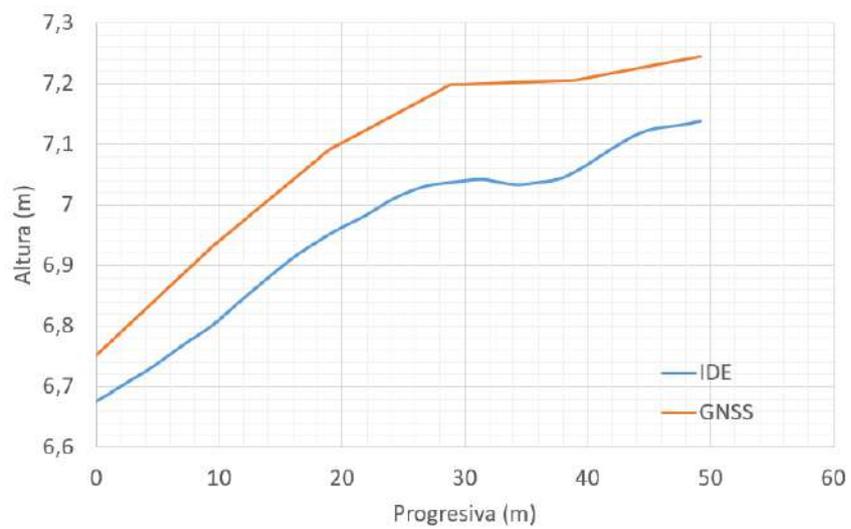
Estadísticos:

- ▷ Mediana → -0,19 m
- ▷ Media → -0,20 m
- ▷ Desviación Estándar → 0,02 m

· Perfil 5



(a) Planimetría.



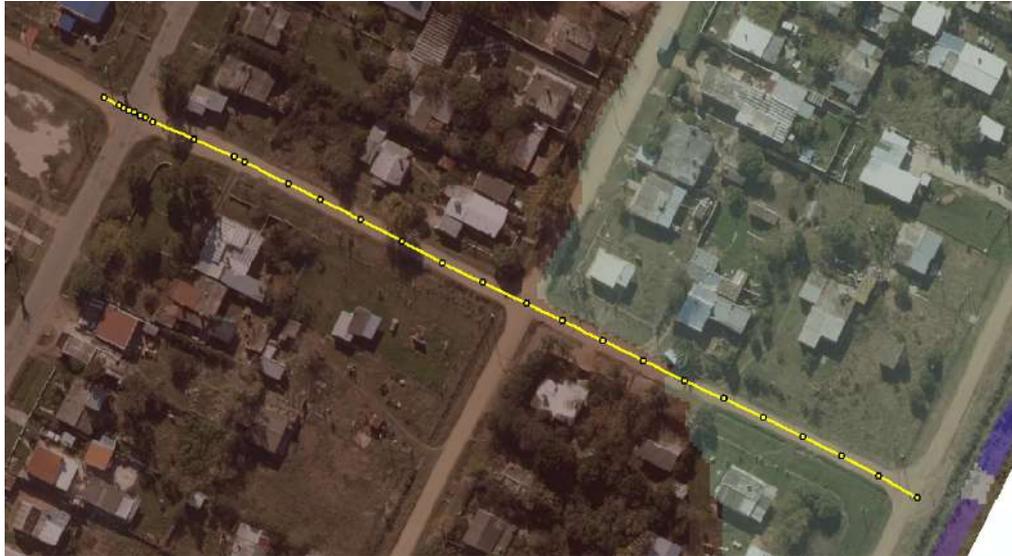
(b) Altimetría GNSS vs. IDE.

Figura 67: Perfil 5, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. *ArcMap*, *Excel*. Fuente: elaboración propia.

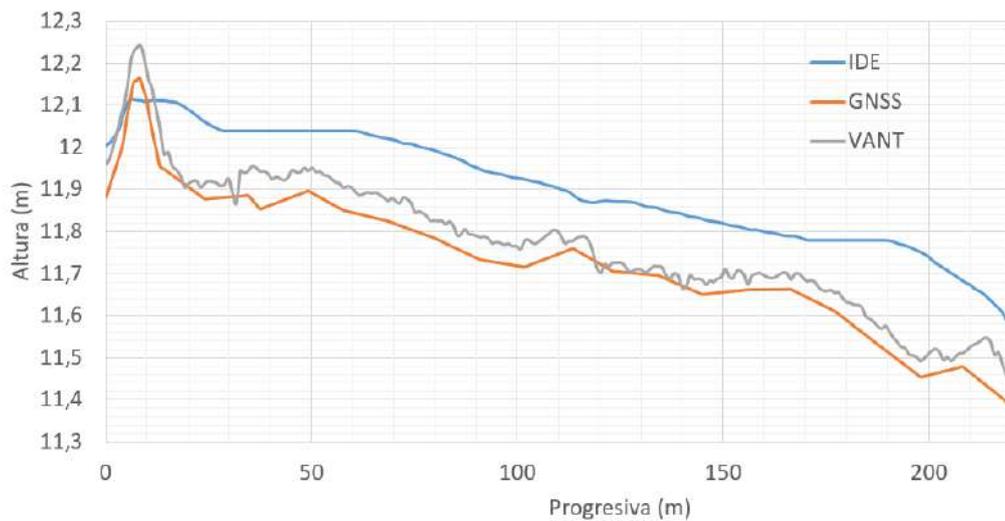
Estadísticos:

- ▷ Mediana → -0,13 m
- ▷ Media → -0,13 m
- ▷ Desviación Estándar → 0,04 m

· Perfil 6



(a) Planimetría.



(b) Altimetría GNSS vs. IDE vs VANT.

Figura 68: Perfil 6, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. *ArcMap*, *Excel*. Fuente: elaboración propia.

Estadísticos (IDE-GNSS):

▷ Mediana → 0,16 m

▷ Media → 0,15 m

▷ Desviación Estándar → 0,08 m

Estadísticos (VANT-GNSS):

▷ Mediana → 0,05 m

▷ Media → 0,05 m

▷ Desviación Estándar → 0,02 m

Por otro lado, si se evalúa la totalidad del relevamiento como una unidad, se tienen los siguientes datos estadísticos:

▷ Mediana → -0,004 m

▷ Media → 0,002 m

▷ Desviación Estándar → 0,147 m

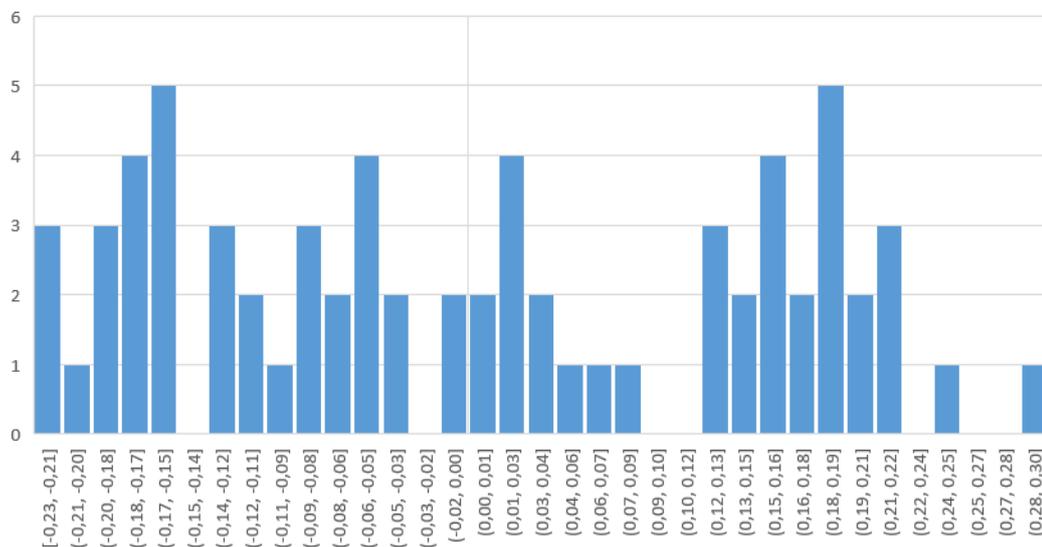


Figura 69: Forma del histograma de las diferencias en altura para los 69 puntos relevados (35 divisiones). *Excel*. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la evaluación de la ubicación de divisorias de aguas a partir de los perfiles:

- Perfil 1 (pág. 93): los puntos más altos se distancian 70 cm en progresiva, y difieren 10 cm en cota.
- Perfil 2 (pág. 94): los puntos más altos difieren 10 cm en cota y se encuentran a poco menos de 7 m en la progresiva. Sin embargo, si se considera el segundo punto más alto del perfil de IDE, que está tan solo 1 cm por debajo del mayor, la diferencia en planimetría se reduce a 80 cm. Este centímetro no es significativo a los niveles de precisión que se trabaja, por lo que considerar el “segundo punto más alto” se considera correcto.
- Perfil 3 (pág. 95): los puntos más altos difieren 5 cm en cota y se distancian en planimetría 5 m.
- Perfil 4 (pág. 96): los puntos más altos difieren 20 cm en cota y 33 metros planimétricamente. Aquí se halla el problema de que casi todos los puntos del perfil relevado se encuentran a ± 5 cm de altura. De este modo, si se considera no el punto más alto del perfil, sino uno 3 cm por debajo, la distancia en planimetría entre puntos altos baja a menos de 2 m. Cabe señalar que 3 cm está en los límites de precisión con los que se releva mediante GNSS, es decir, diferencias menores no son significativamente relevantes.
- Perfil 5 (pág. 97): en este caso el relevamiento no se extendió en campo en relación a lo planificado, siendo de 50 m tal y como estaba planificado. Como resultado en el perfil no se logra relevar la divisora de aguas, sino que simplemente se tiene un pequeño máximo local (entorno a la progresiva 30 m). Nuevamente este máximo local se destaca por no más de unos cuantos centímetros.
- Perfil 6 (pág. 98): En este caso la mayor cota del vuelo de VANT difiere 10 cm de la relevada con GNSS, estando estos puntos distanciados 10

cm en la progresiva. La diferencia en cota entre GNSS e IDE es de 5 cm, estando distanciado en progresiva 2 m. Si se compara la cota de VANT vs. IDE para la divisoria de aguas, estas difieren 15 cm.

Se presenta la Tabla 12 para resumir las cifras expuestas. Una tabla análoga es expuesta para resumir las discrepancias halladas en el Perfil N°6 (Tabla 13).

| N° Perfil | Diferencias | |
|-----------|-------------|---------------|
| | Progresiva | Cota |
| 1 | 70 cm | 10 cm |
| 2 | 80 cm | 10 cm |
| 3 | 5 m | 5 cm |
| 4 | 33 m / 2 m | 20 cm / 23 cm |
| 5 | – | – |

Tabla 12: Resumen de diferencias en cota y progresiva entre MDT de IDE y perfiles GNSS, para divisorias de aguas. Fuente: elaboración propia.

| Comparación | Diferencias | |
|-------------|-------------|-------|
| | Progresiva | Cota |
| VANT – GNSS | 10 cm | 10 cm |
| GNSS – IDE | 2 m | 5 cm |
| IDE – VANT | 2 m | 15 cm |

Tabla 13: Resumen de diferencias en cota y progresiva de la divisoria de aguas, entre MDT de IDE, perfiles GNSS y MDT de VANT. Perfil 6. Fuente: elaboración propia.

Si se evalúa las diferencias en cota de todos los puntos relevados, de todos los perfiles, se tiene una media y mediana de cero, teniendo simetría en torno a cero las discrepancias totales. También cabe señalar que la desviación estándar es baja. Del histograma (Figura 69) se observa la superposición de diferentes distribuciones, lo que es coherente si suponemos que cada perfil tiene su propia distribución.

7.5. Ejemplo de aplicación

En este apartado primero se expone la visualización de los tres diferentes modelos de terreno: RENARE, IDE nacional e IDE urbano (Figura 70). Luego, para cada uno de ellos, se muestran las extensiones geográficas de las cuencas obtenidas (Figura 71) y un cuadro comparativo de algunas medidas cuantitativas obtenida de cada una de ellas (Tabla 14). El cómo las diferencias en estas medidas impactan en los cálculos de drenaje, dependerá de los métodos y criterios adoptados por el profesional idóneo en el área, así como del caso particular.

Básicamente el algoritmo seguido, llevado a cabo en *ArcMap*, implica la ejecución de la siguiente secuencia de herramientas:

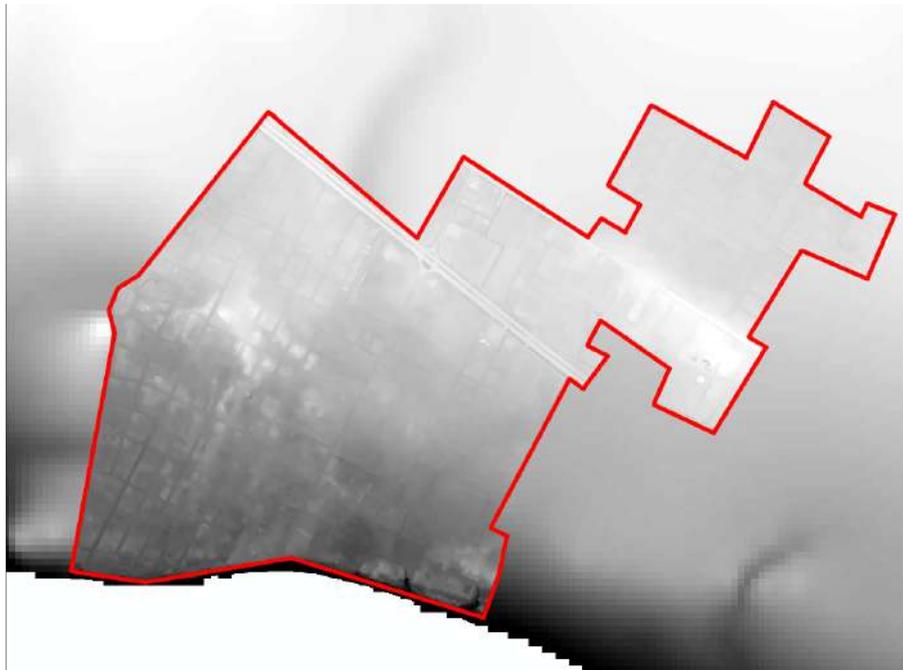
- Fill
- Flow Direction
- Flow Accumulation
- Flow Length
- Snap Pour Point
- Watershed
- Raster to Polygon

| MDT | Área (m ²) | Longitud del cauce (m) |
|--------|------------------------|------------------------|
| RENARE | 61200 | 677 |
| 250 cm | 357873 | 2008 |
| 100 cm | 361648 | 2136 |

Tabla 14: Cuadro comparativo de medidas sobre cuencas obtenidas de los diferentes MDT: RENARE, IDE nacional y urbano. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.



(a) MDT de IDE, producto nacional (250 cm de *pixel*) vs. producto urbano (100 cm de *pixel*, delimitado en rojo).



(b) MDT de RENARE (30 m de *pixel*) vs. producto urbano (100 cm de *pixel*, delimitado en rojo).

Figura 70: Muestra de los productos MDT utilizados: RENARE e IDE, nacional y urbano. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.



Figura 71: Cuencas obtenidas. MDT IDE nacional, verde; MDT IDE urbano, azul; MDT RENARE, blanco con patrón a 45°. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

8. Análisis crítico e interpretación

En esta sección se realizará el análisis e interpretación de los resultados expuestos anteriormente. También se hará un análisis crítico de los procedimientos mediante los que fueron obtenidos dichos resultados.

8.1. Control de calidad planialtimétrica del MDT-IDE

Puntos a relevar En el proceso de seleccionar puntos claramente identificables donde contrastar planialtimetría, se presenta la dificultad de la existencia de zonas donde el espacio público está muy desprovisto de mobiliario urbano, tapas u otros objetos utilizables. En estos sitios, las columnas de cableado y alumbrado público son los únicos elementos existentes. Si combinamos esto con la ausencia de cerramientos bien consolidados, la selección de puntos a relevar se hace muy difícil sino imposible.

Las zonas donde se dan ambas condiciones combinadas comprenden principalmente los litorales, encontrándose en este caso menos urbanizados que el centro de los barrios. Todo lo anterior se presentó como una dificultad que se sortea a lo largo del trabajo, pero que no fue prevista, por lo que consumió tiempo y recursos que no fueron planificados.

Caminamiento El resolver el caminamiento modelándolo como un problema de red resultó muy ventajoso, al ser un procedimiento que, aprovechando las ventajas de las técnicas de los GIS y consumiendo pocos recursos, ofrece una solución muy completa. Esta solución permite ahorrar tiempo y otros recursos, tanto el diseño del caminamiento, como en su ejecución.

Para aprovechar al máximo las ventajas que este presenta, resulta necesario que quien guía el camino lo estudie antes de salir a campo, ya que los tiempos

de relevamiento son muy cortos, lo que implica que el equipo que releva se encuentre en casi constante movimiento.

Trabajo de campo Antes de realizar cualquier análisis de depuración en los datos relevados, se dan casos donde los puntos deben ser eliminados, ya sea en su totalidad o en sus coordenadas planimétricas ó altimétricas. Estas situaciones no fueron previstas en la planificación. Podría haberse previsto tener puntos “suplentes” que palearan estos descartes, de manera de no disminuir la cuantía total de puntos necesarios para el estándar NSSDA, según la bibliografía de referencia.

Procesamiento En cuento a las diferencias en sistemas de referencia, ya sean planimétricos como altimétricos, no presentan complicación ninguna ya que muy fácilmente las coordenadas se expresan en el sistema de referencia que el usuario determine, mediante el uso de diferentes software.

En particular en este trabajo se utilizó *ArcMap* para las transformaciones en planimetría, cuyo uso es muy sencillo e intuitivo. Cabe destacar que las diferencias en el pasaje de EPSG:32721 a ESPG:5382 no fueron notorias en los datos procesados, los cuales estaban expresados al milímetro.

En altimetría se utilizó *Leica Geo Office*, nuevamente el proceso es sencillo. El principal obstáculo en este punto es contar con el archivo en el que se encuentra la información asociada el geoide EGM 2008. En este punto resultó de suma importancia el aporte del profesor de Geodesia 3, Ing. Agrim. Roberto Perez Rodino, quien proporcionó este archivo necesario.

En lo que respecta al proceso estadístico, se verificaron la hipótesis de normalidad e independencia, necesarias para el estándar NSSDA. Cabe destacar que inicialmente, sin el descarte primero de outliers mediante la prueba de Grubbs, la muestra no superaba los test de normalidad.

Mediante el gráfico de los vectores de error, se puede verificar cualitativamente la ausencia de sistematismos al considerar la totalidad del área. Por otra parte, hay un sector de poco más de 10 puntos, al Suroeste de la zona relevada, que si se considera separadamente del resto, puede observarse una cierta tendencia en la dirección de los errores, perteneciendo casi todos al segundo cuadrante. A los efectos del estudio de toda la zona, se desestima la relevancia de dicha tendencia localizada.

Estándar NSSDA Lo primero a destacar es que los datos descartados inicialmente, así como los descartados durante el análisis estadístico, redundaron en que no se lograran utilizar 100 puntos para la evaluación del estándar. En total se utilizaron 87 puntos para planimetría y 95 en altimetría, siendo esta última la más cercana a la cifra objetivo de 100. Este hecho abre la duda en torno a cuán cierto es afirmar un nivel de confianza del 95%. Según los estudios llevados a cabo, por ejemplo [12], para una muestra mayor a 50 puntos, pero menor a 100, se tienen niveles de confianza entre 93 % y 95 %.

Si se observan las cifras obtenidas en el cálculo de estándar, error medio cuadrático de 15 cm en planimetría y 16 cm en altimetría, y los resultados del estándar NSSDA, 26 cm en (X, Y) y 32 cm en (Z) ; se comprueba que no son valores disparatados: ni muy grandes, ni excesivamente pequeños; sino que están acorde a lo esperado, sobretodo teniendo en cuenta las cifras de refe-

rencia que se tienen de exactitud de estos productos a nivel global: 20 cm en planimetría para la ortofoto (0,1 m de pixel, producto urbano) y 30 cm en altimetría para el MDT (1,0 m de pixel, producto urbano).

Ahora que se conoce la exactitud planialtimétrica para los productos principales del VFN 2017-2018, se cuentan con mejores insumos para evaluar la idoneidad de su uso en distintos trabajos y proyectos que surjan a mediano y largo plazo para la zona.

Fórmula de Koppe Los resultados obtenidos muestran la ausencia de una ley lineal que relacione el error en altura con la pendiente del lugar. Esto se puede deber a las bajas pendientes que predominan en la zona, siendo un área sumamente llana.

8.2. Elaboración de un MDT a partir de vuelo de VANT

8.2.1. Planificación

Planificación del vuelo Si se compara la planificación inicial realizada mediante el uso de *DroneDeploy* con las características del vuelo efectivamente ejecutado, se encuentran similitudes y también grandes diferencias.

Por un lado el tamaño de pixel es similar, de 3 cm en la planificación vs. 2,51 cm. Por otro lado las imágenes y el tiempo de vuelo efectivos son bastante mayores: de 152 fotos a 342 (125 % más) y de 10 a 16,5 minutos (65 % más). En este sentido, el aumento en la cantidad de fotografías responde principalmente al aumento de los solapamientos, de 70 % frontal a 80 % y de 60 % lateral a 80 %. Por otro lado, el aumento del tiempo de vuelo se debe a la menor velocidad media alcanzada por el VANT en relación a lo planificado, pasando de 12 m/s a 9 m/s. También interviene en estos parámetros la diagramación de las líneas de vuelo.

Elección de la hora de vuelo El calculo del momento óptimo para realizar el vuelo fue una buena guía a tener en cuenta. Más allá de eso, la hora a la que realmente se ejecutó el vuelo dependió más del tiempo que insumieron otras tareas y del tiempo disponible por los operadores. Estas cuestiones redundaron en que el vuelo se ejecute desde las 11:25 hs. hasta las 11:40 hs. aproximadamente, casi una hora antes de la hora de referencia 12:29 hs.

Siendo tan poca la diferencia entre la hora volada en relación al horario de referencia, no se notan señas cualitativas en los productos obtenidos que den el indicio de que la hora elegida no haya sido la más adecuada.

8.2.2. Trabajo de campo

Vuelo de prueba El haber realizado un vuelo de prueba fue una experiencia muy positiva desde diversos puntos de vista, el tener un primer acercamiento a la metodología de armado del VANT y del vuelo, así como la evaluación de la calidad de visualización de las marcas para GCP con stencil, se evalúa como muy enriquecedor para el trabajo posterior, al realizar el vuelo en el área real de estudio.

En cuanto a la visualización de las marcas, tanto al sol como a la sombra se identifica muy claramente el punto que materializan. Quizás en la imagen expuesta en el presente informe (Figura 32), no se muestra la marca a la sombra tan claramente como realmente se puede observar en las fotografías recopiladas por el VANT.

Materialización y relevamiento de puntos de control y apoyo Un procedimiento de materialización y relevamiento simultáneo, para hacerse de manera óptima, implica la participación de más de dos personas. Dado que este no era el caso, la decisión de primero realizar todas las materializaciones y luego el relevamiento se considera como acertada, permitiendo optimizar los tiempos de los procedimientos y favoreciendo al orden de las actividades, facilitando a su vez el no cometer errores.

Entre los tres tipos de materialización utilizada, la que arrojó resultados cualitativos más claros a la hora de identificar los puntos en las fotografías tomadas por el VANT, fueron las marcas hechas mediante stencil. Las esquinas de tapas no pintadas, a veces no presentan contraste de colores tan fuertes como sería necesario para lograr una identificación óptima. En los casos en donde

estas esquinas fueron pintadas, la franja de pintura no resultó tan ancha como sería deseable.

Sin perjuicio de las críticas anteriores, todos los puntos de control y apoyo pudieron ser utilizados sin problemas.

Específicamente, en cuanto a la evaluación de la marca en “L” utilizada, los resultados cualitativos en las fotografías fueron excelentes, permitiendo un correcto proceso fotogramétrico sobre las imágenes obtenidas con el VANT; siendo el lado de flecha de aproximadamente 15 píxeles, con unos 8 píxeles de ancho.

En lo referente al molde utilizado, su uso fue en campo es muy práctico, tanto en lo referente al tamaño total (más allá del espacio del stencil) como al material ligero del que se compone y su método de agarre (mediante una pequeña correa).

Ejecución del vuelo Todos los preparativos realizados permitieron que el vuelo se ejecutara sin inconveniente alguno.

Una vez que las imágenes capturadas fueron obtenidas desde la tarjeta SD inserta en el VANT, las mismas empezaron a ser procesadas mediante *Pix4Dmapper*, en conjunto con los datos extraídos del GNSS. El hacer el procesamiento inicial aún estando en zona de estudio permite tener el beneficio y la tranquilidad de que, de detectarse problemas que hagan necesario volar de nuevo toda o parte del área, esto se pueda realizar sin mayores complicaciones. Lo mismo ocurre de ser necesarios nuevos relevamientos GNSS.

8.2.3. Procesamiento: *Pix4D*

Software y hardware El software utilizado presenta los beneficios de permitir la construcción de un MDT de manera simple y sencilla. El procedimiento llevado a cabo no se expuso dado que, además de no ser excesivamente complicado, ya se encuentra descrito en proyecto de grado anteriores (por ejemplo [26]). Además, no es el espíritu de este trabajo exponer un tutorial de un cierto software específico.

En cuanto al hardware, tanto el procesador como la memoria fueron suficientes para que todos los procesos pudieran completarse, y además, en tiempos razonables, siendo que el subproceso que más tardó, ocupó cerca de 2 horas (densificación de nube de puntos). En el aspecto de los recursos más utilizados, el monitoreo de los estadísticos mostró que el procesador fue exigido al 100 % de su capacidad y velocidad, mientras que la memoria RAM no fue igualmente exigida, funcionando mayoritariamente a menos del 80 % (Figura 72).

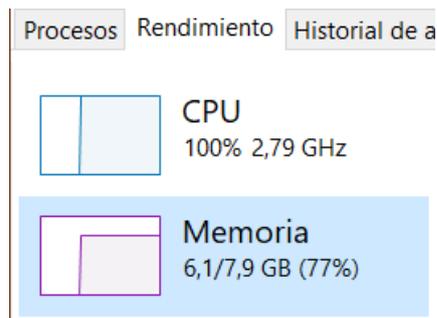


Figura 72: Rendimiento de CPU y memoria RAM durante el procesamiento del vuelo en *Pix4Dmapper*. Fuente: elaboración propia.

En lo que respecta la GPU (integrada), la exigencia se registra sobretodo en lo que concierne al 3D, siendo su uso variable a lo largo del proceso, llegando en sus picos a un empleo cercano al 20 %.

Procesamiento 14 y 5 GCP Utilizando dos cantidades diferentes de puntos de apoyo, una casi el triple que la otra, se logran resultados satisfactorios en ambos casos: primero el completar todos las etapas del proceso en *Pix4D* sin errores de proceso, alertas o incoherencias; segundo, los errores obtenidos en la georreferenciación están dentro de lo esperable, siendo en ambos casos del orden sub-pixel. De esta manera se obtiene: ortomosaico, nube de puntos (clasificada), MDS y MDT.

Comparación Comprando el procesamiento de todas las imágenes, con 14 y 5 GCP, se obtienen resultados similares. En principio el error medio cuadrático en la georreferenciación es tres veces peor para los 14 puntos (1,6 cm) que para los 5 (0,5 cm), esto puede entenderse que surge de las diferencias en precisión que se logra en cada uno de los puntos relevados con GNSS. Cabe la oportunidad de hacer un estudio más detallado, de manera de conocer si la pérdida de precisión obedece a una cierta materialización en particular, o si sigue algún otro patrón; si bien este análisis excede los alcances del presente proyecto, se plantea como un ejercicio interesante para futuros estudios.

En cuanto al tiempo de procesamiento, tomando como referencia el tiempo utilizando 14 GCP, utilizar 5 aumenta 11 % este tiempo, pasando de 6h:17m a 7h:01m. Otros indicadores, como la cantidad de puntos o su densidad mejoran ligeramente al utilizar 5 puntos en lugar de 14.

Siguiendo en el análisis de los indicadores del procesamiento, al utilizar 5 GCP con la mitad de las imágenes vs. la totalidad, el error medio cuadrático se mantiene, variando principalmente la cantidad de puntos de la nube densa

y el tiempo de procesamiento.

En particular tomando como referencia el proceso con 5 GCP y la totalidad de fotos, el utilizar solo la mitad reduce la cantidad de puntos en un 37 % (pasando de 44:750.000 a 28:135.000 puntos); consecuentemente la densidad de puntos por metro cúbico baja de 195 a 170. Por otra parte, y en esta misma línea de análisis, el tiempo de procesamiento se reduce en un 53 % (de 7h:01m a 3h18m), de manera casi lineal en relación a la cantidad de fotos utilizadas (50 %).

En una instancia de comparación entre los modelos de superficie y terreno obtenidos mediante el proceso de 14 y 5 GCP, se realizan los siguientes comentarios.

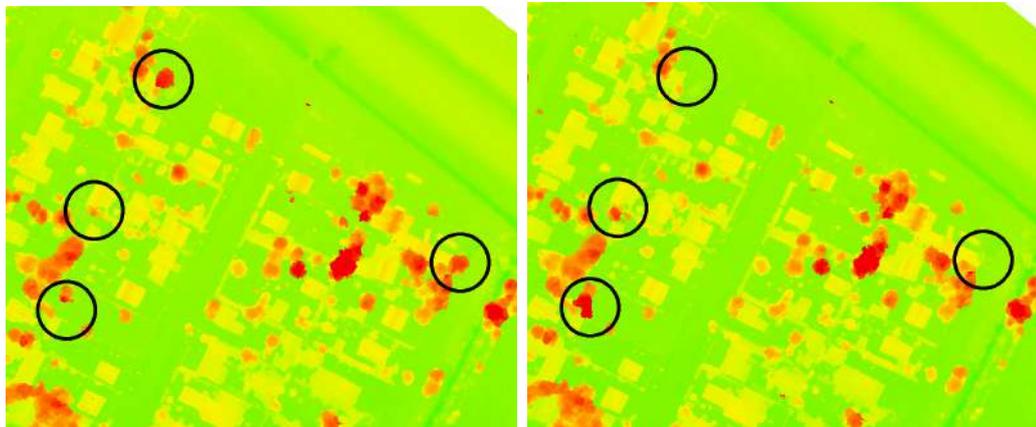
– **MDS:**

Los MDS resultantes son muy similares cualitativamente, las diferencias principales radican en algunas copas de árboles que están presentes solo en uno u otro modelo (Figura 73). Luego existen diferencias menores, como leves cambios en algunas formas o pequeñas formas presentes sólo en uno u otro modelo. En la Figura 73 también se observa que existen copas de árboles que no aparecen en ninguno de los dos modelos.

Otro punto de comparación entre ambos modelos son el rango de alturas que poseen, estos se exponen en la Tabla 15.

| | 14 GCP | 5 GCP | Diferencia |
|--------|--------|-------|-------------|
| Máximo | 30,16 | 28,87 | 1,29 (4 %) |
| Mínimo | 5,50 | 9,04 | 3,54 (64 %) |
| Rango | 24,66 | 19,83 | 4,83 (20 %) |

Tabla 15: Comparación entre los valores de alturas del MDS producto del proceso con 14 y 5 GCP. Medidas en metros. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.



(a) MDS, 14 GCP.

(b) MDS, 5 GCP.



(c) MDS con ortofoto, 14 GCP.



(d) MDS con ortofoto, 5 GCP.

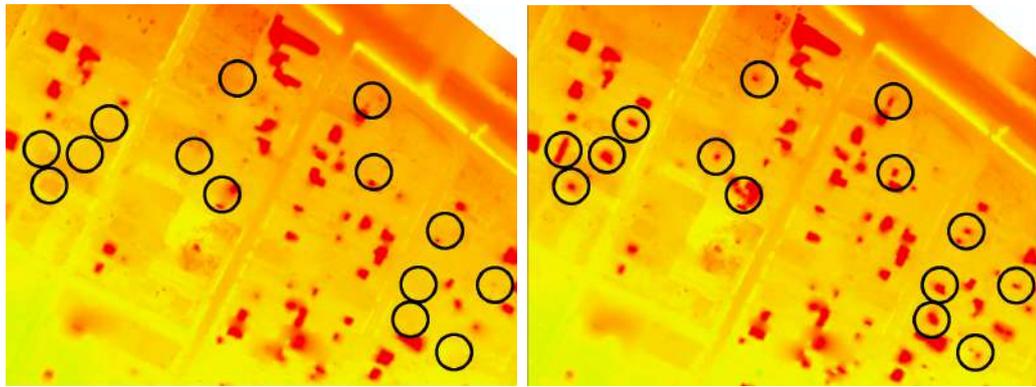
Figura 73: Algunas diferencias claras entre las copas de los árboles de los MDS basados en 14 y 5 GCP. Se muestra ortomosaico con transparencia para ampliar el panorama del lector. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

En lo que refiere al espectro de alturas que mapea cada MDS, el proceso con 14 puntos se muestra más basto, lo que es un mejor indicador. Sin embargo si evaluamos cualitativamente y respecto a los objetos que se muestran en el ortomosaico, los modelos son similares, no siendo claro cuál es mejor que cuál.

– **MDT:**

Al observar los MDT producidos se notan más diferencias que entre los MDS, en particular más diferencias cualitativas. Se observan formas asociadas a edificaciones (tienen una diferencia de altura aproximada de 3 metros respecto a sus alrededores) presentes en el MDT de 5 GCP que no aparecen en de 14 (Figura 74). En ambos casos hay muchas alturas que provienen de edificaciones que no fueron eliminadas para el MDT, en este aspecto podemos notar muchos “errores” en el modelo.

En lo que respecta al rango de alturas que maneja cada modelo, la máxima es la misma para ambos modelos, sin embargo, la mínima es 3,5 m mayor en el modelo que utiliza 5 GCP que el de 14 GCP. Al igual que en el MDS, el menor valor es alcanzado a partir del uso de los 14 GCP. Esto es consistente con los resultados expuestos anteriormente, dado que el MDT se deriva del MDS.



(a) MDT, 14 GCP.

(b) MDT, 5 GCP.



(c) MDT con ortofoto, 14 GCP.



(d) MDT con ortofoto, 5 GCP.

Figura 74: Algunas diferencias entre los MDT basados en 14 y 5 GCP. Se muestra ortomosaico con transparencia para ampliar el panorama del lector. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

En una instancia de comparación entre los modelos de superficie y terreno obtenidos mediante el proceso de 5 GCP con el 100 % y el 50 % de las fotografías, se realizan los siguientes comentarios.

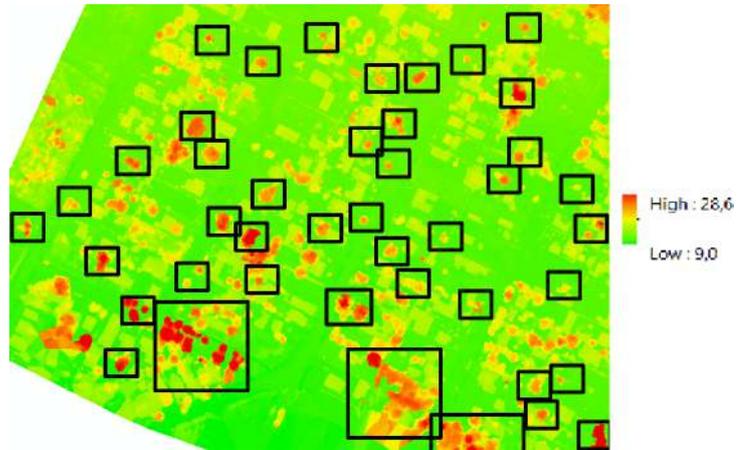
– **MDS:**

El MDS producto de utilizar 5 GCP y la mitad de las imágenes, resulta un producto más deficiente en relación al obtenido utilizando su totalidad. Por un lado el rango de alturas que maneja disminuye (Tabla 16) y por otro, no comprende la mayoría de las copas de árboles presentes en la zona (Figura 75). Las formas asociadas a edificaciones son casi las mismas que con el total de las fotos, excepto en las zonas “borde” del producto (buffer de más de 60 m), donde las formas de este tipo de objetos tienen mala resolución (Figura 76).

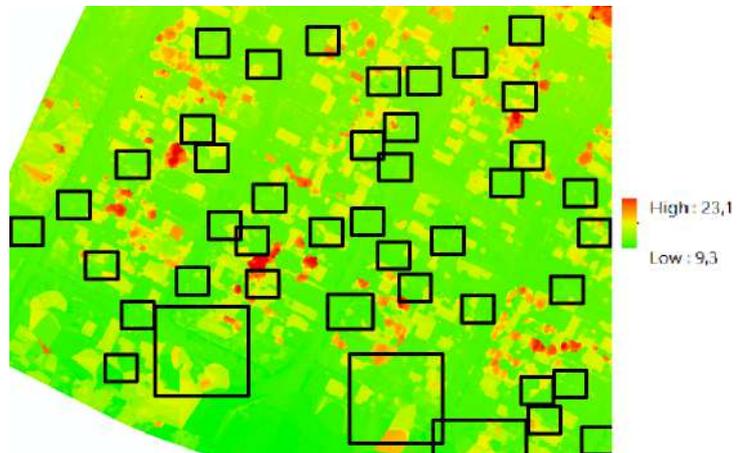
| | 14 GCP | 5 GCP | 5 GCP - 50 % fotos | Diferencia |
|--------|--------|-------|--------------------|------------|
| Máximo | 30,16 | 28,87 | 23,11 | 5,76 |
| Mínimo | 5,50 | 9,04 | 9,37 | 0,33 |
| Rango | 24,66 | 19,83 | 13,74 | 6,09 |

Tabla 16: Comparación entre los valores de alturas del MDS producto del proceso con 5 GCP y la totalidad de las imágenes vs. la mitad. Medidas en metros. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Si se comparan estos valores para el MDS producto de 14 GCP y 5 GCP con 50 % de las fotos, se tiene un máximo casi 25 % menor, un mínimo 70 % mayor y una disminución del rango de alturas cercana al 45 %.

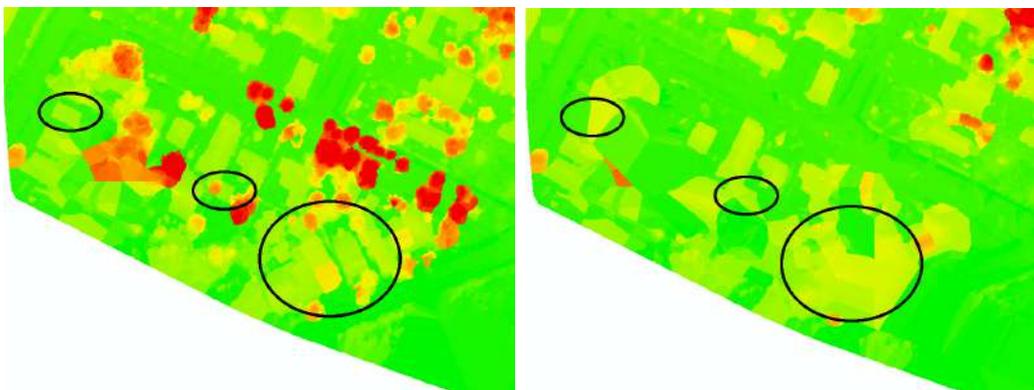


(a) MDS, 5 GCP, 100 % fotos.



(b) MDS, 5 GCP, 50 % fotos.

Figura 75: Diferencias entre las copas de los árboles de los MDS basados en 5 GCP, con 100 % y 50 % de las imágenes. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.



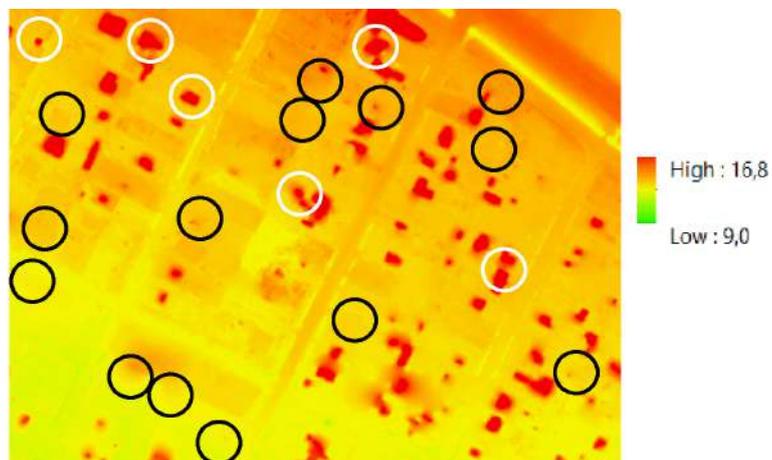
(a) MDS, 5 GCP, 100 % fotos.

(b) MDS, 5 GCP, 50 % fotos.

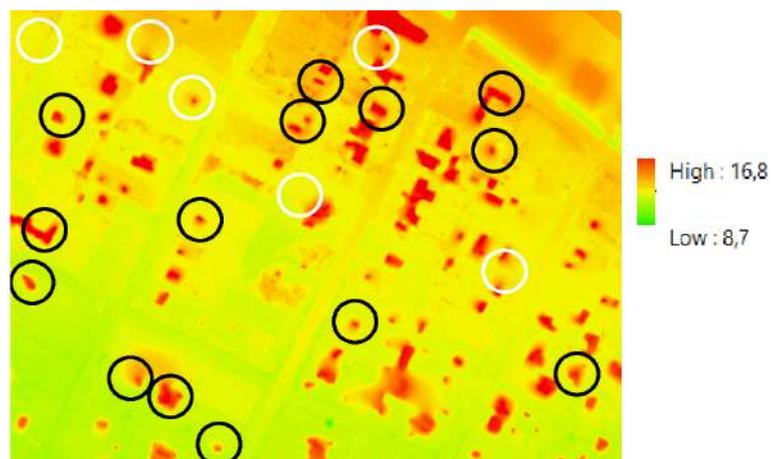
Figura 76: Diferencias en edificaciones, borde de los MDS basados en 5 GCP, con 100 % y 50 % de las imágenes. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

– MDT:

En esta comparación se observa que, en general, aquellos “errores” presentes en los MDT de 14 y 5 GCP, se agravan con el uso de la mitad de las imágenes: las formas de las edificaciones se muestra más angulosas y similares a la del MDS, además, aparecen nuevas edificaciones representadas. En este sentido, algunas de las edificaciones que sí aparecen en el modelo con el 100 % de las imágenes, no se muestran en el modelo que utiliza la mitad (Figura 77).



(a) MDT, 5 GCP, 100 % fotos.



(b) MDT, 5 GCP, 50 % fotos.

Figura 77: Diferencias en edificaciones. MDT basados en 5 GCP, con 100 % y 50 % de las imágenes. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

En lo que refiere a las **ortofotografías**, al realizar un control de calidad visual sobre los productos del uso de 14 y 5 GCP, resultan muy similares (Figura 78), tienen similares resultados en las rectificaciones y similares deformaciones en los mismos sitios (Figura 79). Estas deformaciones están presentes en su mayoría sobre los bordes del área volada, lo que responde a que son zonas que no presentan solapamiento de tantas fotografías como el resto del área.



Figura 78: Similitudes en las ortofotos basadas en 14 y 5 GCP. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

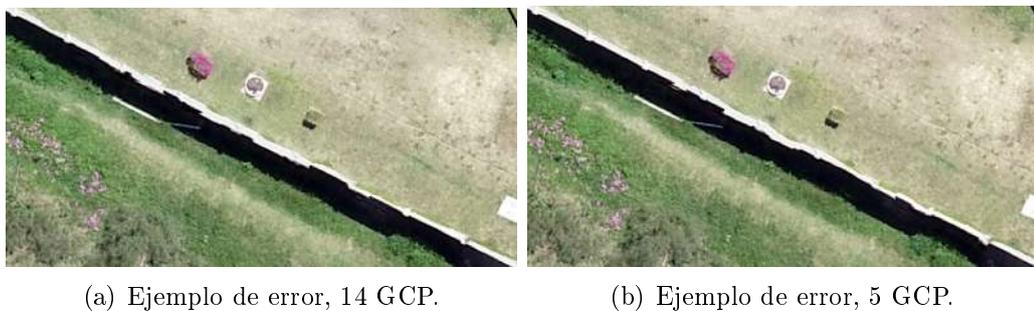


Figura 79: Similitudes en los errores presentes en las ortofotos basadas en 14 y 5 GCP. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

En cambio en el ortomosaico basado en 5 GCP y la mitad de las fotografías, se observan deficiencias en toda el área y no solo en los bordes. Estas incluyen no solo deformaciones, sino también errores de rectificación de los elementos, como se expone en la Figura 80, allí se muestran dos columnas en dos ortofotos, una basada en la totalidad de fotos y las otra en la mitad. Este tipo de errores

de rectificación se observa a lo largo de toda la fotografía. En la Figura 81 se muestra otro ejemplo interesante de las resoluciones de rectificaciones que se obtienen de una y otra forma.



(a) Ejemplo de error en columnas, 5 GCP - 50 % fotografías.

(b) Ejemplo de error en columnas, 5 GCP - 100 % fotografías.

Figura 80: Errores en la rectificación de columnas presentes en la ortofoto basada en 5 GCP 50 % imágenes vs. 100 %. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.



(a) Ejemplo de rectificación, 5 GCP - 100 % fotografías.

(b) Ejemplo de rectificación, 5 GCP - 50 % fotografías.

Figura 81: Comparación de la rectificación de una palmera, ortofoto basada en 5 GCP 100 % imágenes vs. 50 %. *ArcMap*. Fuente: elaboración propia.

Estándar NSSDA En cuento a la posibilidad de practicar el estándar NSSDA a los productos del vuelo procesado con 5 GCP, esta se descarta. Esto se debe a que, luego de proceso estadístico de los 21 puntos y del descarte de valores atípicos, sobreviven sólo 16 puntos en (X, Y) y 17 en (Z) , no siendo suficientes para practicar el estándar. De todas formas el que la técnica GNSS tenga tres veces más precisión que la estimada para el DTM producto del vuelo VANT, es cuestionable; siendo una hipótesis necesaria del estándar.

8.2.4. Procesamiento: *GIS*

En esta sección se comentan los resultados expuestos en la sección 7.3.4, producto del uso de álgebra de mapas para comparar los productos del vuelo de VANT entre sí y respecto a los de IDE.

Diferencias entre MDTs Como se observa en la Figura 50 (pág. 82), las diferencias en alturas entre los MDT productos del VANT (14 - 5 GCP y 5GCP - 5 GCP 50 % fotos) tienen un rango similar, igual a 7,4 m. Las diferencias mayores se alcanzan en sitios puntales, que responden predominantemente a construcciones, siendo un elemento que presentó problemas en su eliminación al pasar del MDS al MDT, como ya fue expuesto anteriormente. Los resultados son congruentes con los ejemplos que se expusieron anteriormente, donde existían viviendas que aparecían solo en uno u otro MDT: esto se manifiesta en el ráster de su resta como manchas asociadas a alturas positivas ó negativas, dependiendo de en cuál de los modelos la construcción no ha sido correctamente eliminada.

Si ahora se analizan las diferencias respecto al MDT de IDE expuestas en la Figura 51 (pág. 83), estas son más variables de un modelo a otro. Por un lado, en los tres casos los menores valores se asocian a copas de árboles que no fueron correctamente procesadas en la elaboración del MDT. En cuanto a las diferencias positivas, estas por un lado responden a movimientos de suelo que han ocurrido desde el VFN hasta la fecha, y por otro, responden a zonas que si bien se modelaron, están alejadas de los límites de la zona de estudio. Sería prudente quitar estas zonas del modelo final, y realizar los análisis solamente dentro del polígono que fue definido durante la misión VANT como la zona a volar.

Pendientes En lo que respecta al modelo de pendientes, este posee las mismas deficiencias que se derivan de las existentes en el MDT. El que el MDT tenga incorporado diversos elementos de origen antrópico como lo son las casas, implica un detrimento en todos sus derivados, en especial de un modelo de pendientes. En este caso, en la Figura 52 (pág. 84), se observan muchos áreas con las pendientes máximas, entre 50° y 70° , dentro de las manzanas, específicamente asociadas a formas de construcciones, según se verifica mediante las ortofotos. Es el modelo de IDE el único que no presenta este defecto.

Nuevamente las variaciones entre los MDT producto del vuelo de VANT redundan en diferencias, positivas y negativas, en los modelos de pendiente, como puede apreciarse en la Figura 54 (pág. 85).

Nube de puntos Resulta interesante observar la potencialidad de la nube de puntos clasificada, tal como se observa en la Figura 55 (pág. 86), sus diferentes posibilidades de representación dan cuenta de la variabilidad de utilidades que puede ofrecer.

Nuevo MDT a partir de nube de puntos Este nuevo MDT expuesto en la página 87, fue elaborado en *ArcMap* a partir de la nube de puntos en formato LAS. Tal como se puede observar se trata de uno modelo que no es idéntico al obtenido en *Pix4D*, sino que es similar. En particular es notorio que el modelo de *Pix4Dmapper* es más suave, siendo que este nuevo MDT tiene formas más angulosas.

Malla de puntos regulares Los histogramas del análisis inicial de diferencias entre los MDT de IDE-14GCP y 14-5GCP muestran una cierta distribución normal en los datos. En el primer caso no sólo la media es de mayor

módulo, sino que también lo es la desviación estándar, pasando de -14 cm a -3 cm la primera y de 52 cm a 23 cm la segunda. En el primer caso una desviación estándar de poco más de medio metro resulta llamativo, sin embargo, no hay que perder de vista que esta zona fue elegida precisamente por haberse dado muchos cambios a nivel de los terrenos (rellenos, nuevas casas,...), lo que es coherente con indicadores altos.

Dados los errores que ya se han analizado en los MDT del vuelo VANT, en cuanto a construcciones y arbolado, es que los puntos sobre estas áreas se eliminan del análisis. Si se evalúan nuevamente las diferencias antes expuestas, ahora se obtienen resultados mucho mejores, con medias de 1 y 2 cm y desviaciones de 20 cm (IDE-14 GCP) y 8 cm (14-5 GCP). Esto muestra cómo las diferencias en el terreno, propiamente dicho, no son grandes. Nuevamente los histogramas de la serie de diferencias muestran un comportamiento normal en la muestra.

Al ubicar geográficamente los outliers, se encuentra que están bien distribuidos por todo el modelo, sin embargo, se dan concentraciones de puntos en diferentes lugares. Estas son estudiadas para conocer si es posible deducir a qué se deben. A continuación se muestran algunos ejemplos puntuales sobre las diferencias entre el MDT de IDE y el de VANT con 14 GCP.

En el primer caso (Figura 82) se tiene una zona donde se hallaba una pequeña loma y vegetación, posteriormente ocurrió movimiento de suelos y se instalaron paneles solares, así como una vivienda. Cabe mencionar que la desaparición de esta loma aparece en los mapas de diferencias entre los MDT de IDE y los del VANT, entre los mayores valores.



(a) Imagen de IDE, se observa montículo y (b) Imagen del VANT, post movimiento de vegetación.
suelos.

Figura 82: Ejemplo 1, cúmulo de puntos outlier. Fuente: elaboración propia.

En el segundo ejemplo (Figura 83), dos grupos de outliers caen en terrenos baldíos con chirca. Al visualizar la imagen actual es notorio el movimiento de suelos que se dio en ambas parcelas, habiendo en una de ellas dos nuevas construcciones (se recuerda que todos los puntos de la malla regular que caen sobre construcciones fueron quitados para este análisis).



(a) Imagen de IDE, se observan dos terrenos baldíos. (b) Imagen del VANT, post movimiento de suelos.

Figura 83: Ejemplo 2, dos cúmulos de puntos outlier. Fuente: elaboración propia.

En el tercer ejemplo (Figura 84), se tienen puntos atípicos muy alineados, al mirar en detalle la imagen de IDE se observa que anteriormente existía un canal, el cual fue cerrado, según muestra las imágenes obtenidas del VANT.



(a) Imagen de IDE, se observa un canal. (b) Imagen del VANT, sin canal abierto.

Figura 84: Ejemplo 3, puntos outliers alineados. Fuente: elaboración propia.

Por último se exponen dos casos de outliers aislados (Figura 85). Uno responde a un cúmulo de arena para construcción en las afueras de una casa recientemente construida, y el otro responde a un camión estacionado al momento del vuelo del VANT. En ambos casos las diferencias en alturas constatadas, fueron las necesarias para hacer que estos puntos se alejaran del típico de la muestra.



(a) Imagen de IDE.

(b) Imagen del VANT, cúmulo de arena.



(c) Imagen de IDE.

(d) Imagen del VANT, camión estacionado.

Figura 85: Ejemplo 4, puntos outliers aislados. Fuente: elaboración propia.

En el caso de los outliers de diferencias entre MDT de VANT, su ubicación, si bien responde a las diferencias en los ajuste de cada MDT, no es evidente a qué motivos responden. Este análisis, si bien excede los alcances de este trabajo, se muestra como sumamente interesante.

Al evaluar los resultados de la comparación de pendientes derivadas de estos modelos (pág. 91), se tienen resultados que, por un lado muestran un comportamiento de distribución normal en los errores, y por otro lado tienen medias, medianas y desviaciones estándar muy bajas.

8.3. Perfiles

Si bien el objetivo inicial era comprobar la posición de las divisorias de aguas que surgen del modelo de cuencas, en campo varía un poco, comprendiendo también el encontrar la verdadera ubicación de la divisoria, en el caso de no hallarse claramente dentro del perfil planificado, pero sí en su cercanía. Este es el motivo por el que al relevar, los perfiles se hallan extendido más allá de los planificado.

En cuanto a la evaluación de la ubicación de divisorias de aguas a partir de los perfiles:

- **Perfil 1** (pág. 93): Estando en campo se visualizó la divisoria de aguas en el eje de una calle que corta transversalmente el perfil, por lo que se relevó un punto extra allí (además de los puntos regulares cada 10 pasos). Esto permitió tener una diferencia tan acotada en la ubicación planimétrica de la divisoria de aguas. Esto se debe a que interpolación entre los puntos GNSS es lineal, lo que implica que los máximos siempre serán alcanzados en un punto relevado, de esta forma puede considerarse un error esperable en la progresiva de entre 0 y 5 pasos.

En este perfil la diferencia en cota de la divisoria está muy por encima de la media, estando al límite del intervalo media más desviación estándar. Esto podría ser un indicio de que en los puntos con mayores variaciones de relieve es donde se dan las mayores discrepancias entre modelos de terreno.

- **Perfil 2** (pág. 94): En este perfil según el relevamiento GNSS, se tiene una pequeña lomada que en sus puntos máximos varía poco de cota, lo que se presenta como un inconveniente para determinar exactamen-

te la divisoria de aguas, sobretodo teniendo puntos cada 10 pasos. Sin embargo, tomando en cuenta el alcance del trabajo, fue suficiente para determinar que su diferencia de ubicación respecto a lo que surge del MDT de IDE, es coherente, siendo no solo menor a 5 pasos, sino menor al metro.

En cuanto a la diferencia de cota entre las divisorias, en este caso está muy cercana a la media y la mediana.

- **Perfil 3** (pág. 95): En este caso la diferencia en planimetría se encuentra en el límite de lo deseable, es decir 5 pasos. En cuanto a la diferencia de cota, es casi coincidente con la media y la mediana.
- **Perfil 4** (pág. 96): En este perfil es quizás donde se obtuvieron los peores resultados. Por un lado la media y mediana de las diferencias, ambas, se encuentran en los 20 cm, esto es de 2 a 4 veces más que el resto de perfiles. Por otro lado la desviación estándar es baja. Esto indica que el perfil se encuentra trasladado en cota, cosa que se verifica al observar el gráfico del mismo (Figura 66-b).

Estos resultados podrían responder a una reciente re-pavimentación de la calle (particularmente agregando una capa de unos 20 cm), sin embargo no se hallan evidencias que acrediten dicha sospecha.

- **Perfil 5** (pág. 97): En campo se observó que la divisoria de aguas claramente no estaba en donde indicaba el modelo de cuencas usado de base, sin embargo al no divisar en las cercanías su ubicación, se decidió simplemente relevar lo planificado y contrastar las cotas más detalladamente en gabinete, más allá de las intuiciones que se tienen en campo sobre las alturas relativas del terreno.

En este caso, donde el raster de cuencas indica una divisoria de cuencas,

podemos observar en los perfiles un pequeño máximo relativo (progresiva 30 m aprox.). El problema fundamental es que en el perfil GNSS el punto que le corresponde, no es realmente un máximo relativo, ya que el siguiente punto en progresiva se encuentra 1 cm por encima. De nuevo, 1 cm no es significativo realmente en este trabajo particular, sin embargo no permite afirmar que en ambos casos se de dicho máximo relativo, que vendría a hacer las veces de divisoria de cuenca, en este caso.

- **Perfil 6** (pág. 98): Este es el único caso en donde, en la mayor parte del perfil, el modelo de IDE se encuentra a mayor cota que el GNSS. Particularmente se mantiene una diferencia bastante constante, siendo la media y mediana de 15 cm, las menores diferencias se dan en el punto de la divisoria de aguas, el cual se halla sobre una calle transversal al perfil. La identificación de esta divisoria en campo fue lo que hizo que se extienda el perfil para incluirla en el relevamiento, además dada su corta extensión, se relevaron puntos cada 1 paso en esa zona, y no cada 10, como en el resto del perfil.

Las diferencias de cotas entre IDE y GNSS es de 5 cm, lo cual es casi tres veces menos que la mediana o la media, a su vez, una distancia en progresiva de 2 m está dentro de lo esperable en relación al resto de los perfiles.

Por su parte la ubicación de la divisoria de aguas entre los perfiles de VANT y GNSS difieren solo 10 cm en progresiva, siendo la misma cifra su diferencia en cota. Si evaluamos esta última diferencia con los estadísticos, es igual al doble de la media y la mediana, estando en el intervalo media más tres veces la desviación estándar. Esto podría indicar que las mayores diferencias se dan en este tipo de puntos extremos.

Un aspecto a señalar en cuanto a las diferencias en posición entre las divisorias de aguas en el perfil graficado y su ubicación en planimetría según el modelo de cuencas, es que este último se realizó en base al MDT de IDE con una operación de relleno (*fill*), mientras que el MDT graficado está modificado por esta operación, siendo el original que se descarga de la web de IDE.

9. Conclusiones

En este proyecto de grado se abordó la generación de insumos desde la Agrimensura para la solución, en una zona urbanizada, del drenaje pluvial. En particular se puso el foco en el control de calidad de los nuevos insumos topográficos aportados por el Vuelo Fotogramétrico Nacional (VFN), cuyos productos fueron librados al público general a fines del año 2019. Paralelamente se estudiaron diferentes métodos de levantamiento (VANT, perfiles GNSS) comparando los resultados obtenidos entre ellos y con los productos del VFN.

Cubriendo la primera de las temáticas, fue ejecutado el estándar NSSDA. Sus resultados, en planimetría y altimetría son muy buenos, encontrándose dentro de lo que era esperado para estos productos, sobretodo tomando como referencia las exactitudes a nivel país de estos productos. En cuanto al test de la fórmula de Koppe, se puede concluir que no existe una relación lineal entre la pendiente y el error en la cota de los puntos, probablemente dadas las bajas pendientes a las que está sometida la zona de estudio.

Cubriendo la segunda de las temáticas abordadas en el presente proyecto, se realizó un vuelo VANT. Sobre las fotos recogidas en este vuelo se realizaron diferentes procesamientos. Por un lado la introducción de un mayor número de puntos de apoyo no redundó en una mejora del error medio cuadrático de la georreferenciación de las imágenes, sin embargo mejoró los tiempos de procesamiento en un 10 % y produjo un MDT de mejor calidad. Por otro lado la reducción a la mitad en la cantidad de imágenes procesadas, implicó una reducción del 50 % en el tiempo de procesamiento, así como una reducción de la calidad de los MDS y MDT, en particular la nube de puntos generada

cuenta con cerca de 40 % menos de puntos; esto redundó en la obtención de una ortofoto plagada de deformaciones y errores de rectificación.

Al comparar los MDT producto del vuelo de VANT con el de IDE, se observaron muchas diferencias, en particular asociadas a errores en el pasaje de MDS a MDT, como la presencia de copas de árboles y edificaciones, en el MDT del VANT. La existencia de estos elementos, se asocia a análogas diferencias en los modelos de pendientes generados.

Continuando en esta línea de comparaciones, se elaboró una malla regular de puntos sobre la zona volada, sin incluir áreas arboladas o edificadas. Las diferencias de cota hallada en estos puntos entre el MDT de IDE y el de VANT, indican que se trata de productos muy similares, con una media centimétrica y una desviación estándar una vez y media menor que los resultados del estándar NSSDA para altimetría; por su parte los productos de VANT presentan más similitudes, dado que las diferencias entre sí arrojaron una media centimétrica, con una desviación menor al decímetro. En lo que respecta a las pendientes, en ambas comparaciones las diferencias halladas son muy cercanas a cero, siendo su distribución de naturaleza normal, lo que se asocia a incertidumbres propias del proceso de medida.

Al ser los perfiles topográficos insumos utilizados en el área de la ingeniería hidráulica, se relevó mediante GNSS perfiles en zonas donde el modelo de cuencas producido a partir del MDT de IDE, indica la existencia de una divisoria de aguas. En este proceso se destaca el rol de la adecuación en campo de los perfiles planificados en gabinete, siendo así que en el único perfil donde se siguió estrictamente lo planificado, no se logró relevar la divisoria de aguas.

Que ocurriera esto último, en parte, se debe a que el modelo de cuencas sobre el que se planificaron los perfiles surgió de un MDT con una operación de relleno (*fill*), lo que conlleva modificaciones respecto a la topografía original. Más allá del caso puntual donde no se logró relevar divisoria de aguas alguna, en el resto de los casos donde sí se relevó, fueron obtenidas diferencias en progresiva menores a los 5 pasos en todos los casos (máximo valor deseable), y en su mayoría menores al metro; y diferencias en cota que van de seis a una vez y media menores a los resultados obtenidos en el estándar NSSDA para altimetría. Estos resultados muestran al uso del MDT urbano de IDE para la extracción de perfiles topográficos, como una herramienta con mucho potencial.

Como ejemplo de aplicación, se compararon cuencas obtenidas utilizando tres MDT diferentes, mediante *ArcMap*; estos son RENARE, IDE producto nacional y urbano. De esta comparación surgen importantes diferencias entre las medidas sobre las cuencas obtenidas para el modelo disponible hasta fin de el año pasado (2019 - RENARE), en relación a los nuevos modelos de IDE. En particular, surge del ejemplo evaluado, que modelo anterior “sub-dimensiona” la cuenca, arrojando un área cercana al 20 % del área en el nuevo modelo, así como una longitud de cauce principal de casi 30 % del valor obtenido en los nuevos modelos. Estos últimos difieren entre sí, cerca del 1 % en área y 5 % en la longitud del cauce. Estos resultados dan la pauta de las mejoras que puede suponer la utilización de los nuevos recursos topográficos disponibles.

De esta forma, se lograron los objetivos específicos que se plantearon al comienzo del proyecto, llevando a la consecución del objetivo general. Como consecuencia, el presente trabajo será presentado frente a posibles actores interesados, entre ellos técnicos de la Intendencia de San José, como se planteaba

en la introducción de este texto.

A lo largo del planteo y ejecución de actividades, así como de su análisis e interpretación surgieron diferentes incógnitas y puntos en donde eran necesarios análisis y ensayos, más allá del alcance del presente trabajo. Estos puntos surgen como oportunidades, cuya investigación supondría aportes sumamente interesantes. Por ejemplo el estudio detallado del dónde, el cómo y el por qué, de las diferencias en los productos obtenidos a partir de variaciones en los parámetros del proceso del vuelo de VANT; o la profundización en cómo se comportan las presiones obtenidas mediante diferentes métodos de materialización de los puntos de apoyo.

Este proyecto no pretende poner un punto final al tema abordado, sino que simplemente pretende ser un aporte dentro de una temática que es mucho más amplia. En este sentido se invita al lector a profundizar los conocimientos existentes hasta ahora, llevándolos más allá.

El presente trabajo fue realizado bajo el subsidio de la *Beca de Egreso*, otorgada por Facultad de Ingeniería en el marco del Fondo de Fomento de las Ingenierías, financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII).

“La única cosa que es absolutamente necesario saber,
es la ubicación de la biblioteca”

ALBERT EINSTEIN (1879-1955)

Referencias

- [1] Barbato, F. (2002). Control de precisión posicional de la Cartografía Base de la Intendencia Municipal de Montevideo – Uruguay. Facultad de Ingeniería – UDELAR. *Montevideo. Uruguay.*
- [2] Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V. R., & Rico, M. (2004). La importancia del modelo digital del terreno en modelos hidráulicos de crecidas. *Riesgos Naturales Y Antrópicos En Geomorfología.(Actas De La VIII Reunión Nacional De Geomorfología, Toledo, 22-25, setiembre 2004). SEG y CSIC, Madrid, 47-57.*
- [3] Liu, X., Peterson, J., & Zhang, Z. (2005). High-resolution DEM generated from LiDAR data for water resource management. In *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM05)* (pp. 1402-1408). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc..
- [4] López Romero, J. D. (2017). *Diseño de un UAV para gestión de recursos hídricos* (Trabajo de Fin de Máster). Universidad de Sevilla, España.
- [5] Matamoros, G. (2018). El uso de las tecnologías de aeronaves no tripuladas en la prevención de desastres. *En Torno a la Prevención*, No. 20, jun. 2018, pp. 40-47. ISSN 1659-3057.

- [6] Ortiz Saenz, L. E. (2019). Modelo de elevación digital de alta resolución para identificar y evaluar zonas en riesgo de inundación: caso caña de azúcar. *UD Y La geomática*, No. 14, 2019. ISSN 2011-4990.
- [7] Rinaldi, P., Larrabide, I., & D'Amato, J. P. (2019). Drone based DSM reconstruction for flood simulations in small areas: A pilot study. In *World Conference on Information Systems and Technologies* (pp. 758-764). Springer, Cham.
- [8] Corredor Daza, J. G. (2015). Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tulua – Rio Frio. *Universidad Militar Nueva Granada*. Bogotá, Colombia.
- [9] Cuadrado, A., Martinez, J. P., Piperno, A. & Rosa, R. (s.f.). Generación de conocimientos en Gestión Integral del Riesgo, Sección I - Riesgo de inundaciones en Uruguay. *Informes de consultorías*. Sistema Nacional de Emergencia – Presidencia de la República, Uruguay.
- [10] López, F. J., & Gordo, A. D. (2008). Variability of NSSDA estimations. *Journal of Surveying Engineering*, 134(2), 39-44.
- [11] Ariza López, F. J., & Atkinson Gordo, A. D. (2006). Sample Size and Confidence when Applying the NSSDA. *Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica, Universidad de Jaén*, Jaén, España.
- [12] Atkinson-Gordo, A.D.J.; García-Balboa, J.L.; Ariza-López, F.J. (2001). Comparativa mediante procesos de simulación de los test más empleados en el control de calidad posicional cartográfico. *Actas del XIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica (INGEGRAF)*. Universidad de Extremadura, Badajoz, 6-8 de junio de 2001.

- [13] Ariza López F.J., García Balboa, J.L., Rodríguez Avi, J., Robledo J., (2018). Guía general para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales. Proyecto: Propuesta de adopción de metodologías y procedimientos empleados para la evaluación de la calidad de la información geográfica para los Estados Miembros del IPGH (Proyectos Panamericanos de Asistencia Técnica – 2018 “Agenda del IPGH 2010-2020”). Montevideo.
- [14] Presidencia de la República, OPP, MVTMA & Otros. (2007). El Libro Blanco del Área Metropolitana. *Editorial Agenda Metropolitana*. ISBN 978-9974-96-326-9.
- [15] Esri. (2019). ArcMAP. Lugar de publicación: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>.
- [16] Ariza López, F. J. & Atkinson Gordo, A. D. J. (2006). Metodologías de control posicional: visión general y análisis crítico. *Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica, Universidad de Jaén, Jaén, España*.
- [17] Berné Valero, J. L., Julián, A., Belén, A., & Garrido Villén, N. (2014). GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática. *Editorial Universitat Politècnica de València*. ISBN: 978-84-9048-261-2.
- [18] Instituto Geográfico Militar. (2019). Servicios de la REGNA-ROU. Lugar de publicación: <http://www.igm.gub.uy/2016/05/20/servicios-regna-rou/>.
- [19] DroneDeploy. (2019). *Capture. Analyze. Act*. Lugar de publicación: <https://www.dronedeploy.com/>.
- [20] Cisneros, S., García, É., Montoya, K., & Sinde, Í. (2019). Estudio de las configuraciones de puntos de control terrestres para fotogrametría con drone. *Revista Geoespacial*, 16(1), 43-57.

- [21] Rangel, J. M. G., Gonçalves, G. R., & Pérez, J. A. (2018). The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. *International journal of remote sensing*, 39(21), 7154-7171.
- [22] Martínez Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal Ramírez, F., Mesas Carrascosa, F. J., García Ferrer, A., & Pérez Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 72, 1-10.
- [23] Garcilar Lallana, M. A., & Tizze Batista, F. (2019). Uso de la tecnología UAV en el marco de un proyecto urbanístico de escala media con fines de ordenamiento territorial (Proyecto de Grado). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- [24] Atkinson Gordo, A. D. J., García Balboa, J. L., Ariza López, F. J. (2001). Los diferentes test para el control de calidad posicional en cartografía. *Actas del XIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica (INGEGRAF)*. Universidad de Extremadura, Badajoz, 6-8 de junio de 2001.
- [25] Barona, L. & Larrañaga, M. (2019). Exactitud posicional plnimétrica de un relevamiento fotogramétrico realizado con UAV y propuesta de procedimiento para la comparación temporal (Proyecto de Tecnólogo). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- [26] Alvariza, G., Rodríguez, F. & Settin, V. (2019). Comparación de resultados topográficos altimétricos en el relevamiento de una cantera, utilizando drone fotogramétrico, drone RTK/PPK y estación escáner (Proyecto de Grado). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Glosario

ArcMap: Herramienta de ArcGIS, donde el usuario visualiza y explora dataset SIG; asigna símbolos, crea diseños de mapa y donde crea y edita los dataset.

CORS: Estaciones de referencia que proporcionan una estación base que permite a los usuarios acceder a correcciones RTK de alta precisión y largo alcance.

Cota: Altitud de una entidad respecto a una superficie tomada como referencia.

Fill: Operación de *ArcMap* que rellena sumideros en un ráster de superficie para quitar pequeñas imperfecciones en los datos.

Fotogrametría: Es el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos.

GNSS: Sistema global de localización mediante satélites, que permite estimaciones suficientemente precisas de latitud, longitud y altitud de un punto.

IDE: Conjunto de tecnologías, políticas, estándares y recursos humanos para adquirir, procesar, almacenar, distribuir y mejorar la difusión de la información geográfica.

LAS: Formato de archivo público que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional.

MDT: Un Modelo Digital de Terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, en particular, la variable representada es la cota del terreno. También se le denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

MDS: Un Modelo Digital de Superficie es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, en particular, la variable representada es la cota de la superficie terrestre e incluye todos los objetos que esta contiene.

NSSDA: Estándar que implementa una metodología estadística y de prueba para estimar la precisión posicional de los puntos en los mapas y en los datos geoespaciales digitales, con respecto a las posiciones de tierra georreferenciadas de mayor precisión.

Nube de puntos: Conjunto masivo de puntos referenciados espacialmente en sus tres coordenadas.

Ortofoto: Fotografía con escala constante y propiedades de una proyección ortogonal, formada a partir de una fotografía en proyección central mediante rectificación diferencial.

Outlier: En estadística, un valor atípico (en inglés outlier) es una obser-

vacación que es numéricamente distante del resto de los datos.

Pixel: Menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital.

Pix4Dcapture: Aplicación gratuita de planificación de vuelos de VANT para mapeo y modelado 3D. Permite planificar y controlar el vuelo de VANT utilizando un smartphone.

Pix4Dmapper: Software privativo que utiliza imágenes aéreas para generar nubes de puntos, modelos de superficie, modelos de terreno, ortomosaicos o modelos con textura, entre otros.

Punto de apoyo: Punto de coordenadas XYZ, XY o Z conocidas, que se utiliza en el proceso de orientación exterior.

Punto de control: Punto con coordenadas XYZ, XY o Z conocidas, que se utiliza para hacer un control de error del modelo generado.

QGIS: aplicación profesional de SIG que esta construida sobre, y es, Software Libre y de Código Abierto (FOSS). Permite visualizar, gestionar, editar y analizar datos, y diseñar mapas imprimibles.

Ráster: Matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas, en la que cada celda contiene un valor que representa información.

RTK: Navegación cinética satelital en tiempo real.

UTM: Sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator. Se construye como la proyección de Mercator normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace secante a un meridiano.

Vuelo Fotogramétrico Nacional: Mapeamiento aerofotogramétrico de todo el territorio de Uruguay, incluyendo más de 80 centros urbanos. El Proyecto, gestionado por la IDE, fue licitado por AGESIC y Presidencia de la República, con financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo.

Watershed: Herramienta de *ArcMap*. Determina el área de contribución por sobre un conjunto de celdas de un ráster.

Acrónimos

CORS: Continuously Operating Reference Stations (Estación de referencia de operación continua).

EGM2008: Earth Gravitational Model 2008 (Modelo gravitacional de la tierra).

GCP: Ground Control Point (punto de control en el terreno).

GNSS: Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite).

IDE: Infraestructura de Datos Espaciales.

MDS: Modelo Digital de Superficie.

MDT: Modelo Digital de Terreno.

NSSDA: National Standard for Spatial Data Accuracy (Estándar Nacional para la Precisión de Datos Espaciales).

Pixel: Picture element (elemento de imagen).

RENARE: Dirección de Recursos Naturales Renovables.

REGNA-ROU: Red Geodésica Nacional Activa de la República Oriental del Uruguay.

RTK: Real Time Kinematic (cinemático en tiempo real).

SIG: Sistema de Información Geográfica.

SRC: Sistema de Referencia de Coordenadas.

UTM: Universal Transverse Mercator (universal transversal de Mercator).

VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV en sus siglas en inglés, Unmanned Aerial Vehicle).

VFN: Vuelo Fotogramétrico Nacional.

Índice de figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Distribución los puntos GNSS. Fuente [1]. | 15 |
| 2. | Ejemplo de sección transversal “representada por los diferentes modelos cartográficos, donde se observan importantes discrepancias en su representación”. Fuente [2]. | 16 |
| 3. | Límite de subcuencas derivados de Vicmap DEM y LiDAR DEM. Fuente [3]. | 17 |
| 4. | “Identificación de zona en riesgo por inundación (2,6 ha). Las zonas en azul oscuro alcanzan profundidades de 1 m, mientras que, zonas en azul claro la lámina de agua es inferior a los 5 cm”. Fuente [6]. | 20 |
| 5. | DSM generado sobre mapa base con imágenes satelitales de Google en WebODM. Fuente [7]. | 21 |
| 6. | Desde el año 2010 la Ciudad se define como el área comprendida entre el Río de la Plata, el Río Santa Lucía, el Camino ‘Punta del Tigre’ y su continuación hasta este último Río. Fuentes: [14], ISJ. | 26 |
| 7. | Ubicación de Playa Pascual en imagen satelital. <i>Google Earth</i> . Fuente: elaboración propia. | 27 |
| 8. | Delimitación de Villa Olímpica en imagen satelital. <i>Google Earth</i> . Fuente: elaboración propia. | 27 |
| 9. | Equipo GNSS <i>Leica Viva GS8</i> utilizado en los relevamientos. Fuente [25]. | 31 |
| 10. | Equipo VANT <i>Phantom 4 Pro</i> utilizado en el vuelo. Fuente: elaboración propia. | 34 |
| 11. | Molde utilizado. Fuente: elaboración propia. | 37 |
| 12. | Ubicación mediante imágenes satelitales del área de estudio. <i>Google Earth Pro</i> . Fuente: elaboración propia. | 44 |
| 13. | Caminamiento planificado en <i>ArcMap</i> . Imagen obtenida utilizando <i>QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 45 |
| 14. | Ejemplo de puntos relevados: solo (Z), sólo (X, Y) y (X, Y, Z). Fuente: elaboración propia. | 46 |
| 15. | Fotografías del trabajo de campo. Fuente: elaboración propia. | 47 |
| 16. | Distribución de los puntos relevados en campo. Software <i>QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 49 |
| 17. | Captura de pantalla de la herramienta de reprojectión en <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 50 |
| 18. | Captura de pantalla de <i>Leica Geo Office</i> . Mapa con los puntos cargados al proyecto. Fuente: elaboración propia. | 51 |
| 19. | Captura de pantalla de <i>Leica Geo Office</i> . Lista de puntos del proyecto. Fuente: elaboración propia. | 52 |
| 20. | Diagrama de Cajas para dX y dY , unidades en metros. Software estadístico <i>MiniTab</i> . Fuente: elaboración propia. | 54 |

| | | |
|-----|---|----|
| 21. | Identificación de distribución para dX , software estadístico <i>MiniTab</i> . Fuente: elaboración propia. | 55 |
| 22. | Histograma para dX y dY ; distribuciones normales. Software estadístico <i>MiniTab</i> . Fuente: elaboración propia. | 56 |
| 23. | Correlación de Spearman para dX y dY . Software <i>MiniTab</i> . Fuente: elaboración propia. | 57 |
| 24. | Vectores (dX, dY) , escala conveniente. Software <i>GNU Octave</i> . Fuente: elaboración propia. | 57 |
| 25. | Diagrama de Cajas para dZ , unidades en metros. Software estadístico <i>MiniTab</i> . Fuente: elaboración propia. | 58 |
| 26. | Evaluación de ajuste a una distribución normal para dZ , test Anderson-Darling. Software estadístico <i>MiniTab</i> . Fuente: elaboración propia. | 59 |
| 27. | Histograma para dZ , IC de media y mediana. Software estadístico <i>MiniTab</i> . Fuente: elaboración propia. | 59 |
| 28. | Error en altura en función de la tangente de la pendiente. <i>ArcMap, Excel</i> . Fuente: elaboración propia. | 61 |
| 29. | Zona elegida para volar. <i>Google Earth Pro</i> . Fuente: elaboración propia. | 62 |
| 30. | Puntos de apoyo planificados dentro de la zona a volar. <i>Google Earth Pro</i> . Fuente: elaboración propia. | 64 |
| 31. | Imágenes obtenidas en el vuelo de prueba. Fuente: elaboración propia. | 65 |
| 32. | Imágenes obtenidas en el vuelo de prueba. Fuente: elaboración propia. | 65 |
| 33. | Materialización de puntos mediante stencil. Fuente: elaboración propia. | 66 |
| 34. | Formas alternativas para la identificación de puntos de apoyo/control. Fuente: elaboración propia. | 67 |
| 35. | Relevamiento GNSS de puntos de apoyo/control. Fuente: elaboración propia. | 67 |
| 36. | Captura de pantalla, se observan los parámetros expuestos. Aplicación <i>Android, Pix4Dcapture</i> . Fuente: elaboración propia. | 68 |
| 37. | Captura de pantalla: inicio, fin y líneas del vuelo. Aplicación <i>Android, Pix4Dcapture</i> . Fuente: elaboración propia. | 69 |
| 38. | Captura de pantalla, VANT durante la misión. Aplicación <i>Android, Pix4Dcapture</i> . Fuente: elaboración propia. | 70 |
| 39. | Captura de pantalla, imagen obtenida por la cámara en el momento de consulta. Aplicación <i>Android, Pix4Dcapture</i> . Fuente: elaboración propia. | 70 |
| 40. | Previsualización de orotofó y MDS. <i>Quality Report, Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 72 |
| 41. | Productos del procesamiento con 14 GCP. <i>Pix4Dmapper, QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 73 |

| | | |
|-----|---|----|
| 42. | Previsualización de orotofó y MDS. 5 GCP. <i>Quality Report, Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 74 |
| 43. | Productos del procesamiento con 5 GCP. <i>Pix4Dmapper, QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 75 |
| 44. | Previsualización de orotofó y MDS. 5 GCP. <i>Quality Report, Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 77 |
| 45. | Productos del procesamiento con 5 GCP y la mitad de las fotografías. <i>Pix4Dmapper, QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 78 |
| 46. | Comparación entre MDS, con 14 y 5 puntos de control. <i>Pix4Dmapper, QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 79 |
| 47. | Comparación de MDS con 5 puntos de control, entre 100 % y 50 % de las fotografías. <i>Pix4Dmapper, QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 80 |
| 48. | Comparación entre MDT, con 14 y 5 puntos de control. <i>Pix4Dmapper, QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 80 |
| 49. | Comparación de MDT con 5 puntos de control, entre 100 % y 50 % de las fotografías. <i>Pix4Dmapper, QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 81 |
| 50. | Diferencias entre el MDT con 14 y 5 puntos de control; y entre 5 GCP con 100 % y 50 % de las fotografías. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 82 |
| 51. | Restas entre los MDT de IDE y los MDT con 14 y 5 puntos de control, con 100 % y 50 % de las fotografías. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 83 |
| 52. | Modelos de pendiente realizados a partir del MDT de IDE y los MDT con 14 y 5 puntos de control, con 100 % y 50 % de las fotografías. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 84 |
| 53. | Diferencias entre los modelos de pendientes realizados a partir del MDT de IDE y los MDT con 14 y 5 puntos de control, con 100 % y 50 % de las fotografías. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 85 |
| 54. | Diferencias entre el modelo de pendientes del MDT con 14 y 5 puntos de control; y entre 5 GCP con 100 % y 50 % de las fotografías. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 85 |
| 55. | Representaciones de la nube de puntos LAS, zoom en un área de ejemplo. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 86 |
| 56. | Comparación entre el nuevo MDT elaborado en <i>ArcMap</i> y el obtenido en <i>Pix4Dmapper</i> . Nube LAS, representando elevaciones. Fuente: elaboración propia. | 87 |
| 57. | Histogramas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 88 |
| 58. | Puntos de la malla sobre los que se realizan las comparaciones posteriores. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 89 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 59. | Histogramas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 90 |
| 60. | Ubicación geográfica de los outliers de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 90 |
| 61. | Histograma de las diferencias en pendiente entre los modelos basados en el MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. Divisiones reglares cada 1°. Fuente: elaboración propia. | 91 |
| 62. | Perfiles planificados en gabinete. <i>QGIS</i> . Fuente: elaboración propia. | 92 |
| 63. | Perfil 1, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. <i>ArcMap, Excel</i> . Fuente: elaboración propia. | 93 |
| 64. | Perfil 2, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 94 |
| 65. | Perfil 3, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. <i>ArcMap, Excel</i> . Fuente: elaboración propia. | 95 |
| 66. | Perfil 4, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. <i>ArcMap, Excel</i> . Fuente: elaboración propia. | 96 |
| 67. | Perfil 5, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. <i>ArcMap, Excel</i> . Fuente: elaboración propia. | 97 |
| 68. | Perfil 6, planimetría y altimetría relevada mediante GNSS. Comparación con altimetría del MDT IDE. <i>ArcMap, Excel</i> . Fuente: elaboración propia. | 98 |
| 69. | Forma del histograma de las diferencias en altura para los 69 puntos relevados (35 divisiones). <i>Excel</i> . Fuente: elaboración propia. | 99 |
| 70. | Muestra de los productos MDT utilizados: RENARE e IDE, nacional y urbano. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 103 |
| 71. | Cuencas obtenidas. MDT IDE nacional, verde; MDT IDE urbano, azul; MDT RENARE, blanco con patrón a 45°. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 104 |
| 72. | Rendimiento de CPU y memoria RAM durante el procesamiento del vuelo en <i>Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 112 |
| 73. | Algunas diferencias claras entre las copas de los árboles de los MDS basados en 14 y 5 GCP. Se muestra ortomosaico con transparencia para ampliar el panorama del lector. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 115 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 74. | Algunas diferencias entre los MDT basados en 14 y 5 GCP. Se muestra ortomosaico con transparencia para ampliar el panorama del lector. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 117 |
| 75. | Diferencias entre las copas de los árboles de los MDS basados en 5 GCP, con 100 % y 50 % de las imágenes. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 119 |
| 76. | Diferencias en edificaciones, borde de los MDS basados en 5 GCP, con 100 % y 50 % de las imágenes. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 119 |
| 77. | Diferencias en edificaciones. MDT basados en 5 GCP, con 100 % y 50 % de las imágenes. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 120 |
| 78. | Similitudes en las ortofotos basadas en 14 y 5 GCP. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 121 |
| 79. | Similitudes en los errores presentes en las ortofotos basadas en 14 y 5 GCP. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 121 |
| 80. | Errores en la rectificación de columnas presentes en la ortofoto basada en 5 GCP 50 % imágenes vs. 100 %. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 122 |
| 81. | Comparación de la rectificación de una palmera, ortofoto basada en 5 GCP 100 % imágenes vs. 50 %. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 122 |
| 82. | Ejemplo 1, cúmulo de puntos outlier. Fuente: elaboración propia. | 127 |
| 83. | Ejemplo 2, dos cúmulos de puntos outlier. Fuente: elaboración propia. | 127 |
| 84. | Ejemplo 3, puntos outliers alineados. Fuente: elaboración propia. | 128 |
| 85. | Ejemplo 4, puntos outliers aislados. Fuente: elaboración propia. | 128 |
| 86. | “Si la relación es que una variable aumenta cuando la otra aumenta, pero la cantidad no es consistente, el coeficiente de correlación de Pearson es positivo pero menor que +1. El coeficiente de Spearman sigue siendo igual a +1 en este caso”. Fuente: support.minitab.com | 159 |

Índice de tablas

| | | |
|-----|--|-----|
| 1. | Coordendas iniciales de los puntos relevados. <i>XY</i> : punto sólo <i>XY</i> . <i>XY*</i> : descartado en <i>XY</i> . <i>Z</i> : punto sólo <i>Z</i> . <i>XYZ*</i> : punto descartado en <i>XYZ</i> . (Parte 1). Fuente: elaboración propia. | 48 |
| 2. | Coordendas iniciales de los puntos relevados. <i>XY</i> : punto sólo <i>XY</i> . <i>Z</i> : punto sólo <i>Z</i> . (Parte 2). Fuente: elaboración propia. | 49 |
| 3. | Alturas ortométricas de los puntos relevados. <i>XY*</i> : descartado en <i>XY</i> . <i>Z</i> : punto sólo <i>Z</i> . Fuente: elaboración propia. | 53 |
| 4. | Matriz de covarianzas <i>dX</i> , <i>dY</i> | 56 |
| 5. | Tiempos insumidos por cada proceso, 14 GCP. <i>Quality Report</i> , <i>Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 72 |
| 6. | Tiempos insumidos por cada proceso, 5 GCP. <i>Quality Report</i> , <i>Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 76 |
| 7. | Tiempos insumidos por cada proceso, 5 GCP - mitad de las fotografías. <i>Quality Report</i> , <i>Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 77 |
| 8. | Comparación de resultados entre los procesos con distinta cantidad de GCP. <i>Quality Report</i> , <i>Pix4Dmapper</i> . Fuente: elaboración propia. | 79 |
| 9. | Estadísticas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular. Medidas en metros. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 88 |
| 10. | Estadísticas de las diferencias en altura entre los MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. Medidas en metros. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 89 |
| 11. | Estadísticas de las diferencias en pendiente entre los modelos basados en el MDT IDE, 14 GCP y 5 GCP; malla regular sin incluir árboles y construcciones. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 91 |
| 12. | Resumen de diferencias en cota y progresiva entre MDT de IDE y perfiles GNSS, para divisorias de aguas. Fuente: elaboración propia. | 101 |
| 13. | Resumen de diferencias en cota y progresiva de la divisoria de aguas, entre MDT de IDE, perfiles GNSS y MDT de VANT. Perfil 6. Fuente: elaboración propia. | 101 |
| 14. | Cuadro comparativo de medidas sobre cuencas obtenidas de los diferentes MDT: RENARE, IDE nacional y urbano. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 102 |
| 15. | Comparación entre los valores de alturas del MDS producto del proceso con 14 y 5 GCP. Medidas en metros. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 114 |
| 16. | Comparación entre los valores de alturas del MDS producto del proceso con 5 GCP y la totalidad de las imágenes vs. la mitad. Medidas en metros. <i>ArcMap</i> . Fuente: elaboración propia. | 118 |

Anexos

Formulación de herramientas estadísticas

Las siguientes formulaciones matemáticas son extraídas de diversas fuentes, las cuales se citan al final de este Anexo.

- **Media:**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- **Mediana:**

$$\bar{x} = \begin{cases} x_{(n+1)/2}, & \text{si } n \text{ es impar,} \\ \frac{1}{2}(x_{n/2} + x_{n/2+1}), & \text{si } n \text{ es par.} \end{cases}$$

- **Varianza:**

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- **Desviación estándar:**

$$S = \sqrt{S^2}$$

- **Rango:**

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

- **Prueba de Grubbs:**

La prueba de Grubbs se utiliza para detectar valores atípicos en un conjunto de datos basándose en el supuesto de normalidad. Por lo que primero debe verificarse que los datos puedan aproximarse a una distribución normal antes de aplicar la prueba.

Hipótesis:

H_0 : No hay valores atípicos en el conjunto de datos.

H_1 : Hay exactamente un valor atípico en el conjunto de datos

Una vez ordenados los datos de forma ascendente $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_n$,

$$G = \max\left\{\frac{\bar{Y} - Y_1}{S}, \frac{Y_n - \bar{Y}}{S}\right\}$$

Donde H_0 se rechaza a un nivel de significancia α si

$$G > \frac{N-1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{t_{\alpha/(2N), N-2}^2}{N-2}}$$

donde $t_{\alpha/(2N), N-2}^2$ denota el superior valor crítico de la distribución t con $N-2$ grados de libertad y un nivel de significación de $\alpha/(2N)$.

■ **Outliers - diagrama de cajas:**

Primero se ordenan los datos, luego se obtienen el primer y tercer cuartil:

Q_1 y Q_3 , así como el rango intercuartílico $RIC = Q_3 - Q_1$.

Se consideran valores atípicos a todos aquellos no comprendidos en el intervalo $(Q_1 - 1,5 \cdot RIC; Q_3 + 1,5 \cdot RIC)$.

■ **Test de Anderson-Darling:**

Se compara la función de distribución acumulada empírica de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales.

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

H_0 : Los datos siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos no siguen una distribución normal.

La fórmula para el estadístico A determina si los datos $\{Y_1 < \dots < Y_N\}$ vienen de una distribución con función acumulativa F

$$A^2 = -N - \sum_{k=1}^N \frac{2k-1}{N} [\ln F(Y_k) + \ln(1 - F(Y_{N+1}))]$$

donde,

$F(Y_i) = \Phi\left(\frac{Y_i - \bar{x}}{s}\right)$: función de distribución acumulada de la distribución normal estándar;

Y_i : datos ordenados.

Conociendo el valor de A^2 se puede calcular el valor de p. Sea:

$$A'^2 = A^2 \times \left(1 + \frac{0,75}{N} + \frac{2,25}{N^2}\right)$$

Dependiendo de A'^2 se calcula el valor de p según las siguientes ecuaciones:

Si $13 > A'^2 > 0,600$, entonces $p = e^{1,2937 - 5,709A'^2 + 0,0186(A'^2)^2}$

Si $0,600 > A'^2 > 0,340$, entonces $p = e^{0,9177 - 4,279A'^2 - 1,38(A'^2)^2}$

Si $0,340 > A'^2 > 0,200$, entonces $p = 1 - e^{-8,318 + 42,796A'^2 - 59,938(A'^2)^2}$

Si $A'^2 < 0,200$, entonces $p = 1 - e^{-13,436 + 101,14A'^2 - 223,73(A'^2)^2}$

Siendo la hipótesis nula que la población está distribuida normalmente, si el p-valor es menor a alfa (nivel de significancia) entonces la hipótesis nula es rechazada (se concluye que los datos no vienen de una distribución normal). Si el p-valor es mayor a alfa, se concluye que no se puede rechazar dicha hipótesis.

Lo mismo aplica para los siguientes test de normalidad que serán expuestos.

- **Prueba de normalidad de Ryan-Joiner:**

Se evalúa la normalidad calculando la correlación entre los datos y las puntuaciones normales de los datos. Si el coeficiente de correlación se encuentra cerca de 1, es probable que la población sea normal. Es una prueba similar a la de Shapiro-Wilk.

El coeficiente de correlación se calcula de la siguiente manera:

$$R_p = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y}) b_i}{\sqrt{S^2(n-1) \sum b_i^2}}$$

Donde:

Y_i : observaciones ordenadas;

b_i : puntuaciones normales de los datos ordenados;

S^2 : varianza.

Nuevamente, si el p-valor supera el nivel α de significancia, entonces se acepta la hipótesis nula.

- **Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov:**

H_0 : Los datos siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos no siguen una distribución normal.

El estadístico de esta prueba se define como:

$$D = \max \{D^+, D^-\}$$

Con:

$$D^+: \max_i \left\{ \frac{i}{n} - Z_i \right\}$$

$$D^-: \max_1 \left\{ Z_i - \frac{i-1}{n} \right\}$$

$$Z: F(X_i)$$

$F(x)$: función de distribución de probabilidad de la distribución normal.

X_i : estadísticos de i -ésimo orden de una muestra aleatoria, $1 \leq i \leq n$.

n : tamaño de la muestra.

■ **Coefficiente de Pearson:**

La correlación de Pearson evalúa la relación lineal entre dos variables continuas. Una relación es lineal cuando un cambio en una variable se asocia con un cambio proporcional en la otra variable.

Para las variables x e y :

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y}$$

■ **Intervalos de confianza de correlación de Pearson:**

El intervalo de confianza bilateral de $(1 - \alpha)100\%$ para ρ es (ρ_L, ρ_U) , donde el límite inferior (ρ_L) y el límite superior (ρ_U) se definen de la siguiente manera:

$$\rho_G = \frac{e^{2Z_G} - 1}{e^{2Z_G} + 1}; \rho_U = \frac{e^{2Z_U} - 1}{e^{2Z_U} + 1}$$

Donde:

$$Z_G = 0,5[\ln(1+r) - \ln(1-r)] - \frac{z_{\alpha/2}}{\sqrt{n-3}}$$

$$Z_U = 0,5[\ln(1+r) - \ln(1-r)] + \frac{z_{\alpha/2}}{\sqrt{n-3}}$$

Notación:

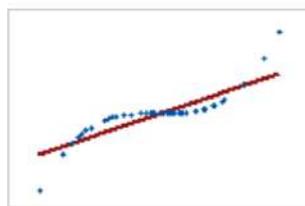
r : estimación de la correlación de la muestra de Pearson de la correlación desconocida ρ .

ρ : coeficiente de correlación.

■ Coeficiente de Spearman:

La correlación de Spearman evalúa la relación monótona entre dos variables continuas u ordinales. En una relación monótona, las variables tienden a cambiar al mismo tiempo, pero no necesariamente a un ritmo constante.

En el siguiente ejemplo (Figura 86) se nota esta diferencia entre ambos coeficientes:



Pearson = +0.851, Spearman = +1

Figura 86: “Si la relación es que una variable aumenta cuando la otra aumenta, pero la cantidad no es consistente, el coeficiente de correlación de Pearson es positivo pero menor que +1. El coeficiente de Spearman sigue siendo igual a +1 en este caso”. Fuente: support.minitab.com

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde d_i es de rango del elemento i -ésimo.

■ Intervalos de confianza de correlación de Spearman:

El intervalo de confianza bilateral de $(1 - \alpha)100\%$ para ρ es (ρ_L, ρ_U) ,

donde el límite inferior (ρ_L) y el límite superior (ρ_u) se definen de la siguiente manera:

$$\rho_G = \frac{e^{2Z_G} - 1}{e^{2Z_G} + 1}; \rho_U = \frac{e^{2Z_U} - 1}{e^{2Z_U} + 1}$$

Donde:

$$Z_G = 0,5[\ln(1 + r) - \ln(1 - r)] - z_{\alpha/2} \times ee$$

$$Z_U = 0,5[\ln(1 + r) - \ln(1 - r)] + z_{\alpha/2} \times ee$$

Bonnett y Wright (2000) sugieren utilizar el siguiente ajuste al error estándar:

$$ee = \sqrt{\frac{1 + \frac{r_s^2}{2}}{n - 3}}$$

Notación:

r : estimación de la correlación de la muestra de Spearman de la correlación desconocida ρ .

ρ : coeficiente de correlación.

Fuentes:

- Amón Uribe, I. (2010). Guía metodológica para la selección de técnicas de depuración de datos (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Sistemas, Medellín.

- Qwerty Wiki. (s.f.). Grubbs' test for outliers. Recuperado desde https://es.qwe.wiki/wiki/Grubbs%27_test_for_outliers.
- Wikipedia. (s.f.). Diagrama de caja. Recuperado desde https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_caja.
- Soporte de Minitab(R) 18. (s.f.). Prueba de normalidad. Recuperado desde <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/>.
- Wikipedia. (s.f.). Prueba de Anderson-Darling. Recuperado desde https://es.wikipedia.org/wiki/Prueba_de_Anderson-Darling.
- Soporte de Minitab(R) 19. (s.f.). Métodos y fórmulas para Prueba de normalidad. Recuperado desde <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/normality-test/methods-and-formulas/methods-and-formulas/#anderson-darling-statistic-a2>.
- Soporte de Minitab(R) 18. (s.f.). Una comparación de los métodos de correlación de Pearson y Spearman. Recuperado desde <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/correlation-and-covariance/a-comparison-of-the-pearson-and-spearman-correlation-methods/>.
- Soporte de Minitab(R) 19. (s.f.). Métodos y fórmulas para Correlación. Recuperado desde <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/methods-and-formulas/methods-and-formulas/#spearman-s-correlation-coefficient>.

Controles

NSSDA

Este método de comparación utiliza fuentes de mayor exactitud. Evalúa tanto la componente horizontal (X, Y), como la componente vertical (Z) de elementos de tipo punto. Es el propio usuario quien define los niveles de aceptación.

Procedimiento:

- Seleccionar una muestra de, al menos, 20 puntos perfectamente definidos sobre la cartografía y sobre la fuente de mayor exactitud;
- Detectar los errores previos de inconsistencia, signos, ...;
- Calcular el $RMSE_x$ para la componente X y de forma análoga para componente Y y Z , según

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{X_i}^2}$$

- Calcular el $RMSE_r$ para la componente posicional (X, Y) según

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2}$$

- Calcular el coeficiente de exactitud posicional a un 95% de confianza dependiendo de dos opciones:
 - Si $RMSE_X = RMSE_Y$, entonces $Exactitud_r = 1,7308 \cdot RMSE_r$
 - Si $RMSE_X \neq RMSE_Y$, entonces

$$Exactitud_r = 1,22385 \cdot (RMSE_X + RMSE_Y)$$

- Calcular el coeficiente de exactitud posicional a un 95 % de confianza para la componente Z :

$$\text{Exactitud} = 1,96 \cdot \text{RMSE}_Z$$

- Junto a la leyenda del mapa deberá aparecer el siguiente texto:

“Comprobado para _____ metros de exactitud horizontal al 95 % de nivel de confianza”

“Comprobado para _____ metros de exactitud vertical al 95 % de nivel de confianza.”

Fuente: [24].

Test de la Fórmula de Koppe

Este método de comparación utiliza fuentes de mayor exactitud para analizar la componente vertical (Z) de puntos. Se emplean coeficientes obtenidos empíricamente para estudiar los efectos de las pendientes del terreno sobre el error medio en la componente vertical, según las relaciones establecidas por Koppe.

Procedimiento:

- Seleccionar una muestra de puntos;
- Obtener la altitud Z de los puntos en la cartografía;
- Obtener la altitud Z de esos mismos puntos en una fuente de mayor exactitud;
- Calcular el error vertical de cada punto;

- Calcular el valor de la pendiente en cada punto;
- Calcular el análisis de regresión empleando la tangente del valor de la pendiente como variable independiente y el error vertical como variable dependiente;
- Calcular el error vertical medio según:

$$\bar{e}_v = \pm(A + B \cdot \tan \alpha)$$

Donde:

A : el término independiente de la regresión. B : el coeficiente de la regresión. α : la pendiente del terreno.

- Calcular el error horizontal medio según:

$$\bar{e}_H = \pm(B + \cot \alpha)$$

Fuente: [24].



Este proyecto de grado fue elaborado en \LaTeX .