UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

POLITÉCNICA

**Contribuciones metodológicas para la
obtención de información altimétrica
requerida en la evaluación local de
amenazas por inundaciones a partir de
nuevas tecnologías geoespaciales**

TESIS DOCTORAL

Jairo R. Escobar Villanueva.·.

Ingeniero Ambiental

Máster en Ciencia y Tecnología Ambiental

Madrid, 2020

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y
ENERGÍA

POLITÉCNICA

Contribuciones metodológicas para la obtención de información altimétrica requerida en la evaluación local de amenazas por inundaciones a partir de nuevas tecnologías geoespaciales

Autor:

Jairo R. Escobar Villanueva

Ingeniero Ambiental

Máster en Ciencia y Tecnología Ambiental

Directores:

Luis Iglesias Martínez

Doctor Ingeniero Agrónomo

Jhonny I. Pérez Montiel

Doctor Ingeniero Ambiental

Madrid, 2020

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2020.

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____ de 2020 en la *E.T.S. de Ingenieros de ...* de la *U.P.M.*

Acuerda otorgarle la calificación
de: _____

Madrid, a ____ de _____ de 2020.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

Dedicado a mis padres y hermana, por su confianza y ser mi motivación para el alcance de este gran logro de mi vida. A mi novia por su apoyo incondicional.

“De gente bien nacida es agradecer los beneficios que recibe”.

-Miguel De Cervantes-

“Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes”

-Isaac Newton-

“Un pensamiento sutil que está en error, todavía puede dar lugar a una investigación fructífera que puede establecer verdades de gran valor”

-Isaac Asimov-

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos por la culminación de esta etapa de mi vida y el advenimiento de otra, más exigente y sacrificada mi nueva carrera como científico. Quiero resaltar la gran apuesta liderada por la Universidad de La Guajira a través del Programa de formación de alto nivel para La Guajira (2014-2019).

A mis directores de tesis, el Doctor Luis Iglesias por su dedicación y confianza dada para emprender la línea de investigación de mi tesis y sus acertados aportes para encauzar y materializar los objetivos. Igualmente, al Doctor Jhonny Pérez Montiel por sus aportes e incansable esfuerzo en llevar las actividades a final termino.

Quiero hacer especial mención de agradecimiento a los Doctores Omar Tapia del Laboratorio de Geomática de la Universidad Autónoma Metropolitana (Iztapalapa) por sus aportes durante mi estancia de investigación en la Ciudad De México. También al Doctor Jean François Parrot y la Doctora Carolina Ramírez-Núñez del Instituto Geográfico de la Universidad Autónoma de México quienes fueron determinantes para el aporte final de mi tesis de grado, a ellos, infinitos agradecimientos por sus aportes y gran experiencia aportada.

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Presentación de la tesis	2
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Estructura de la tesis	8
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Cambio Climático Global, crecimiento poblacional e inundaciones	10
2.2. Estimación de la amenaza de inundación	15
2.3. Los modelos digitales de elevación MDEs.	20
2.4. Fotogrametría SfM con RPAS para la generación de MDEs	27
2.5. Los MDEs a partir de imágenes RPAS, precisión altimétrica y aplicación en la amenaza de inundación.....	40
CAPITULO 3. CASO DE ESTUDIO	45
3.1. Ubicación y morfología de la ciudad considerada como caso de estudio	46
3.2. Climatología, demografía y urbanismo	48
3.3. Problemática local ante la amenaza de inundaciones	50
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	57
4.1. Datos existentes de referencia altimétrica e hidrológicos.	59
4.2. Captura de datos: Diseño de vuelos fotogramétricos con RPAS.....	65
4.3. Programas propuestos para la preparación de datos espaciales, modelado de inundaciones y procesamiento fotogramétrico de imágenes.	74
4.4. Análisis de los modelos de referencia y procesamiento fotogramétrico SfM.	78
4.5. Método de georeferenciación propuesto: Puntos de control GCP sintéticos para el procesamiento SfM y generación de modelos RPAS.....	87
4.6. Aplicación de modelos RPAS para estimar la amenaza de inundación.	95
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	97
5.1. Procesamiento SfM de imágenes RPAS y análisis preliminar en la estimación de la amenaza.	98
5.2. Método de georeferenciación propuesto: Puntos de control GCP sintéticos para el procesamiento SfM y generación de modelos RPAS.....	117
5.3. Aplicación de modelos RPAS para estimar la amenaza de inundación.	126
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	133
6.1. Sumario y conclusiones finales	134
6.2. Contribuciones y propuesta metodológica	137
6.2. Futuras líneas de investigación.....	140
REFERENCIAS	143
ANEXOS	157
Anexo A1. Fundamentos de fotogrametría con RPAS.....	158
A1.1. Fotogrametría: Conceptos generales.....	158
A1.2. Diseño de vuelos fotogramétrico con RPAS	162
A1.3. Plataformas RPAS, cámaras y sistema autopiloto	167
A1.4. Cadena de procesamiento fotogramétrico SfM y oferta programas.	173
Anexo A2. Cálculo de parámetros de la imagen y diseño teórico de vuelos RPAS. ...	177
Anexo A3. Ortomosaicos del área inundada para el análisis preliminar.....	181

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

Lista de figuras

Figura 1. Esquema metodológico general de la tesis	6
Figura 2. Esquema conceptual del Capítulo 2 para abordar el vínculo de inundaciones e información geoespacial.....	10
Figura 3. Estimaciones de la población mundial de 1800 a 2100, basadas en proyecciones "altas", "medias" y "bajas" en 2015 y estimaciones históricas para datos anteriores a 1950.	11
Figura 4. Series temporales de exposición a inundaciones a nivel global.....	12
Figura 5. Controladores antrópicos en el riesgo por inundación.....	13
Figura 6. Riesgo de inundación como interacción de la Amenaza (probabilidad e intensidad de excedencia) y vulnerabilidad (exposición y susceptibilidad).....	16
Figura 7. Diferentes tipos de modelos hidráulicos.....	18
Figura 8. Entradas y salidas de datos en la modelación hidráulica.	19
Figura 9. Representaciones conceptuales de los MDE.....	20
Figura 10. Diferencias entre Modelo Digital de Superficie (a) y del Terreno (b).....	21
Figura 11. Plataformas comunes satelitales y tripuladas y emergentes (RPAS o “drones”) para la generación de modelos digitales	23
Figura 12. Captura de información altimétrica por LIDAR aéreo.	24
Figura 13. Concepto de fotogrametría SfM.....	28
Figura 14. Flujo de trabajo típico en fotogrametría SfM aérea con RPAS.	31
Figura 15. Principios fotogramétricos SfM en RPAS.....	32
Figura 16. Relación espacio-imagen y espacio-objeto en las ecuaciones de colinealidad.	33
Figura 17. Control fotogramétrico de un proyecto RPAS.....	37
Figura 18. Casos citados en los que se utiliza información geoespacial disponible (p. ej., LiDAR) como control fotogramétrico.....	43
Figura 19. Ubicación general del caso y area de estudio.	46
Figura 20. Climograma de precipitación media mensual (mm) y temperatura (°C).	48
Figura 21. Población cabecera urbana de la ciudad de Riohacha. Estimaciones 1985 – 2005 y proyecciones 2005 – 2020.....	49
Figura 22. Estudio de crecimiento urbano y clasificación del uso del suelo a partir de imágenes Lansat (1986 y 2016) para la ciudad de Riohacha.	50
Figura 23. Registros de precipitación media anual de la ciudad de Riohacha en milímetros (mm) de lluvia.....	51
Figura 24. Precipitación anual (mm) al año 2100 para escenarios de emisiones RCP (Representative Concentration Pathways) en la península de La Guajira (Colombia).	52
Figura 25. Intensidad de lluvia en el caso de Riohacha	54
Figura 26. Vista aérea oblicua del Delta del Rio Ranchería adquirida por un RPAS multirotor (Phantom 3 Advanced) durante el desbordamiento del Rio Ranchería.....	55
Figura 27. Esquema general del capítulo 4 (Materiales y Métodos).....	58
Figura 28. Ubicación y vistas previas de las planchas LiDAR.	60
Figura 29. Modelo derivado información topográfica (Topo) del alcantarillado local (5 m) y puntos para su corrección altimétrica (en rojo).	61
Figura 30. Mapa de inundación (profundidades en metros) de la calibración de MODCEL equivalente a una lluvia para el evento extremo de 84 años de periodo de retorno.	63
Figura 31. Celdas (subcuencas) seleccionadas de MODCEL y profundidades (h) de simuladas para el evento extremo de referencia de 84 años.....	64
Figura 32. Sistema RPAS eBee™ y sensor Canon IXUS 127 HS.....	65
Figura 33. Sistema Phantom 3 Advanced y sensor Sony Exmor de DJI™.....	67

Figura 34. Esquema de los vuelos fotogramétricos RPAs 1 y 2 y 3 para el caso de estudio.	69
Figura 35. Altura y GSD para cada escenario: (a) Vuelo 1, (b) Vuelo 2	70
Figura 36. Concepto del Vuelo 3 para el registro posterior a una inundación.	70
Figura 37. Metodología para la materialización y determinación de GCPs de Vuelos 1 y 2.....	72
Figura 38. Ubicación de los puntos de control (GCP) materializados para el vuelo 1.....	72
Figura 39. Ubicación de los puntos de control (GCP) materializados para el vuelo 2.....	73
Figura 40. Interfaces graficas de las soluciones de procesamiento SfM propuestas: (a) AgisoftPhotoScan y (b) Pix4D.....	76
Figura 41. Procedimiento propuesto para la generación del modelo de referencia LiDAR.....	79
Figura 42. Tratamiento efectuado para la corrección de altura (Z) del LiDAR ráster generado.	80
Figura 43. Métodos para la clasificación del terreno utilizados	84
Figura 44. Procedimiento para la determinación de la ubicación y profundidad de inundación para el evento de inundación fluvial el día 2018/10/13.	86
Figura 45. Metodología general de dos pasos para la determinación de puntos de control sintéticos a partir de modelos de referencia disponibles.	88
Figura 46. Modelos ráster de referencia altimétrica (mostrada en relieve sombreado) y puntos sintéticos de control distribuidos (n = 13).....	89
Figura 47. Distribución puntos de control sintéticos definitivos para el procesamiento SfM de imágenes adquiridas con RPAS.	90
Figura 48. Distribución de los puntos de verificación (CP) usados como verdad-terreno para el vuelo 1.....	91
Figura 49. Equipo utilizado para la determinación de las coordenadas de los CPs del vuelo 2.....	92
Figura 50. Distribución de los puntos de verificación (CP) usados como verdad-terreno para el vuelo 2.....	92
Figura 51. Modelos LiDAR ráster generados (iluminación de sombreado).	98
Figura 52. Detalle de los modelos LiDAR generados para el acercamiento de la Figura 51.....	99
Figura 53. Salida visual del modelo del geoide y las 17 observaciones de alturas (Z) ortométricas para la corrección final de los ráster LiDAR generados.....	99
Figura 54. Perfil de comparación valores de elevación Z observados y los extraídos del modelo ráster LiDAR sin corrección altimétrica (n = 17).....	100
Figura 55. Error ΔZ minimizar en el ráster LiDAR preliminar para la corrección final respecto a las observaciones “verdad-terreno” utilizadas (n = 17).....	101
Figura 56. Comparativa entre el modelo LiDAR sin y con corrección altimétrica respecto a los puntos asumidos como verdad-terreno (n = 17).....	101
Figura 57. Modelos raster de referencia LiDAR generados y ajustados altimétricamente.	102
Figura 58. Comparación entre verdad-terreno (n= 17) y MDT derivados de LiDAR y topografía convencional (Topo).	103
Figura 59. Modelos de elevaciones (terreno) ráster y observaciones verdad-terreno (n = 17) utilizadas para la corrección de los datos LiDAR.	104
Figura 60. Modelo ráster de diferencias entre los modelos derivados de datos LiDAR y de topografía convencional.	104
Figura 61. Salidas graficas de la estimación de volumen (V), área (A) y profundidad promedio (h) de los modelos de referencia LiDAR y topografía convencional (Topo).....	106
Figura 62. Modelos digitales de superficie (MDS) en vista de relieve sombreado (subcuenca 704) según la fuente de datos.	108
Figura 63. MDS para el modelo LiDAR y RPAS en la subcuenca 704.....	109
Figura 64. Mapas de profundidad de inundación (TR 84 años) para el MDS LiDAR de referencia y RPAS.....	110

Figura 65. Ortomosaicos de eventos de inundación registrados mediante la ejecución vuelo 3.	112
Figura 66. Las imágenes de eventos de inundación particulares adquiridas con la plataforma multirrotor.	113
Figura 67. Diagramas de caja de error ΔZ para cada modelo derivado del procesamiento SfM de imágenes del vuelo 1 utilizando los GCP sintéticos derivados del modelo LiDAR (puntos de verificación n = 104).	117
Figura 68. Histograma de los valores de error ΔZ para cada modelo generado del Vuelo 1 con puntos de control sintéticos basados en LIDAR (puntos de verificación n = 103).	119
Figura 69. Precisión (absoluta y relativa) de los modelos derivados del Vuelo 1 y referencia LiDAR (número de puntos de verificación = 104).	120
Figura 70. Efecto del origen de los puntos de control sobre la precisión de los modelos (MDT) producto de la fotogrametría SfM (Pix4D) con RPAS.	122
Figura 71. Ratios de precisión NMAD/RMSE en los modelos (MDT).	124
Figura 72. Mapas ráster de inundación correspondientes a los modelos las subcuencas en 704 y 603.	127
Figura 73. Similitud de las curvas de progresión de inundación entre modelos RPAS en comparación con el modelo de referencia LiDAR en las subcuencas 704 y 603.	128
Figura 74. Concepto propuesto para la aplicación conjunta de la tecnología RPAS y fotogrametría SfM en la estimación espacial de la amenaza de inundación a escala de detalle.	139

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación de las características de un MDE requerido para la modelación hidráulica otras aplicaciones de cartografía de amenazas.	22
Tabla 2. Principales métodos y fuentes de datos geoespaciales para la generación de MDE	23
Tabla 3. Fuentes de DEM, sus formatos, tipos de interpolación y disponibilidad	25
Tabla 5. Conceptos básicos empelados en reconstrucción SfM de imágenes.	35
Tabla 6. Comparación de variables en el Ajuste de Haces para fotogrametría: convencional y SfM con RPAS.	36
Tabla 7. Estudios y precisión absoluta y relativa (ratios) de modelos derivados de fotogrametría tradicional y RPAS.	41
Tabla 12. Resumen datos altimétricos disponibles para el caso de estudio.	62
Tabla 9. Descripción de cada subcuenca y profundidades (h) para el evento extremo de referencia de 84 años simulado con MOCEL.	64
Tabla 8. Resumen especificaciones de las plataformas RPAS y sensores utilizados para la adquisición de imágenes.	67
Tabla 9. Diseño de los Vuelos fotogramétricos 1 y 2 para la adquisición de imágenes RPAS... 68	
Tabla 10. Especificaciones Vuelo 3 para el registro de zonas inundadas.	71
Tabla 14. Programa para la gestión de datos geoespaciales y modelado de inundaciones en S.I.G.	74
Tabla 15. (Continuación Tabla 14) Programa utilizado para la preparación y gestión de datos geoespaciales y modelado de inundaciones en S.I.G.	75
Tabla 11. Parámetros (comandos) para el flujo de trabajo SfM en PhotoScan y Pix4Dmapper ^a .77	
Tabla 16. Entrada de datos para el cálculo de área y volumen inundado con r.lake.xy: Punto de llenado (X,Y) y nivel de llenado H (Z + h) para los modelos LiDAR y de topografía convencional (Topo).	82
Tabla 17. Configuración del procesamiento SfM para la generación de modelos de superficie y terreno.	83
Tabla 18. Eventos de inundación registrados mediante la ejecución del Vuelo 3.	86
Tabla 19. Entrada de datos para el cálculo de área y volumen inundado con r.lake.xy: Punto de llenado (X,Y) y nivel de llenado H (Z + h) para los modelos LiDAR y RPAS (Pix4D y PhotoScan).	95
Tabla 20. Prueba t-student para medias de muestras de elevación entre elevaciones Z observadas y LiDAR para 17 puntos de elevación.	100
Tabla 21. Area y volumen inundado para el calculó de Índice de Similitud Bray-Curtis entre estimaciones de inundacion de los modelos LiDAR y de topografia convencional (Topo).	105
Tabla 22. Estadísticos descriptivos para los MDS ráster LiDAR, RPAS y modelo de diferencia entre ambos.	110
Tabla 23. Area y volumen inundado para el cálculo de Indice de Similitud Bray-Curtis entre estimaciones de inundacion de los MDS LiDAR y RPAS para el evento extremo de 84 años. 111	

Tabla 24. Resultados de la configuración de la cadena de procesamiento SfM de imágenes RPAS del Vuelo 1 y los puntos de control sintéticos propuestos a partir del ráster LiDAR de referencia.	118
Tabla 25. Evaluación de la precisión de modelos derivados del Vuelo 1 y puntos de control LiDAR (puntos de verificación n = 104).	119
Tabla 26. Evaluación de la precisión de modelos derivados del Vuelo 2 y puntos de control (n = 13) extraídos del modelo basado en topografía convencional (Topo) (Puntos de verificación n = 69).	121
Tabla 27. Comparaciones de las estimaciones del evento de inundación considerado de 84 años entre los modelos del terreno RPAS generados (Vuelo 1) y el modelo de referencia LIDAR.	126
Tabla 28. Índice de similitud de Bray-Curtis para las estimaciones entre modelos RPAS y LiDAR	127
Tabla 29. Propuesta metodológica para la georreferenciación de un vuelo fotogramétrico RPAS con puntos de control derivados de LiDAR (GCP-LiDAR).	139
Tabla Anexo 1. Detalle de las plataformas RPAS descritas gráficamente en la Figura 6.	168
Tabla Anexo 2. Resumen de ventajas y desventajas para tipos ala fija y multirrotor. (Fuente: DroneDeploy 2017).....	169
Tabla Anexo 3. Ventajas y Desventajas de las cámaras métricas y no métricas en fotogrametría (Habib, 2013)	171
Tabla Anexo 4. Programas de fotogrametría SfM comerciales (C) o gratuitos (G) para el procesamiento de imágenes adquiridas a partir de RPAS y referencias en la literatura especializada	175
Tabla Anexo 5. Continuación Tabla 11 Códigos de fotogrametría SfM pagos (P) o gratuitos (G) para el procesamiento de imágenes adquiridas a partir de RPAS y citaciones en la literatura especializada.	176

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

Resumen

Se espera un aumento en la amenaza por inundaciones en el futuro, como fruto del aumento de las lluvias extremas y del incremento de la población expuesta, todo ello debido al Cambio Climático Global. La información geoespacial, en particular la altimétrica generalmente constituida por los Modelos Digitales de Elevaciones, son una herramienta indispensable para el análisis de amenazas por inundaciones, aunque no siempre es posible contar con dicha información a escala local de detalle. Por consiguiente, es necesario proponer metodologías de obtención de información altimétrica de utilidad en estudios locales y detallados de inundaciones. El objeto de la presente tesis es el diseño de una metodología para la obtención de productos altimétricos a partir de nuevas tecnologías emergentes de captura de la información, como son los drones o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), y de utilidad en los estudios de inundaciones. La investigación desarrollada se centra proponer un método alternativo de georreferenciación por puntos de control derivados de información altimétrica existente para la generación de modelos a partir de fotogrametría de imágenes adquiridas con RPAS. El desarrollo de esta investigación incluye la evaluación de la precisión de los modelos obtenidos mediante fotogrametría SfM (*Structure from Motion*) y el análisis del potencial de los modelos RPAS obtenidos para la modelación espacial de inundaciones urbanas. Para ello, las inundaciones estimadas con los modelos RPAS generados se compararon con estimadas a partir de un modelo digital del terreno de referencia derivado de datos LiDAR (*Airborne - Light Detection and Ranging*). El caso de estudio es una ciudad costera ubicada en el caribe colombiano altamente expuesta a amenazas de origen hidrometeorológico. El método de georreferenciación propuesto contribuye a obtener modelos con precisiones verticales comparables a las encontradas en la literatura, de aproximadamente dos veces el tamaño de píxel o GSD (*Ground Sample Distance*) de las imágenes adquiridas con RPAS. El trabajo realizado confirma viabilidad de utilizar los modelos RPAS obtenidos bajo una estrategia de procesamiento fotogramétrico semiautomática; siendo fundamental la intervención del operador en la cadena de procesamiento fotogramétrico SfM para la obtención de modelos precisos y útiles en la estimación de la amenaza. La complementariedad demostrada entre las distintas fuentes de información geoespacial utilizadas (LiDAR y la fotogrametría RPAS) ha llevado a proponer una metodología alternativa de georreferenciación de utilidad para obtener modelos, especialmente útil cuando la georreferenciación por puntos de control físicos en el terreno es desafiante.

Palabras clave: Inundaciones, MDE, LIDAR, Fotogrametría, RPAS, Georreferenciación

Abstract

Flood hazards are expected to increase in the future, as a result of extreme rainfall and populations increasingly exposed to the effects of global Climate Change (CC). Geospatial information, in particular, the altimetric generally constituted by Digital Elevation Models (DEM), is an indispensable tool for a local flood hazard analysis, although not always available at the level of detail. Therefore, it is necessary to propose methodologies to obtain useful and detailed altimetric information for local flood studies. The main aim of this thesis is designing a methodology for obtaining altimetric products from emerging geospatial technologies, such as drones or RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems), and readily applicable in flood studies. It was focused to present an alternative method for georeferencing using control points derived from existing altimetric information for DEM generation (by photogrammetry with RPAS imaging). More specifically, it aims to assess the accuracy of the DEM obtained by Structure from Motion (SfM) photogrammetry and the analysis of the potential use of generated products for spatial modeling of urban floods. For the above, the estimated floods using the RPAS models obtained were compared with those from LiDAR data used as a reference surface (Airborne - Light Detection and Ranging). A coastal city located in the Colombian Caribbean highly exposed to hydrometeorological hazards is presented as a case study. The proposed georeferencing method contributes to obtaining DEMs with vertical accuracies comparable to those found in the literature, of approximately two times the pixel size or GSD (Ground Sample Distance) of images acquired with RPAS. Our research confirms the advantage of using the RPAS models obtained under a semi-automatic photogrammetric processing strategy. The user intervention in the SfM photogrammetric processing chain is crucial to obtain accurate and useful models for flood hazard estimation. The demonstrated complementarity between the different sources of geospatial information used (LiDAR and RPAS photogrammetry) provide an alternative georeferencing methodology useful to obtain models, especially effective when georeferencing by physical ground control points is a burden.

Keywords: Floods, MDE, LIDAR, Photogrammetry, RPAS, Georeferencing

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Presentación de la tesis

La gestión de desastres naturales en regiones con escasez de datos requiere de herramientas eficientes que brinden información acertada para una adecuada planificación y minimización de amenazas de origen natural (Osti, Tanaka, & Tokioka, 2008). Por otro lado, los efectos relacionados con el Cambio Climático (CC) global y el crecimiento espacial acelerado de la población, pueden implicar un incremento en la ocurrencia de desastres como inundaciones (Kundzewicz et al., 2014). Por tanto, se hace cada vez más necesario un adecuado conocimiento del territorio para la planificación, así como para la adaptación y aumento de la capacidad local de respuesta ante amenazas hidrometeorológicas (Field, Barros, Stocker, & Dahe, 2012; Measham et al., 2011). Las Naciones Unidas promueven un cambio de paradigma de desarrollo espacial de las ciudades en un mundo cada vez más urbano, densificado y poblado. Esta iniciativa, se encuentra enmarcada dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible al 2030, concretamente del objetivo 11 “*Ciudades y Comunidades Sostenibles*” (Naciones Unidas, 2016). Ante el notable crecimiento urbano no planificado, especialmente en países en desarrollo, se hace imprescindible la identificación de áreas propensas a inundaciones dentro de las actividades de planificación y adaptación local a eventos hidrometeorológicos cada vez más extremos en un contexto de Cambio Climático global (Cai et al., 2015; Hoyos, Escobar, Restrepo, Arango, & Ortiz, 2013; Kundzewicz, 2003; Kundzewicz et al., 2014; Tsakiris, 2014).

Tecnologías geoespaciales como la Teledetección, los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G) y la navegación por satélite (GPS/GNSS, *Global Positioning/System Global Navigation Satellite System*), son herramientas valiosas para la gestión de riesgos y desastres debido a su amplia aplicabilidad (Manfré et al., 2012). Los productos geoespaciales obtenidos de estas tecnologías, por ejemplo, los modelos digitales de elevación (MDE), son representaciones topográficas ampliamente utilizadas para el modelado ambiental y espacial de inundaciones (McCabe et al., 2017). Los análisis regionales de procesos hidrológicos e hidráulicos suelen ejecutarse a partir de estos modelos digitales a pequeña escala obtenidos por medio de plataformas de satélite (Li & Wong, 2010). La confiabilidad del modelado local a gran escala (mayor detalle), a menudo depende de la precisión del modelo topográfico. Errores de elevación relativamente pequeños pueden dar lugar a errores significativos en la predicción espacial de la inundación (Sanders, 2007). Por esta razón, MDEs a pequeñas escalas derivados de

satélites presentan menos nivel de detalle y precisión vertical respecto a modelos derivados de plataformas tripuladas (Casas, Benito, Thorndycraft, & Rico, 2006; Musa, Popescu, & Mynett, 2015). Por consiguiente, los MDEs satelitales, pueden presentar un nivel de detalle no apropiado para un análisis local de inundaciones (Schumann et al. 2008; Schumann and Bates 2019). En contraste a las plataformas satelitales, los modelos generados a partir de LiDAR aerotransportado (*Light Detection and Ranging*), son la fuente de información geoespacial más utilizada en estudios inundaciones urbanas y periurbanas (Laks, Sojka, Walczak, & Wróżyński, 2017; Wedajo, 2017). La tecnología LiDAR tiene como principal ventaja la naturaleza activa del sensor láser que permite mejores clasificaciones de elementos sobre del terreno (Xiaoye Liu, 2008); pero presenta un mayor costo y complejidad de adquisición de datos, haciendo que no siempre sea rentable, fácil de adquirir o actualizar. Esto implica que en muchos casos sea una fuente de datos geoespaciales parcialmente disponible, desactualizados o incluso inexistentes (Polat & Uysal, 2018).

La irrupción de nuevas plataformas no tripuladas como los “drones” comerciales, junto con la oferta de soluciones fotogramétricas basados en técnicas de Visión Artificial de imágenes adquiridas por cámaras digitales de bajo costo (Hassanalian & Abdelkefi, 2017), han tenido un crecimiento notable en aplicaciones industriales y científicas, en particular, para la generación de productos altimétricos como son los MDE (Anderson, Westoby, & James, 2019; Nex & Remondino, 2014). La aplicación geoespacial de estos sistemas remotamente pilotados, de aquí en adelante denominadas RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*, ICAO, 2016), integran tecnologías geoespaciales de amplio uso como la teledetección, la navegación por satélite, los S.I.G. y técnicas de Visión Artificial con el fin de generar modelos tridimensionales detallados de la superficie terrestre (Nex & Remondino, 2014; Turner, Lucieer, & Watson, 2012; Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012). Los costos decrecientes de los RPAS comerciales de menos de 2 kg, junto con el creciente acceso y facilidad de los programas de procesamiento fotogramétrico, han supuesto un incentivo en la demanda de estos equipos, así como en los estudios de aplicaciones de los modelos obtenidos (Singh & Frazier, 2018). Esta flexibilidad (relativa) en adquisición, procesamiento y generación de modelos 3D, han hecho de la fotogrametría RPAS una alternativa clara de bajo costo a las tecnologías convencionales como es el LiDAR aerotransportado (Polat & Uysal, 2018; Singh & Frazier, 2018). Coveney et al. (2017) y Leitão et al. (2016) sugieren que los

modelos de elevación derivados de fotogrametría RPAS pueden satisfacer las necesidades de aplicaciones en estudios de inundaciones. Siendo uno de sus principales inconvenientes técnicos de aplicabilidad, la alta demanda de tiempo requerido para el procesamiento de imágenes y obtención de productos (Fabio Remondino, Nocerino, Toschi, & Menna, 2017).

Es bien establecido en la literatura que la precisión de los modelos de elevación producto de fotogrametría de plataformas tripuladas o de RPAS depende en gran medida de factores de diseño del vuelo y del tipo de georreferenciación del proyecto (Manfreda et al., 2019). El impacto del método de georreferenciación en la precisión de los modelos es crítico y de constante investigación en la literatura (Padró et al. 2019). Como regla general en fotogrametría RPAS, la precisión altimétrica para un modelo correctamente reconstruido debe estar aproximadamente dentro del intervalo de 1 – 3 veces el tamaño del píxel de las imágenes proyectado en el terreno o GSD (*Ground Sample Distance*) (Draeyer, B., & Strecha, 2014; Nex & Remondino, 2014). Por lo general, la georreferenciación indirecta clásica por puntos materializados en el terreno (p. ej.. GPS/GNSS con correcciones en tiempo real o Estación Total) se considera el método de control fotogramétrico más preciso (Mike R. James, Robson, & Smith, 2017; J. Padró et al., 2019). Dependiendo del área del proyecto fotogramétrico, la determinación de los puntos de control en el terreno puede convertirse en una tarea desafiante debido a su naturaleza intensiva en términos de tiempo y esfuerzo (Tonkin & Midgley, 2016), siendo la materialización de dichos puntos sobre el terreno, una limitación importante en contextos reales de operación (Singh & Frazier, 2018).

Las alternativas de georreferenciación a los métodos probados clásicos en condiciones reales de operación de un proyecto fotogramétrico RPAS, han de ser exploradas y evaluadas. Además, productos geoespaciales altimétricos derivados de dichos métodos deben ser evaluados para su uso en aplicaciones de alto nivel de detalle, tales como estudios locales de inundación. El uso de información altimétrica existente, como MDEs derivados de LiDAR aéreo, pueden ser una fuente de información para la obtención de puntos de control fotogramétrico en proyectos de imágenes adquiridas con RPAS. La literatura especializada demuestra la complementariedad entre fotogrametría de imágenes procedentes de aeronaves tripuladas y los MDE generados a partir de datos LiDAR, utilizadas como una fuente alternativa de puntos de control. Diversos autores han sugerido el uso de puntos de control (ground control points, GCP) de origen no físico o

“sintéticos” extraídos de información geoespacial ráster tipo LiDAR (James et al. 2006; Liu et al. 2007; Sherwood et al. 2018). Sin embargo, de acuerdo con la literatura revisada, son nulas las investigaciones que demuestren la contribución de puntos de control de origen sintético en la generación de MDEs a partir del procesamiento fotogramétrico con imágenes de RPAS y su aplicación en la modelación espacial de la amenaza de inundación en zonas urbanas a escala local de detalle. Esta brecha de conocimiento expuesta, ofrece una oportunidad de investigación del cual se plantean las siguientes cuestiones:

- **Cuestión (a):** Las precisiones de los modelos altimétricos generados a partir de fotogrametría de imágenes RPAS y puntos de control derivados de información altimétrica existente (p. ej., LiDAR aéreo), son comparables a las logradas por métodos tradicionales de georreferenciación.
- **Cuestión (b):** Los modelos altimétricos generados a partir de datos RPAS utilizando puntos de control derivados de información altimétrica existente, son susceptibles de ser utilizados en la estimación espacial de la amenaza de inundación a una escala local de detalle ($< 1:5000$ y áreas de $1 - 20 \text{ km}^2$).

Para dar respuesta a las cuestiones antes planteadas, la presente tesis se compone de dos partes: primero, la evaluación de la precisión de los modelos fotogramétricos de plataformas RPAS aplicando el método de control fotogramétrico propuesto y segundo, el análisis de la aplicación de los modelos generados en el modelado espacial de inundaciones. Para la comprobación de las hipótesis planteadas, es necesario la evaluación de los modelos respecto a fuentes externas altimétricas de alta precisión como sugieren Abdullah et al. (2015) y Höhle et al. (2009), así como la comparación con superficies de referencia (p. ej., LiDAR) para el análisis espacial de inundaciones (Coveney and Roberts 2017; Leitão et al. 2016). La justificación ampliada que da origen a las cuestiones planteadas se presenta en la sección 2.5. del capítulo 2.

La confirmación de las hipótesis planteadas, constituiría una contribución metodológica a la comunidad de investigadores RPAS y especialistas en inundaciones que contarían con una alternativa de georreferenciación, sobre todo cuando la determinación física de puntos de control en campo supone una tarea desafiante y/o inviable.

1.2. Objetivos

En el presente trabajo tiene como objetivo principal proponer una metodología de obtención de información altimétrica requerida en la evaluación local de la amenaza por inundación a partir de nuevas tecnologías geoespaciales.

Específicamente se propone en esta tesis con relación a las hipótesis planteadas:

- a) Evaluar la precisión de modelos digitales generados mediante fotogrametría de imágenes RPAS utilizando puntos de control derivados de información geoespacial existente.
- b) Evaluar el potencial de aplicación de los modelos obtenidos en la estimación espacial de la amenaza de inundación a una escala local de detalle.

Para llegar a la consecución de los objetivos planteados, es necesario realizar un análisis de precisión vertical mediante comparación de los valores de elevación de los modelos obtenidos de fotogrametría RPAS respecto a datos altimétricos independientes. Asimismo, la comparación con superficies de referencia, por ejemplo, con modelos obtenidos de datos LiDAR para el análisis de inundaciones de los modelos RPAS generados. La metodología consta de tres secciones como se muestra en la figura 1:

Figura 1. Esquema metodológico general de la tesis

Según el esquema presentado, se desarrollan las siguientes tres secciones: **i)** análisis de modelos de referencia y los preliminares obtenidos por tecnologías RPAS en el estudio de inundaciones, **ii)** la descripción del método propuesto de control fotogramétrico y análisis de precisión altimétrica (**Objetivo a**) y **iii)**, la aplicación de los modelos generados para el análisis espacial de la amenaza en función de la estimación de área y volumen inundado para un evento hipotético (**Objetivo b**).

Los resultados obtenidos contribuyen a la obtención de MDEs a partir de imágenes obtenidas por RPAS y su aplicación en estudios de inundación, en condiciones topográficas planas y llanuras de inundación urbanizadas. Para estudiar su aplicabilidad se ha seleccionado como caso de estudio una ciudad costera emblemática del contexto de países en desarrollo, en donde el conocimiento y gestión local ante la amenaza de inundación se hace cada vez más pertinente. Además, los resultados de la tesis propondrían orientaciones para el procesamiento fotogramétrico de imágenes RPAS con el fin de obtener modelos digitales de superficie (MDS) y de terreno (MDT).

1.3. Estructura de la tesis

Esta tesis se estructura en 6 capítulos como se describe a continuación. En el **Capítulo 1** se hace una presentación del contexto en el cual se enmarca la tesis, las hipótesis de trabajo, los objetivos y la descripción de la estructura del documento. Seguidamente, en el **Capítulo 2** se presenta el marco teórico y el estado general del conocimiento sobre la estimación de la amenaza de inundación, así como sobre información altimétrica requerida en estudios de inundaciones, las técnicas fotogramétricas modernas, y el planteamiento del método de georreferenciación propuesto. En el **Capítulo 3**, se describe el caso de estudio donde se aplicará la metodología propuesta, especificando las características más importantes de la ciudad costera de Riohacha (Caribe Colombiano). En el **Capítulo 4** referido a Materiales y Métodos, presentan el material empleado como la información altimétrica de referencia e hidrológica existente; diseño de vuelos con RPAS para la captura de imágenes, los programas utilizados para la preparación de datos y procesamiento fotogramétrico de imágenes. En este capítulo se presenta la metodología propuesta de georreferenciación y la aplicación de los modelos RPAS obtenidos en el estudio de la amenaza de inundación. En el **Capítulo 5** se describen y discuten los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta. Por último, el **Capítulo 6** se expone las conclusiones de la tesis, las contribuciones logradas y propuesta metodológica. Adicionalmente se presentan las posibles líneas de investigación para continuar avanzando en los objetivos propuestos.

Al final del documento se dan en orden alfabético las referencias utilizadas en la tesis según la norma de citación de la “*American Political Science Association APSA*”. Los anexos incluyen información relevante utilizada para la obtención y procesamiento fotogramétrico de las imágenes, así como la generada en los distintos desarrollos implementados a lo largo de la tesis.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se abordará la base teórica sobre la que se sustenta la tesis: Generalidades del Cambio Climático (CC) y los problemas de las inundaciones, el crecimiento poblacional y el incremento del riesgo, acotado a la estimación de la amenaza de inundación, aplicaciones de los MDS, MDT. Las necesidades de datos topográficos de tipo altimétrico como una de las principales fuentes de información requerida para la estimación de la amenaza, describiendo sus fuentes y características. La figura 2 describe el esquema conceptual del presente capítulo, resaltando el vínculo entre amenaza de inundación (color azul, asumida como una variable dependiente) y necesidad de datos geoespaciales altimétricos (color amarillo, variable independiente).

Figura 2. Esquema conceptual del Capítulo 2 para abordar el vínculo de inundaciones e información geoespacial.

2.1. Cambio Climático Global, crecimiento poblacional e inundaciones

Las inundaciones constituyen una de las amenazas de origen natural o antrópico de mayor impacto económico y de mayor frecuencia a escala global (Kundzewicz, 2003). Anomalías del clima global como el Fenómeno de la Niña en el Pacífico son acelerados por el CC y se refleja con inundaciones cada vez más extremas (Cai et al., 2015; Germán Vargas et al. 2018). La definición clásica de inundación es el desbordamiento de los límites normales de una corriente u otro cuerpo de agua, o la acumulación de agua sobre las zonas que normalmente no están sumergidas. Suelen considerarse procesos benéficos para ecosistemas y estabilidad morfodinámica de cuerpos de agua (Ollero Ojeda, 2014). Cuando la interacción de los sistemas hídricos se torna de forma “indeseable” o no controlada con el medio humano habitado, suelen ser catalogadas como desastres

naturales (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2008). Las inundaciones afectan a la función y operación de la infraestructura hídrica existente, así como a las prácticas de gestión integral de los recursos hídricos (Ríos, 2010). Comúnmente las inundaciones pueden ser fluviales (desbordamientos de ríos), pluviales (escorrentía urbana), costeras (elevación del nivel del mar) y lagunares, entre otras (Field et al., 2012).

El impacto en un contexto futuro del CC supone un aumento del riesgo local de las inundaciones, debido al incremento en la frecuencia y magnitud de eventos de precipitación intensas (Kundzewicz et al., 2014) y al crecimiento acelerado de la población en el mundo (Figura 3).

Figura 3. Estimaciones de la población mundial de 1800 a 2100, basadas en proyecciones "altas", "medias" y "bajas" en 2015 y estimaciones históricas para datos anteriores a 1950 (Fuente: United Nations 2015).

El CC y sus impactos asociados son una nueva realidad para la humanidad, que a largo plazo puede convertirse en una amenaza importante. El CC se refiere a los cambios a largo plazo del estado medio del clima debido a factores naturales; las rápidas variaciones del clima global observadas desde mediados del siglo pasado, pueden ser explicados en gran medida por las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antrópico según el gran consenso científico climático (OMM, 2012). En concreto, instrumentos de predicción futura basados en observaciones históricas, como los modelos de circulación climática global (AOGCM), proyectan para el año 2100 un incremento significativo en la frecuencia de lluvias intensas (Trenberth, 2011). En la figura 4 presentada por Hirabayashi et al. (2013) se puede observar las proyecciones de los

modelos AOGCM (curvas de colores) para el escenario más pesimista (RCP 8.5¹), en el que se espera un aumento significativo en el número de personas expuestas a eventos de inundación moderados (figura 4a) y extremos (figura 4b).

Figura 4. Series temporales de exposición a inundaciones a nivel global. (a) Inundaciones de 10 años y (b) inundaciones periodo de retorno de 100 años (b). La línea negra discontinua representa la simulación retrospectiva (1970 – 2010), las líneas coloreadas muestran cada modelo de circulación global AOGCM (Atmosphere-Ocean Global Circulation Models) y la línea negra gruesa (1970 – 2090) representa la media del conjunto de modelos para el escenario de concentración RCP8.5. La población se fija al nivel en el año 2005. (Fuente: Hirabayashi et al., 2013).

La figura 4 sugiere que cientos de millones de personas al año tendrán que enfrentarse a los desafíos que plantean las inundaciones producidas por el CC global (Milly, Wetherald, Dunne, & Delworth, 2002). Desde una perspectiva holística del sistema climático global, las inundaciones según Kundzewicz y Schellnhuber (2004) se

¹ Representative Concentration Pathway RCP 8.5. Corresponde a una tendencia de alto crecimiento poblacional y emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas de cambio climático (Riahi et al., 2011)

pueden explicar por la interacción de sistemas: (i) climáticos y atmosféricos (ii) terrestres (sistemas y ecosistemas hidrológicos) y (iii) socioeconómicos. Aunque aún no hay suficiente prueba científica de un vínculo directo de la actividad humana sobre las inundaciones a nivel global, si hay factores que pueden explicar un incremento en el riesgo local por inundación. Dichos factores son el incremento de la exposición de la población, aumento en la frecuencia y/o intensidad de la amenaza de la inundación y al incremento de la oferta de información (percepción) de desastres de origen natural (Kundzewicz et al. 2014). En efecto, el CC podría hacer más extremos a los desastres y eventos climáticos. Sin embargo, aunque el incremento de fenómenos climáticos (anomalía del Pacífico “El Niño-Niña”, Trenberth 1997), revisten cada vez mayor importancia, no está clara su contribución sobre las inundaciones (Kundzewicz et al. 2014), aún durante periodos normales de lluvia (Márquez, 2009). Los controladores antrópicos que explican el cambio en el riesgo de inundación se muestran en la figura 5.

Figura 5. Controladores antrópicos en el riesgo por inundación (Fuente: Kundzewicz et al. 2014)

Nótese en la figura 5, que las actividades de reducción del riesgo de inundación (cambios usos del suelo) pueden minimizar la amenaza (probabilidad de ocurrencia) y las pérdidas potenciales (vulnerabilidad de los elementos expuestos). Luego en un contexto futuro de CC, es crucial el conocimiento científico para comprender las interacciones entre clima y sociedad para la planificación y adaptación local contra inundaciones (Kundzewicz et al., 2014; Measham et al., 2011; Ríos, 2010). La representación espacial por medio de mapas de la amenaza de inundación es un primer paso necesario para la planificación del uso del suelo y desarrollo de estrategias locales de gestión del riesgo (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2009; Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, 2007b). Según la literatura revisada, es evidente un aumento general en la frecuencia de

inundaciones extremas explicada por un crecimiento urbano acelerado y no planificado de la población y el CC. Por tanto, la evaluación eficaz de la amenaza de inundación para la gestión y adaptación local al CC es cada vez más importante. De esta necesidad surge la motivación de la presente tesis, dando lugar al planteamiento del objetivo general de estudio enfocado en proponer una metodología de obtención de información altimétrica de apoyo a los estudios locales de la amenaza de inundación.

En la siguiente sección se describe la metodología y datos de entrada necesarios para la estimación de la amenaza de inundación. Se analiza el concepto de evaluación del riesgo y los factores que la componen, profundizando en el componente de amenaza como el primer eslabón en la gestión del riesgo de inundación a escala de detalle.

2.2. Estimación de la amenaza de inundación

El riesgo de inundación se define como la probabilidad de que ocurran inundaciones de una magnitud y pérdida concreta dentro de un período de tiempo determinado; los resultados del análisis de riesgo de inundación deben ser la base para identificar locaciones con riesgo significativo y decidir entre las distintas opciones de gestión y mitigación (Thieken & Merz, 2006). La gestión del riesgo de inundación ocupa una amplia gama de aspectos y actividades que van desde la predicción de la amenaza de inundación, la evaluación de las consecuencias sociales de medidas adoptadas, hasta los instrumentos requeridos para la reducción del riesgo (Messner y Meyer 2007). La definición genérica de riesgo de desastres es un concepto con enfoque multidimensional definido por dos componentes básicos: a) la amenaza y b) la vulnerabilidad y exposición. Por tanto, el riesgo de inundación es función de los siguientes componentes (Field et al., 2012):

$$\text{Riesgo} = f(\text{Amenaza} * \text{Exposición} * \text{Vulnerabilidad})$$

Así el “Riesgo” es dependiente de la “Amenaza” (p. ej., lluvia/escorrentía), y de la “Exposición” y “Vulnerabilidad” vinculadas a la configuración del territorio con los bienes materiales y humanos expuestos. La **Amenaza** se define como la probabilidad de aparición de un evento físico natural o inducido por el hombre (como inundaciones) que puede causar impactos negativos en la salud, así como daños a las propiedades e infraestructuras de la comunidad. La **Exposición** se refiere al carácter espacial y ubicación de personas o infraestructuras bajo amenaza de inundación, y su **Vulnerabilidad** es la propensión o susceptibilidad a verse afectados negativamente.

Como se muestra en la Figura 6, el riesgo es una variable dependiente de una función resultante entre amenaza y vulnerabilidad como variables independientes. Un determinado nivel de riesgo puede reducirse disminuyendo:

- La Vulnerabilidad, por ejemplo, reduciendo los bienes expuestos dentro de zonas inundables o instalando sistemas de alerta temprana.
- La Amenaza, por ejemplo, incrementando la capacidad de retención de la cuenca hidrográfica.

Figura 6. Riesgo de inundación como interacción de la Amenaza (probabilidad e intensidad de excedencia) y vulnerabilidad (exposición y susceptibilidad). (Fuente: Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht 2007)

De acuerdo con lo anterior, la amenaza constituye en sí un primer acercamiento a la estimación final del riesgo, constituyendo un componente primario dentro de toda la cadena de evaluación y gestión del riesgo de inundación. El riesgo de inundación y por ende la amenaza, se pueden estudiar a diferentes escalas, desde la escala global (Milly et al., 2002; Simpkins, 2017) a la local. La mayoría de los enfoques de cartografía de riesgo de inundación se refieren a la escala local (Apel et al., 2016; Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, 2007a). Los mapas a escala local de detalle permiten evaluar la situación de inundación para las parcelas individuales e instalaciones, tales como edificios e infraestructuras. Los estudios locales son la base de los planes en los que se definen las medidas de defensa contra inundaciones y, por lo general, tienen un gran nivel de detalle desde 1: 2.000 a 1: 20.000.

El aspecto temporal de la Amenaza está relacionado con el periodo o Tiempo de Retorno (TR), que indica la frecuencia o intervalo de recurrencia de un evento de inundación. La probabilidad de ocurrencia disminuye al aumentar el TR, pero la intensidad de la inundación aumenta. Por ejemplo, una inundación de 100 años de TR tiene una probabilidad de ocurrencia de ser superada en cualquier año del 1 % ($1/100 = 0.01$ o 1 %). Esta inundación puede corresponder a un escenario con baja probabilidad de ocurrencia, pero caracterizado por una alta intensidad, representando inundaciones caracterizadas por una alta peligrosidad. Indicadores hidráulicos de la intensidad de un evento como la profundidad y extensión alcanzada por la inundación, son comúnmente utilizados para generar mapas de amenaza a escala local en zonas urbanas (Merz, B., Thielen, A., & Gocht 2007). En aquellos estudios en los que se requiere una estimación de mayor detalle de la hidrodinámica también se considera la velocidad del flujo de inundación.

Según se observa en la Figura 6, los caudales están asociados a un TR definido (Probabilidad de ocurrencia). Estos valores de caudal por lo general son estimados mediante modelado hidrológico (precipitación-escorrentía) o por análisis estadístico de series históricas de precipitaciones. Dichos caudales o series de precipitaciones usualmente se transforman en profundidades y extensión de inundación mediante técnicas de modelación hidráulica. Por lo general, el modelado de la inundación se da mediante la variación de alguna variable hidrológica como son el caudal o profundidad respecto al tiempo. La simulación de la inundación se basa en la aplicación de ecuaciones hidrodinámicas unidimensionales (1D) utilizando, por ejemplo, las ecuaciones de Manning para el caso de geometrías lineales como son los canales o cauces de ríos (figura 7a). Los mapas de amenaza derivados de modelos 1D son idóneos para aplicaciones a mesoescala en ríos o canales ya que aportan información (calados, velocidades) de la inundación para diferentes TR, presentando la desventaja de que únicamente aportan valores de profundidad promedio en cada perfil perpendicular a la dirección del flujo (Horritt & Bates, 2002). La aplicación de ecuaciones bidimensionales (2D) son utilizadas para modelar cauce y llanura de inundación conjuntamente mediante una malla de cálculo para resolver ecuaciones de flujo en lamina libre tipo Saint-Venant (Figura 7b). También existen modelos acoplados 1D/2D utilizados en la modelación conjunta de estructuras hidráulicas lineales y llanuras de inundación en zonas urbanas o periurbanas (Gilles et al., 2012; Hong et al., 2017). Los modelos 2D restringen su uso al análisis a microescala, debido su alta necesidad de datos topográficos y de recursos computacionales, siendo más competentes para aplicaciones de detalle, donde el dominio de la llanura de inundación es prioritario de estudiar por su complejidad (Hunter et al., 2008).

Existe otro grupo de modelos emergentes en el estudio de inundaciones (Figuras 7c y 7d), los denominados modelos Empíricos y Conceptuales Simplificados (Cohen et al., 2018; Jamali et al., 2018; McGrath, Bourgon, Proulx-Bourque, Nastev, & Abo El Ezz, 2018; McGrath, Proulx-Bourque, Bourgon, Nastev, & El Ezz, 2018; Nardi, Tramutoli, Refice, Manfreda, & Samela, 2018; Nartiss, 2015; Scorzini, Radice, & Molinari, 2018; Teng et al., 2017; Teng, Vaze, Dutta, & Marvanek, 2015). Estos modelos omiten términos en la resolución de ecuaciones dinámicas, basándose en supuestos previos, validando posteriormente el modelo y sus salidas con observaciones de campo. Por lo general, estos modelos presentan un menor requerimiento de datos y recursos computacionales, permitiendo obtener estimaciones de profundidades y extensión de inundación de forma

más práctica y rápida que los modelos hidrodinámicos (Gomes Miguez et al., 2017; Krupka M, Pender, Wallis S, Pb, & Mulet-Martí J, 2007; Teng et al., 2015). Las metodologías basadas en observaciones históricas, paleontológicas o geomorfológicas son también empleadas en el análisis de amenaza (Díez-Herrero, et al. 2009). Los modelos empíricos y conceptuales actualmente reciben especial atención por su simplicidad frente a los hidrodinámicos (Manfreda et al. 2019; Scorzini et al. 2018). Por esa razón son la herramienta de modelación espacial de la inundación considerada en la presente tesis.

Figura 7. Diferentes tipos de modelos hidráulicos: Representación del modelo 1D mediante una serie de secciones transversales (a) (Fuente: Teng et al., 2017). (b) Representación de un modelo general 1D del canal del río junto con un modelo 2D de la llanura de inundación (Fuente: Gilles et al. 2012). Modelos conceptuales simplificados: (c) Modelo hidrodinámico “cuasi-2D” MODCEL (Fuente: Miguez, Mascarenhas, Canedo de Magalhães, & D’Alterio, 2009) y (d) Modelo espacial hidrológico “r.lake.xy” (Fuente: GRASS GIS, 2014).

Los productos (entrada de datos) de la modelación espacial de la amenaza, como mapas de profundidad y estimación del área inundada, se ven fuertemente afectados por la calidad de datos de entrada (línea discontinua roja, Figura 8), en particular con la información topográfica existente (Li & Wong, 2010; Merwade, Olivera, Arabi, & Edleman, 2008; G. Schumann et al., 2008; Wechsler, 2007; Yan, Di Baldassarre, Solomatine, & Schumann, 2015). Por consiguiente, en la presente tesis se enfocará en la estimación de la amenaza inundación concretamente, el área y volumen inundado, además del mapa tipo ráster de profundidades.

Otros factores, no menos importantes que contribuyen en la incertidumbre de la estimación de la amenaza de inundación, vienen dados por la calidad de datos históricos hidroclimáticos, por la idoneidad de los modelos hidrológicos empleados, así como por el modelo hidráulico adoptado y por los supuestos asumidos en la modelación (Merwade et al., 2008; Teng et al., 2017; Wechsler, 2007).

Figura 8. Entradas y salidas de datos en la modelación hidráulica.

En esta sección se describió que la estimación de la amenaza de inundación es el resultado de la modelización hidráulica espacial de un evento hidrológico de determinada intensidad a partir de información altimétrica requerida como los MDEs. Luego los MDEs producto de la propuesta metodológica, serán objeto de aplicación en la estimación local de la amenaza de inundación (Objetivo b). A continuación, se describe los métodos más comunes y recientes para la obtención de MDEs.

2.3. Los modelos digitales de elevación MDEs.

Usualmente, la fuente información altimétrica en la modelación hidráulica 1D/2D son los modelos digitales de elevación (MDE). En línea con la altimetría, un modelo es definido como la distancia vertical entre la superficie del suelo y un datum de referencia, por lo tanto, no incluye árboles, edificios, etc. (Granshaw, 2016). Su importancia radica en su utilidad como representación cuantitativa de la superficie terrestre, mejorando el entendimiento en aplicaciones hidrológicas, hidráulicas y geomorfológicas. El incremento de su oferta ha acelerado su uso en el estudio de inundaciones a diferentes escalas de detalle, desde la global a local (Musa et al., 2015; Yan et al., 2015).

Comúnmente su presentación es dada en formato matricial tipo ráster *cuasi* 3D o 2.5D (figura 9a), en el que el valor de elevación (Z) es dado para cada posición (X , Y) referidas a un datum geodésico (Moore, Grayson, & Ladson, 1991). El término MDE se introdujo en la década de 1970 con el propósito de distinguir la forma más simple de modelado en relieve de terreno tipo ráster de los tipos más complejos de representación digital de superficie terrestre basados en formatos vectoriales (3D), como son las redes irregulares de triángulos (T.I.N.) y las clásicas curvas de nivel (figura 9b y 9c respectivamente). Una de las principales ventajas de los modelos ráster es su simplicidad de formato que facilita los procesos de cálculo, junto con su practicidad de intercambio y generación. Como desventaja hay que tener en cuenta que son una representación no continua y, muchas veces, muy simplificada de la superficie terrestre (Masini, Coluzzi, & Lasaponar, 2011).

Figura 9. Representaciones conceptuales de los MDE: (a) Ráster ó malla regular, (b) Vectorial como una Red irregular de triángulos T.I.N. y curvas de nivel (c). (Fuentes: Masini et al., 2011 y Moore et al., 1991).

Los modelos digitales suelen ser clasificados en modelos de superficie (MDS) y de terreno (MDT) como se representan en la figura 10.

Figura 10. Diferencias entre Modelo Digital de Superficie (a) y Modelo Digital del Terreno (b). (Fuente: adaptado CHARIM 2017b).

Modelo digital de superficie MDS. Se refiere a la superficie superior de la topografía y las características presentes (edificios, vegetación, etc.) como se ve en una imagen aérea/satelital o pulso de primer retorno desde un escáner láser (Granshaw, 2016).

Modelo digital de terreno MDT. Estrictamente se refiere solo al terreno desnudo (topografía), después de eliminar las alturas de edificios, árboles, etc. y, por lo tanto, idéntico al MDE (Granshaw, 2016). Por consiguiente, en la presente tesis cuando se utilice el término MDE también se está refiriendo al terreno (MDT), es decir, MDE y MDT son términos equivalentes.

Existe otro tipo de representación, el modelo de superficie digital normalizado. Este es obtenido restando el MDT del MDS para obtener las alturas de edificios y vegetación utilizables en estudios urbanísticos, forestales y clasificaciones temáticas automatizadas (Sefercik, Karakis, Bayik, Alkan, & Yastikli, 2014).

Los modelos digitales pueden obtenerse a partir de información adquirida por satélites (gran cobertura, poco detalle), plataformas aerotransportadas (poca cobertura y gran detalle) o técnicas topográficas clásicas o basadas en posicionamiento GPS/GNSS. En comparación con los sistemas tradicionales de adquisición de datos topográficos y

cartográficos, incluidos los sistemas fotogramétricos, la tecnología LiDAR ofrece una alternativa rápida y precisa; aunque el costo y la complejidad de la adquisición de los datos hacen que no siempre sean fáciles de adquirir, actualizar y muchas veces la información está parcialmente disponible (Xiaoye Liu, 2008). Los modelos digitales requeridos para el modelado hidráulico a gran escala (alta resolución espacial y precisión vertical) son diferentes a los requeridos para áreas más grandes a pequeña escala (Li & Wong, 2010; Sanders, 2007; Yan, 2015). La selección de la fuente de captura de la información dependerá de la aplicación final, escala, nivel de detalle y precisión vertical de los productos altimétricos derivados requeridos. La Tabla 1 compara de las características de un MDE requerido para la modelación hidráulica comparado con las de un MDE requerido para otras aplicaciones de cartografía de amenazas naturales. Se destaca el uso de tecnologías de sensores activos como el LiDAR para el logro de altos niveles de resolución espacial y precisión vertical requeridos en la modelización de inundaciones.

Tabla 1. Comparación de las características de un MDE requerido para la modelación hidráulica otras aplicaciones de cartografía de amenazas (CHARIM, 2017a; Jetten, Alkema, Van Westen, & Brussel, 2014).

Aplicación	Escala de mapa	Resolución horizontal	Precisión vertical	Fuentes
Modelización de inundaciones	$\leq 1:5.000^*$	0.5 - 1 m	≤ 0.5 m	LiDAR MDT / MDS
	1:200.000**	30 m	1 m	SRTM, ASTER
	1:50.000**	10-15 m	1 m	WorldDEM, Terra SAR-x, SPOT 5
Mapas topográficos	1:10.000*	≤ 5 m	1 m	Fotos aéreas, LiDAR
	$\leq 1:5.000$	1 m	1 - 0.5 m	WorldView2 / GeoEye2
Mapas de deslizamientos	$\leq 1:2.000$	0.5 m	≤ 0.5 m	Fotos aéreas, LiDAR
Mapas costeros	$\leq 1:2.000$	0.5 m	≤ 0.5 m	LiDAR MDT
Mapas de elementos en riesgo	$\leq 1:2.000$	0.5 m	≤ 0.5 m	LiDAR MDS

*Gran escala (mapas topográficos locales): depende del contexto, ejemplo 1:25 000 o más grande. ** Pequeña escala (mapas regionales, nacionales o globales), menor que 1: 250 000 para cartografiado a pequeña escala (Granshaw, 2016).

Actualmente se puede elegir de una amplia gama de fuentes de datos geoespaciales altimétricos para la generación de modelos digitales, estas se pueden obtener a partir de diversas fuentes en función del método de adquisición como se describe en la Tabla 2.

La selección del método de adquisición depende de la cobertura, resolución/precisión, plataforma, costos, disponibilidad y aplicación final (Herold, 2012; Malinowski, Groom, Heckrath, & Schwanghart, 2017; Manfré et al., 2012; McCabe et al., 2017; Toth & Józków, 2016).

Tabla 2. Principales métodos y fuentes de datos geospaciales para la generación de MDE

Método de adquisición	Escala/resolución espacial y vertical	Fuente	Literatura
Directo sobre el terreno	Local/Alta	Topografía tradicional: Nivelaciones geométricas, taquimétricos	Lee, Park, y Choi 2013; Nelson, Reuter, and Gessler 2009
	Local/Alta	Mediciones con posicionamiento GPS y correcciones en tiempo real (RTK, <i>Real Kinematic Time</i>)	Algarni y El hassan 2001;
	Local/Media	Generación de Curvas de nivel a partir de mediciones topográficas o a partir de interpolaciones de mapas topográficos existentes.	Oky Dicky Ardiansyah y Yokoyama 2002; Taud, Parrot, y Alvarez 1999
Directos mediante Teledetección activa	Global/baja	Detección remota por satélite tipo radar <i>inSAR</i>	Becek, Koppe, and Kutoğlu 2016; Toschi and Remondino 2018; Toth and Józków 2016;
	Local/alta	Detección por luz y distancia tipo LiDAR aerotransportado	DeWitt et al. 2017; Hodgson and Bresnahan 2004; Xiaoye Liu 2008
Indirectos Mediante Métodos pasivos u ópticos	Local/alta	Restitución por fotogrametría digital aerotransportada	Chandler 1999; Lane, James, y Crowell 2000
	Global/baja	Restitución por fotogrametría de imágenes estereoscópicas por satélite.	Becek, Koppe, y Kutoğlu 2016; Musa, Popescu, y Mynett 2015; Nasir et al. 2015; AIRBUS 2016

En la en la figura 11 se muestran las plataformas comunes utilizadas para la generación de información altimétrica aplicada en inundaciones. Los RPAS son un tipo de plataformas emergente cuya aplicación recibe especial atención en la última década por investigadores en geociencias y modeladores de inundaciones (Coveney et al. 2017; Singh et al. 2018).

Figura 11. Plataformas comunes satelitales y tripuladas y emergentes (RPAS o “drones”) para la generación de modelos digitales.

El modelado del terreno altamente detallado generalmente se produce a partir de datos obtenidos por sensores activos en plataformas aerotransportadas, como el LiDAR como se muestra en la figura 12 (Chen, Gao, & Devereux, 2017; NOAA, 2012). Esta tecnología geoespacial determina la distancia entre los objetos terrestres y el sensor midiendo el tiempo que tarda un pulso de energía transmitida en regresar al sensor; cuando se combinan con un sistema de referencia de tierra, los sensores LiDAR realizan mediciones de elevación de puntos densos y georreferenciados (Liu et al. 2007).

Figura 12. Captura de información altimétrica por LIDAR aéreo (Fuente: adaptado de Shan et al., 2018)

La precisión del modelado y delimitación final del área inundada están vinculadas con la resolución y la precisión de topografía usada en la modelación hidráulica y de la fuente de información a partir de los cuales se genera (Bakula, Stępnik, & Kurczyński, 2016). En consecuencia, la validación de los mapas de inundaciones suele ser difícil de determinar, ya que su incertidumbre depende de la calidad de los datos altimétricos originales, de los procedimientos de generación y del tipo de modelo hidráulico adoptado (Teng et al., 2017; Wechsler, 2007).

Para la obtención de los modelos digitales suelen utilizarse técnicas de interpolación de datos brutos o clasificados (p. ej., nube densa de puntos) usando técnicas determinísticas como interpolación por distancia inversa ponderada, interpolación bilineal o probabilísticas Krigado geoestadístico (Aguilar, Agüera, Aguilar, & Carvajal, 2005; Stereńczak, Ciesielski, Balazy, & Zawila-Niedźwiecki, 2016). De la selección del

método a utilizar, dependerá la calidad altimétrica final del modelo generado (Algarni & El hassan, 2001; Heritage, Milan, Large, & Fuller, 2009).

Cada fuente geoespacial y método de interpolación a utilizar para la generación de modelos tiene sus ventajas y desafíos. La Tabla 3 resume algunos de los formatos de datos comunes y los interpoladores, así como las limitaciones y ventajas.

Tabla 3. Fuentes de DEM, sus formatos, tipos de interpolación y disponibilidad (CHARIM, 2017b; Jetten et al., 2014).

Fuente de datos geoespacial	Formato de datos	Tipo de interpolación	Limitaciones	Disponibilidad
Datos existentes de mapas topográficos	Curvas de nivel	Kriging	Considerado como fuente secundaria, a menudo sin información sobre la precisión. Generalmente produce DEM de resolución media (~ 30 m). Errores añadidos con la digitalización. No apto para grandes superficies.	Fácilmente disponible y se puede hacer de forma relativamente barata
Levantamientos en terreno	Puntos de elevación	Usualmente interpolada mediante TIN	Problemas con interpolaciones T.I.N. Problemas con la vegetación y frecuencia de medición.	Para áreas pequeñas, no para el orden nacional o regional.
Levantamientos fotogramétricos aerotransportados - interpretación manual.	Curvas de nivel y, puntos medidos	Kriging	Problemas con puntos del terreno. El espacio entre puntos suele ser de resolución media (10 - 30 m). Problemas con la vegetación.	Requiere de tomas aéreas y de operadores calificados
Levantamientos fotogramétricos aerotransportados - interpretación automática.	Puntos correlacionados	Kriging	Problemas con puntos del terreno. El espacio entre puntos suele ser de resolución media (10 - 30 m). Problemas con la vegetación.	Requiere de tomas aéreas MDE generado.
Escáner láser aerotransportado (LiDAR)	Nubes de puntos segmentadas para separar el suelo desnudo y vegetación.	Distancia inversa ponderada IDW (<i>Inverse distance weighted</i>) o Kriging utilizados para la interpolación de la nube de puntos clasificada	Los problemas pueden ocurrir con pendientes pronunciadas y áreas densamente vegetadas	Para islas pequeñas, el costo de adquisición se aproxima al de fotogrametría. Las imágenes aéreas se pueden hacer simultáneamente por una pequeña diferencia de costo. Se pueden solicitar el MDE, o el MDS y el MDT de alta resolución como productos.
Imágenes de satélite en modo estéreo	Puntos correlacionados	Se requiere el filtrado de los puntos, ya que la correlación es de puntos de superficie	Problema con los puntos del terreno. Generalmente producen MDE de resolución media (30-50m). Problema con la presencia de nubes.	El costo es más bajo que la fotogrametría. Alta resolución posible, pero más baja que LiDAR. El MDE de 30 m SRTM es gratuito
Imágenes de satélite basadas en radar	MDE tipo ráster	Ninguno	Problemas con la vegetación y pendientes pronunciadas.	

Los factores que afectan a la calidad de los modelos digitales dependen de la metodología de interpolación y de edición de las nubes densas de puntos por parte del modelador o usuario (CHARIM, 2017b; Šiljeg, Barada, Marić, & Roland, 2019).

Consecuentemente, es necesario validar externamente la precisión vertical del modelo que se utilice para la modelación hidrológica, mediante una evaluación con datos independientes “verdad-terreno” a partir de métricas estadísticas de incertidumbre (Abdullah et al., 2015; Höhle & Höhle, 2009).

Finalmente, existe un desarrollo significativo tanto de plataformas como de sensores, lo que implica que el rendimiento en la generación de modelos es cada vez mayor, incluyendo el procesamiento, almacenamiento y distribución (Toth & Józków, 2016). La introducción de nuevas plataformas, en particular, los sistemas no tripulados como los RPAS, han experimentado un crecimiento sin precedentes recientemente (Colomina & Molina, 2014), ello implica una importante oportunidad para obtener MDEs precisos y asequibles. Concretamente estas plataformas son el foco de atención para fines civiles e investigación de nuevas aplicaciones en geociencias, gracias al desarrollo de técnicas fotogramétricas modernas de procesamiento de imágenes digitales de cámaras no métricas o de bajo costo (Brunier, Fleury, Anthony, Gardel, & Dussouillez, 2016; Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, 2016). En la presente tesis uno de los medios necesarios para la captura de imágenes son las plataformas emergentes tipo RPAS.

2.4. Fotogrametría SfM con RPAS para la generación de MDEs

En esta sección se presenta los fundamentos fotogramétricos para la generación de MDEs por medio de imágenes adquiridas RPAS. La técnica fotogramétrica tiene como objeto la reconstrucción tridimensional precisa a partir del procesamiento de imágenes. La fotogrametría aerotransportada clásica, emplea cámaras métricas cuya geometría interna es conocida en todo el proceso de reconstrucción (p. ej. distancia focal). Mientras que la fotogrametría con RPAS que emplean cámaras de bajo costo (menos estables que las métricas), su geometría interna es determinada durante el procesamiento de imágenes. La anterior característica en cuanto al tipo de cámara, constituye una de las principales diferencias entre fotogrametría clásica y la basada en RPAS. En el anexo A1.1 se amplían los conceptos generares de fotogrametría y sus desarrollos hasta la actualidad.

La fotogrametría aerotransportada y las ciencias de la tierra se han vinculado estrechamente desde fines del siglo XIX debido a la adquisición de datos tridimensionales de alta calidad de la superficie terrestre. Generalmente, la generación de topografía de alta resolución es relacionada con altos costos de capital y logística, haciendo que la adquisición de datos sea restringida a una gama limitada de especialistas debido al considerable costo de sistemas métricos (cámaras y estaciones de procesamiento) para la adquisición y tratamiento de imágenes aéreas.

La irrupción de las técnicas basadas en Visión Artificial y fotogrametría SfM (*Structure from Motion*), representan uno de los mayores avances en aplicaciones de geociencias, siendo una alternativa de bajo costo y amigable para el usuario, permitiendo la obtención de productos geoespaciales detallados (Anderson et al., 2019; Nex & Remondino, 2014; Westoby et al., 2012). La Visión Artificial son desarrollos en algoritmos para imitar la visión humana con enfoque en la automatización y reconstrucción de escenas en 3D a partir de métodos de procesamiento e interpretación de imágenes (Barazzetti, Brumana, Oreni, Previtali, & Roncoroni, 2014; Eltnner et al., 2016). Salvo por el requerimiento de experiencia técnica o equipamiento topográfico costoso, la técnica SfM ha masificado la aplicabilidad de la fotogrametría (Manfreda et al., 2018; Toth & Józków, 2016).

La etimología del término SfM según Ullman (1979) viene dada por la determinación de una estructura (*struture*) de coordenadas o puntos 3D derivada del movimiento (*motion*) de un sensor RGB alrededor de un objeto. Este proceso se desarrolla típicamente en tres etapas tal como se muestra en la figura 13 (Sweeney 2016): i)

Detección de puntos característicos comunes entre imágenes. **ii)** Unión de dichas características para obtener correspondencias entre imágenes. **iii)** Estimación de la posición y geometría de las cámaras a partir de la coincidencia de dos puntos de vista.

Figura 13. Concepto de fotogrametría SfM (Fuente: Sweeney 2016)

La fotogrametría tradicional digital es la tecnología más próxima a la técnica SfM y que más ha contribuido al desarrollo de su flujo de trabajo (Fonstad, Dietrich, Courville, Jensen, & Carbonneau, 2013). Tradicionalmente los métodos fotogramétricos convencionales requieren conocer la localización tridimensional y la posición de las cámaras, así como la localización de los GCP para facilitar la triangulación de la escena/objeto y su reconstrucción. En contraste al enfoque tradicional fotogramétrico, según Westoby et al. (2012) y Fonstad et al. (2013) la técnica SfM resuelve la posición de las cámaras (orientación interna) y la geometría de la escena simultánea y automáticamente, usando un ajuste de haces de proyección redundante, basado en la identificación automática de puntos homólogos entre imágenes superpuestas (orientación relativa) sin la necesidad imperante de establecer GCP en el terreno. Con el fin de georreferenciar el modelo 3D (orientación absoluta), es necesario vincularlo a una red de GCP (georreferenciación indirecta) o a partir del registro de las posiciones de las imágenes en el momento de la adquisición por medio del geoetiquetado facilitado por el sistema GPS/GNSS e IMU (georreferenciación directa).

El rápido desarrollo de la técnica SfM durante la última década se debe a cuatro factores clave (Gonzalez-Aguilera & Rodriguez-Gonzalvez, 2017): i) la irrupción de **plataformas** RPAS, ii) el desarrollo de **sensores** (cámaras no métricas) de bajo costo, iii) el desarrollo de algoritmos de **procesamiento** SfM y iv) la demanda de **aplicaciones** específicas de los productos fotogramétricos generados. El empleo de RPAS livianos de bajo costo para la toma de imágenes a alturas mucho más bajas que las tripuladas, ha

impulsado la masificación de la técnica SfM, convirtiéndose en una herramienta válida en estudios científicos y objeto de investigación en ciencias de la tierra e ingeniería (Colomina & Molina, 2014; Nex & Remondino, 2014; M. W. Smith, Carrivick, & Quincey, 2015). Tabla 4 presenta una comparación entre el diseño y planeación según el tipo de fotogrametría.

Tabla 4. Características de diseño entre tipos de fotogrametría. (Fuente: Eisenbeiß., 2009).

Característica	Tipo de fotogrametría		
	Aerotransportada	Objeto cercano	RPAS
Planeación de vuelo	(SEMI-) automático	Manual	Automático-manual
Adquisición de datos/tipo vuelo	Asistido/ Manual	Autónomo/asistido/manual	Autónomo/asistido/manual
Tamaño del área	km ²	mm ² - m ²	m ² - km ²
Resolución imagen/ (GSD)	cm - m	mm - dm	mm - m
Distancia al objeto	100 m – 10 km	cm – 300 m	m - km
Orientación	normal, (oblicua)	normal, (oblicua)	normal, oblicua
Precisión de la orientación (externa) inicial.	cm - dm	mm - m	cm -10 m
Tamaño del bloque de imagen/ Numero de tomas	10-1000	1-500 small	1-1000
Aplicaciones y características	Grandes áreas (Cartografía, forestal, glaciología, modelos 3D de ciudades) Vista aérea	Pequeñas aras y objetos (documentación arqueología, modelización 3D de construcciones) Vista desde tierra	áreas de pequeña y gran escala, también áreas inaccesibles y objetos peligrosos Vista aérea

De la Tabla 4 se puede deducir que la fotogrametría RPAS no reemplaza la fotogrametría clásica, sin embargo, se puede considerar como una herramienta complementaria en el cual la automatización en el flujo de trabajo es más protagónica (Fawcett, 2019; Westoby et al., 2012). Aunque la fotogrametría con RPAS es accesible (relativamente) y económicamente competitiva respecto a plataformas tripuladas para pequeñas áreas (Jeunnette & Hart, 2016), esta implica mucho más recursos y tiempo de procesamiento de los datos respecto a tecnologías como el LiDAR aerotransportado (Nex & Remondino, 2014).

La oferta de nuevos sensores pasivos en el mercado, por ejemplo, cámaras compactas de bajo costo de la banda visible del espectro (RGB), permiten la adquisición de imágenes de alta resolución de elevado valor para la reconstrucción tridimensional de la superficie terrestre (Eltner et al., 2016). Estudios comparativos entre cámaras simples de bajo costo (teléfonos inteligentes o cámaras compactas) y profesionales digitales, no muestran diferencias significativas en la calidad altimétrica de los productos geoespaciales obtenidos a partir de ellas (Michelettietal. 2014; Thoenietal. 2014).

La fotogrametría moderna y la teledetección han identificado el potencial de las imágenes adquiridas a partir de RPAS desde hace aproximadamente más de treinta años para aplicaciones ambientales e hidrológicas (Eisenbeiß, 2009; McCabe et al., 2017; Toth & Józków, 2016). En las última década, ambas disciplinas complementarias han desarrollado un marco tecnológico y metodológico que desafía el marco regulatorio aeronáutico actual y los métodos tradicionales de adquisición y procesamiento (Colomina & Molina, 2014; Claudia Stöcker, Bennett, Nex, Gerke, & Zevenbergen, 2017). Los avances debidos a la creciente capacidad computacional, han permitido nuevos logros en el campo del procesamiento fotogramétrico de imágenes mediante algoritmos de Visión Artificial, técnica que ha permitido el desarrollo final del método SfM con RPAS (Fawcett, 2019; Westoby et al., 2012). Sin estos avances sería impensable gestionar la enorme cantidad de información obtenida (Gonzalez-Aguilera & Rodriguez-Gonzalvez, 2017), así como para la aplicación de los distintos productos fotogramétricos generados en las múltiples aplicaciones que los demandan, como estudios ambientales o la gestión de desastres naturales (Eltner et al., 2016; Giordan, Hayakawa, Nex, Remondino, & Tarolli, 2018; Manfreda et al., 2018). El empleo de fotogrametría RPAS genera productos geospaciales altimétricos como modelos digitales tridimensionales, modelos texturizados en 3D, modelos 2.5D o ráster y curvas de nivel, considerándose como una alternativa de bajo costo frente a la fotogrametría clásica (Nex & Remondino, 2014).

La reconstrucción de la superficie basada en imágenes aéreas obtenidas para una plataforma RPAS requiere del desarrollo de un conjunto de actividades concatenadas denominadas flujo de trabajo. La Figura 14 describe el flujo de trabajo típico por una plataforma RPAS. Este flujo de trabajo se divide en las siguientes fases: (i) diseño del vuelo, (ii) ejecución y adquisición de imágenes y (iii) procesamiento fotogramétrico.

Figura 14. Flujo de trabajo típico en fotogrametría SfM aérea con RPAS.

Este flujo de trabajo se inicia con el diseño del proceso de adquisición de la información requerida, esto es, las especificaciones del vuelo para la operación y captura de imágenes. En esta etapa se establecen y determinan la ubicación de puntos de control en el terreno o *Ground Control Point* (GCP) para la georreferenciación indirecta de los productos geoespaciales finales. Durante la ejecución del vuelo, las imágenes son adquiridas y georreferenciadas directamente (geoetiquetado) mediante los sistemas de navegación de del RPAS mediante sistema autopiloto. Tras la adquisición de imágenes y geoetiquetado, estas son usadas como entrada de datos en la cadena de procesamiento proceso fotogramétrico SfM. El objetivo de esta cadena de procesamiento es generar con salidas de información geoespacial por medio de modelos 3D, modelos ráster 2.5D u ortomosaicos.

En el anexo A1.2 se describe detalladamente el diseño de un vuelo fotogramétrico con RPAS considerando aspectos claves como altura de vuelo, tamaño de pixel en el terreno o GSD y % de solapamientos entre imágenes. Se presentan en el anexo A1.3 los tipos de plataformas de mayor uso para la ejecución de vuelos fotogramétricos RPAS y

adquisición de imágenes (< 2 kg). El anexo A1.4 detalla la descripción de los pasos que componen la cadena de procesamiento SfM para la generación de modelos de superficie y terreno (MDS y MDT). Además, se describe la oferta de programas de procesamiento fotogramétrico SfM de carácter comercial y libre aplicables a imágenes adquiridas por plataformas RPAS.

A continuación, se detallan los fundamentos fotogramétricos del procesamiento SfM con RPAS como el modelo matemático y método de triangulación utilizado (procesamiento inicial, línea discontinua de la figura 14).

Principio fotogramétrico, las ecuaciones de colinealidad: En el procesado fotogramétrico existe una relación de interdependencia entre los puntos de la superficie estudiada y los puntos en la imagen a lo largo de rayos o de los haces de proyección.

Figura 15. Principios fotogramétricos SfM en RPAS: (a) Condición de colinealidad, f es la distancia focal de la cámara (Fuente: Adaptado de Quirós 2014); (b) Concepto de ajuste de haces en bloque (Fuente: Bundle Block Adjustment, Adaptado de Habib 2013).

La condición de “colinealidad” (figura 15a) obliga a que se encuentren en la misma recta (línea discontinua), el centro de proyección O, el punto imagen (a' , a) y el punto del objeto A proyectado en el terreno (Quirós, 2014). Esto indica que el punto de imagen (en la placa del sensor de la cámara), el punto observado (en el objeto) y el centro de proyección de la cámara se ha alineado o son “colineales” cuando es tomada la imagen. Es decir, la condición de colinealidad trasforma las coordenadas en el plano del sensor ‘espacio de la imagen’ (en dos dimensiones) a las coordenadas del objeto ‘espacio del objeto’ (en tres dimensiones). Así, las Ecuaciones de Colinealidad son el modelo

matemático que resuelve directamente el vínculo imagen-objeto relacionando sus coordenadas (Schenk, 2005).

Por medio del método de triangulación de Ajuste de Haces se obtiene la relación directa entre las coordenadas del punto proyectado en la imagen y sus coordenadas en el terreno. Midiendo las coordenadas de la fotografía en el bloque de imágenes y usando las ecuaciones de colinealidad, se relacionan: las coordenadas de la imagen, las correspondientes coordenadas en el terreno, los parámetros de orientación interna de la cámara y los parámetros de orientación externa por puntos de control en el terreno GCP o georreferenciación indirecta como se ilustra en la figura 15b (Habib, 2013).

Las ecuaciones de colinealidad se formulan utilizando suficientes GCP y puntos de enlace (homólogos entre imágenes). Por medio del método de ajuste de mínimos cuadrados es posible resolver la triangulación (Westoby et al., 2012). La formulación matemática de las ecuaciones es como sigue a continuación:

$$x = x_p - f \frac{r_{1,1}(X-X_0)+r_{2,1}(Y-Y_0)+r_{3,1}(Z-Z_0)}{r_{1,3}(X-X_0)+r_{2,3}(Y-Y_0)+r_{3,3}(Z-Z_0)} + dist_x \quad \text{Ec. 1}$$

$$y = y_p - f \frac{r_{1,2}(X-X_0)+r_{2,2}(Y-Y_0)+r_{3,2}(Z-Z_0)}{r_{1,3}(X-X_0)+r_{2,3}(Y-Y_0)+r_{3,3}(Z-Z_0)} + dist_y \quad \text{Ec. 2}$$

Los parámetros involucrados en las ecuaciones 1 y 2 se muestran en la figura 16:

Figura 16. Relación espacio-imagen y espacio-objeto en las ecuaciones de colinealidad (Fuente: Habib 2013).

- Sistema de coordenadas del objeto en la imagen (x, y)
- Sistema de coordenadas del objeto en el terreno: (X, Y, Z) .
- Parámetros de orientación interna: posición del punto principal en sistema de coordenadas de la imagen (x_p, y_p) y distancia focal de la cámara (f)
- Parámetros de distorsión de las lentes: $(dist_x, dist_y)$ distorsión radial y tangencial (coeficientes $R_1, R_2, R_3, R_4, T_1, T_2, T_3, T_4$).
- Parámetros de orientación externa de las cámaras: posición de la cámara o coordenadas del centro de perspectiva respecto al sistema de coordenadas del objeto en el terreno (X_0, Y_0, Z_0) y la matriz de rotación de la transformación desde el sistema de referencia del objeto en el terreno al sistema de referencia de la cámara (r_{ij}) la cual función de los ángulos Euler de orientación ω, φ, κ (matriz de inclinación de la imagen: cabeceo, alabeo y guiñada).

Las mediciones en las coordenadas de los puntos en la imagen y los parámetros de orientación interna de la cámara definen el haz de los rayos, mientras que los parámetros de orientación externa definen la posición y la aptitud de los haces en el espacio. Durante el ajuste, los haces son rotados $(\omega, \varphi, \kappa)$ y movidos hasta: 1) conjugar el intercepto de los haces de luz tanto como sea posible en las posiciones de los puntos de enlace del objeto y 2), los rayos de luz correspondientes a los GCP pasan a través de los puntos del objeto tan cerca como sea posible. Como resultado se obtienen: las coordenadas al terreno de los puntos de enlace y los parámetros de orientación externa e interna de las cámaras. De esta forma, los GCP son utilizados para escalar y orientar finalmente el modelo reconstruido tridimensionalmente a un sistema de coordenadas "real".

Ajuste de haces en bloque en fotogrametría SfM.

La aplicación más obvia de las ecuaciones de colinealidad es el procesamiento fotogramétrico SfM, constituyendo la base de algoritmos del método de triangulación por Ajuste de Haces en Bloque en fotogrametría con RPAS (Triggs, McLauchlan, Hartley, & Fitzgibbon, 2000; Westoby et al., 2012). El método incorpora simultáneamente las imágenes en el bloque fotogramétrico, georreferenciación indirecta con GCP y georreferenciación directa a partir del geoetiquetado de las imágenes mediante el sistema de navegación GPS/GNSS de la plataforma RPAS. Una terminología útil en procesamiento y fotogrametría SfM se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Conceptos básicos empleados en reconstrucción SfM de imágenes (Fuente: Eltner et al. 2016).

Concepto	Definición
<i>Reconstrucción 3D basada en imágenes</i>	Registro de la forma tridimensional de un objeto a partir de imágenes superpuestas desde diferentes perspectivas
<i>Visión Artificial</i>	Desarrollos algorítmicos para imitar la visión humana con énfasis en la automatización, entre otras cosas, para reconstruir escenas en 3D con métodos de procesamiento de imágenes e interpretación de imágenes
<i>Fotogrametría</i>	Desarrollos algorítmicos para determinar las coordenadas del modelo 3-D y la geometría de la cámara centrándose en la precisión y la medición precisa en imágenes
<i>Structure from motion (SfM)</i>	Reconstrucción completamente automática de escenas 3-D a partir de imágenes 2-D y cálculo simultáneo de la geometría de la cámara correspondiente a un sistema de coordenadas arbitrario
<i>Fotogrametría SfM</i>	Método fotogramétrico de reconstrucción completamente automática de escenas en 3-D a partir de imágenes en 2-D y geometría de la cámara con opción para establecer parámetros para la optimización (fotogrametría) de la precisión en las medidas.
<i>Emparejamiento estereoscópico</i>	Reconstrucción del punto del objeto mediante el emparejamiento (en el espacio de la imagen; Remondino et al. 2014) entre dos imágenes superpuestas.
<i>Correlación de vista múltiple (MVS)</i>	Reconstrucción del punto del objeto mediante correlación (en el espacio del objeto); Remondino et al. 2014) a partir de múltiples imágenes superpuestas. MVS toma la información de ubicación y orientación de SfM y crea una nube de puntos densa en 3D.
<i>Densificación nube de puntos</i>	Incremento en la resolución de la nube de puntos que modelan escenas 3D por emparejamiento de píxeles en imágenes con parámetros intrínsecos y extrínsecos conocidos
<i>Parámetros de Orientación interna</i>	Geometría interior de la cámara que comprende la distancia principal/focal (distancia entre el centro de proyección y el sensor de imagen), el punto principal (intersección de la perpendicular del centro de proyección al plano de la imagen) y los parámetros de distorsión (por ejemplo, distorsión radial y tangencial)
<i>Parámetros de Orientación externa (Georeferenciación)</i>	La geometría exterior de la cámara comprende la posición (tres ejes X_0 , Y_0 , Z_0) y la orientación (tres ángulos de rotación ω , ϕ , κ) del centro de proyección de la cámara.
<i>Ajuste de haces en bloque (Bundle Block Adjustment, BBA)</i>	Optimización de mínimos cuadrados para resolver simultáneamente los parámetros extrínsecos (e intrínsecos) de todas las imágenes; El término "haz" se correlaciona con los rayos que se derivan de puntos 3D (Puntos de enlace), convergen en los centros de proyección correspondientes y se interceptan con la imagen en el sensor (figura 15).
<i>Auto calibración de la cámara</i>	Método de calibración de la cámara donde los parámetros intrínsecos de la cámara y distorsión de la lente se incluyen como incógnitas adicionales en el ajuste de haces para resolver la geometría interior de la cámara durante un proyecto fotogramétrico actual.
<i>Puntos de control en terreno</i>	en imágenes son puntos claramente distinguibles cuyas coordenadas al objeto son conocidas para georeferenciar el modelo de superficie
<i>Nube de puntos</i>	Cantidad de puntos de coordenadas 3-D que describen la superficie dentro de un sistema de coordenadas arbitrario o georeferenciado con información adicional como color en el espectro visible.
<i>Modelo digital de Superficie MDE</i>	Descripción tridimensional de la superficie en formato ráster (cuadrícula) o vectorial (malla)

En la Tabla 6 se comparan las variables utilizadas en el Ajuste de Haces por métodos de fotogrametría tradicional (plataformas tripuladas) y SfM RPAS. Según la Tabla 10, a diferencia de la fotogrametría tradicional, la fotogrametría SfM permite determinar la geometría interna de la cámara sin calibración previa, ajustando dichos valores como incógnitas durante la resolución de las ecuaciones de colinealidad (*Autocalibración*). Los puntos de control en el terreno (GCP) se utilizan como restricciones externas para la georeferenciación del proyecto fotogramétrico y optimización de la autocalibración, proporcionando información adicional para reconstrucción tridimensional de la escena (Westoby et al., 2012). Finalmente, el método

de ajuste de haces utiliza una secuencia amplia de imágenes, el geoetiquetado y los GCP para la reconstrucción tridimensional de la escena mediante una de la nube dispersa preliminar (Barazzetti et al., 2014; Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, 2016). Paso seguido, esta nube es densificada para luego ser insumo en la generación de productos altimétricos definitivos como los MDS y MDT siguiendo la cadena procesamiento SfM.

Tabla 6. Comparación de variables en el Ajuste de Haces para fotogrametría: convencional y SfM con RPAS (Fuente: Turner et al., 2012)

Variables	Fotogrametría aérea tradicional	Ajuste de Haces por Fotogrametría SfM de RPAS
Parámetros de orientación interna de las cámaras (Matriz de calibración: Dist. focal, punto principal, distorsión radial/tangencial de las lentes)	Parámetros a menudo conocidos a partir de cámaras métricas calibradas	Parámetros no usualmente conocidos y a menudo inestables debido al uso de cámaras no métricas
Parámetros de orientación externa (Posición de la cámara y orientación)	A menudo, posiciones medidas a partir de equipos a bordo de alta precisión GPS/IMU	Desconocidos o imprecisos debido a la limitada precisión de dispositivos de navegación de bajo costo GPS/IMU
Puntos de enlace en la imagen (x,y) (detección características comunes)	Manualmente identificados o automáticamente generado por Algoritmos de extracción de puntos de interés	Manualmente identificados o automáticamente generado por un detector de región como el algoritmo SIFT (<i>Scale Invariant feature Transform</i> , Lowe 2004).
Puntos del objeto en el terreno (X,Y,Z)	Las coordenadas de los puntos de enlace son calculadas como parte del proceso de Ajuste de Haces en Bloque. Las coordenadas de los puntos del terreno son calculadas empleando técnicas de emparejamiento de imágenes (usualmente basados en métodos híbridos de y área) para identificar puntos similares en dos o más imágenes y después por intersección basada en las ecuaciones de colinealidad (Ec. 1 y 2).	Las coordenadas de todas las características SIFT (o similar) son calculadas como parte de un proceso de Ajuste de Haces en Bloque (Programa SfM). La nube densa de puntos es calculada empleando técnicas de correlación de múltiples imágenes (≥ 3 imágenes) (<i>patch-based multi-view stereo PMVS</i>)
Puntos de control en terreno (X,Y,Z)	Identificación manual de artificiales o naturales marcas en las imágenes y medidas “ <i>in situ</i> ” para coordenadas precisas 3D.	Identificación manual de artificiales o naturales marcas en las imágenes y medidas “ <i>in situ</i> ” para coordenadas precisas 3D.

El uso de cámaras de bajo costo en RPAS para fines métricos, no es ajeno a los errores de medición por la inestabilidad la de los parámetros de orientación interna de la cámara. Por tanto, es esencial la calibración de la cámara y la corrección de la distorsión de las lentes durante el procesamiento de un proyecto fotogramétrico (Oniga & Diac, 2013). Sin una correcta calibración (o autocalibrado) de la cámara, no se podrían hacer inferencias apropiadas sobre del rendimiento de un producto altimétrico para fines métricos (ASPRS, 2000).

Finalmente, la importancia de la calibración de la cámara y su influencia en productos altimétricos finales, es un aspecto básico y crucial en fotogrametría aplicable a cualquier escala de trabajo (Chandler, 1999; Fawcett, 2019). Así como la necesidad del uso puntos de control (GCP) para restringir los resultados a un sistema de coordenadas de referencia deseado y la necesidad de puntos de verificación para evaluar la precisión obtenida. A continuación, se detalla sobre el control fotogramétrico y precisión de los MDEs generados del procesamiento fotogramétrico de imágenes adquiridas con RPAS.

Control fotogramétrico de proyectos RPAS y precisión de los MDEs obtenidos.

La generación de productos fotogramétricos de precisión requiere la orientación absoluta precisa o georreferenciación indirecta del vuelo fotogramétrico RPAS a un sistema de coordenadas deseado mediante el establecimiento de puntos de control sobre el terreno o GCP. Ello requiere de marcas fijas que perduren sobre el terreno durante el proceso de adquisición de imágenes (Figura 17a). De estas marcas es necesario conocer sus coordenadas topográficas (X , Y y Z) en el sistema de referencia requerido en el proyecto con instrumentación topográfica de un orden de precisión mayor al esperado en los productos altimétricos (Figura 17b). Generalmente se emplean Sistemas GPS/GNSS, con correcciones diferenciales en tiempo real o RTK. Los métodos de topografía tradicional también pueden ser utilizados (geométricos o taquimétricos), si bien el coste económico puede ser elevado.

Figura 17. Control fotogramétrico de un proyecto RPAS: (a) Diferentes tipos de GCP, (b) determinación de las coordenadas GCP por métodos de topografía convencional (izquierda) y observaciones GPS/GNSS RTK (derecha), (c) distribución idealizada de GCP en fotogrametría clásica, y (d) densificación de GCP en un área deseada para fotogrametría RPAS.

Es posible realizar un geoetiquetado de las imágenes obtenidas con una precisión vertical centimétrica utilizando navegación RPAS con equipos GPS/GNSS RTK, permitiendo prescindir de puntos de control en terreno (Hugenholtz et al., 2016; Roze, Zufferey, Beyeler, & McClellan, 2014). Esto permitirá posteriormente la

georreferenciación del trabajo por medio de la identificación de las marcas en las imágenes durante el procesamiento fotogramétrico SfM en gabinete. La identificación de los GPC en la serie de imágenes es una tarea preferiblemente manual y costosa en términos de tiempo, dependiendo al tamaño del proyecto.

La literatura muestra que se puede obtener una alta precisión en planimetría (X, Y) con un número relativamente pequeño de puntos de control (5 GCP aproximadamente, Figura 17c, independientemente del área del proyecto); mientras que la precisión en altimetría (Z) requiere un número mayor de puntos (Figura 17d), también se requiere una distribución espacial uniforme en ambos casos (Manfreda et al., 2019). Tres aspectos básicos son requeridos para la materialización de los puntos de control: **i)** El tamaño y la apariencia de los puntos de control pueden afectar la detección dentro de las imágenes ya que deben ser reconocibles en las imágenes durante el procesamiento inicial de las mismas. Se propone que tengan un tamaño de 5 a 10 veces el GSD definido en la planificación del vuelo. Smith y Vericat (2015) recomiendan escalar el tamaño de GCP en la resolución espacial del sensor, **ii)** el número de GCP a colocar, como mínimo deben establecerse 3 puntos, pero la literatura sugiere de 15 a 20 GCP (Coveney & Roberts, 2017), aunque un número excesivo no mejora la precisiones en los modelos (Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez, & Martínez-Carricondo, 2017). La precisión en modelos tridimensionales de plataformas satelitales, aerotransportadas y RPAS tienden a aumentar con el número de GCP, con un comportamiento asintótico (Manfreda & Samela, 2019; San & Süzen, 2005). **iii)** La distribución espacial de los GCP se recomienda que sea uniformemente distribuida en toda el área de vuelo (Tonkin & Midgley, 2016), sobre superficies firmes, en espacios abiertos y accesibles para su medición. La distribución espacial de los puntos de control puede ser crítica para la calidad de los resultados (Agüera-Vega et al., 2017; Tonkin & Midgley, 2016). Harwin et al., (2015) recomiendan una distancia aproximada entre GCP de 1/5 a 1/10 de la altitud de vuelo, con un espacio más estrecho a medida que aumenta de relieve de la topografía. Mesas-Carrascosa et al. (2017) señalan la falta de pautas con respecto a la recopilación y distribución de GCP para los estudios de RPAS. La cantidad de puntos de control por unidad de área y su distribución aún siguen siendo un área de investigación importante en la literatura especializada (James et al. 2017; Singh and Frazier 2018)

Paralelo a la determinación de los GCP, también suele ser necesario determinar puntos de verificación o *Check Points* (CP), cuyas coordenadas serán utilizadas para

comprobar con datos externos los resultados del procesamiento fotogramétrico. En la práctica, el sitio de preparación y recopilación de los GCP y CP es el mismo. La distinción solo es pertinente durante el procesamiento y la evaluación de precisión. Los CP se usan después del procesamiento para evaluar la precisión de la superficie producida, no son tomados en cuenta dentro del proceso fotogramétrico, sino al final para la evaluación de la calidad de los productos por medio de estimadores estadísticos de error. El número de estos puntos de verificación debe corresponder a una muestra estadística representativa del área de estudio y su distribución ha de ser aleatoria y heterogéneamente distribuida, tanto en zonas de terreno abierto como en zonas vegetadas o edificadas donde es esperable un mayor error altimétrico (ASPRS, 2014; Höhle & Höhle, 2009). Autores como Abdullah sugieren una cantidad mínima de 20 CP independientemente de la extensión sobrevolada con un RPAS. Como regla general en la fotogrametría RPAS y convencional, la precisión vertical para un MDE correctamente reconstruido debe estar entre 1 y 3 veces el GSD de las imágenes de entrada (Bühler et al., 2015; Draeyer, B., & Strecha, 2014; Nex & Remondino, 2014). Por otro lado, los productos planimétricos, tales como ortomosaicos derivados, pueden presentar una precisión horizontal (X,Y) de unos pocos centímetros (Padró et al. 2019), mientras que la precisión en vertical (Z) obtenida en los modelos son menores en términos generales (Manfreda et al., 2019).

En definitiva, la precisión de los productos fotogramétricos SfM obtenidos a partir de imágenes micro-RPAS según la literatura especializada (Manfreda et al., 2019; Sanz-ablanedo & Chandler, 2018) depende de factores de diseño como:

- La geometría del vuelo (altura, distancia entre tomas, % de solapamientos, ángulo de captura, trazado del vuelo).
- Configuración del procesamiento del código fotogramétrico SfM-MVS implicado.
- La calidad y auto calibrado de la cámara (Geometría). Calibración adecuada de los parámetros internos de la cámara.
- Estrategia de georreferenciación del proyecto (GCP, geoetiquetado de imágenes)

En este último factor de diseño del vuelo RPAS se enfoca el objetivo (a) de la tesis, cuya finalidad es proponer una alternativa de georreferenciación precisa para el control fotogramétrico en la obtención de MDEs. En la siguiente sección se presenta un análisis de la literatura RPAS especializada en cuanto a la georreferenciación y aplicaciones de los MDEs obtenidos mediante fotogrametría SfM en estudios de inundaciones.

2.5. Los MDEs a partir de imágenes RPAS, precisión altimétrica y aplicación en la amenaza de inundación.

Como se ha visto en las secciones anteriores, los modelos digitales de elevación son representaciones topográficas indispensables en los estudios de inundaciones, concretamente en la estimación espacial de su amenaza. Por otro lado, se puede decir que fuentes de datos geoespaciales como el LiDAR son la fuente más fiable de los datos de precisión topográfica y alta resolución para el modelado de inundaciones actualmente (Schumann et al. 2008; Wedajo 2017). Estudios recientes demuestran que los modelos digitales generados a partir de imágenes RPAS pueden ser comparables a los derivados de datos LiDAR en aplicaciones de inundaciones urbanas (Leitão et al., 2016) o fluviales (Coveney y Roberts 2017; Izumida et al. 2017; Schumann et al. 2019). En la literatura especializada surgen ejemplos de la funcionalidad de los productos altimétricos derivados de imágenes RPAS para la modelización hidrodinámica bidimensional en subcuencas urbanas (Yalcin, 2018), y pequeñas áreas (Rinaldi et al., 2019). Otra aplicación importante que se reporta en la literatura es en la gestión del riesgo de inundación y la respuesta de emergencia (Boccardo, Chiabrando, Dutto, Tonolo, & Lingua, 2015; Hashemi-Beni, Jones, Thompson, Johnson, & Gebrehiwot, 2018), y en ríos de alta montaña de difícil acceso (Şerban et al., 2016). Según lo observado en la literatura, es creciente el número de investigaciones de aplicaciones fotogramétricas SfM con RPAS en inundaciones, pero aún existe una posible necesidad de investigación para el desarrollo de métodos que incrementen la calidad de los productos obtenidos en comparación con la tecnología geoespacial de referencia LiDAR.

La modelización de inundaciones (p. ej. estimación de área y profundidad inundada) es dependiente de la precisión de los modelos de elevación utilizados (Alho, et al., 2009). Es ampliamente aceptado que la precisión de los modelos derivados del procesamiento SfM de imágenes RPAS, está influenciada por el diseño del vuelo (Manfreda et al., 2019). Luego es una línea de investigación abierta la evaluación de la precisión de los modelos de elevación RPAS con fin de modelación espacial de inundaciones. La Tabla 7 presenta los resultados de precisión para la obtención de MDEs. Los factores considerados incluyen: parámetros de diseño como tipo de plataforma, GSD, área reportada, precisión vertical absoluta (RMSE y NMAD) y relativa (respecto al GSD) de los modelos de elevación. Según se observa, la precisión vertical (ratios) están entre 1 y 3 veces el GSD de las imágenes de entrada lo cual se ajusta a los solicitado en la literatura. Por lo general, un modelo digital correctamente reconstruido debería estar

dentro de este rango de precisión relativa (Nex & Remondino, 2014; Ruzgiene, Berteška, Gečyte, Jakubauskiene, & Aksamitauskas, 2015). Adicionalmente, la precisión para fotogrametría SfM con RPAS parece estar estrechamente relacionada con el GSD y área cubierta; a mayores precisiones alcanzadas, es necesario un menor GSD y área cubierta.

Tabla 7. Estudios y precisión absoluta y relativa (ratios) de modelos derivados de fotogrametría tradicional y RPAS.

Autor	Plataforma	GSD (cm/pix)	Area (km ²)	NMAD* (cm)	NMAD:GSD (ratio) **
Zazo et al. (2018)	Ultra ligero motorizado	2.6	0.78	6	2.3
Brunier et al. (2016)	<i>Manned Savannah ICP</i>	3.35	No data	6.96	2.1
Bühler et al. (2015)	Aeronave utilitaria	25	145	28	1.1
				RMSE* (cm)	RMSE:GSD (ratio)**
Hughenoltz et al. (2013)	<i>RQ-84Z AeroHawk</i>	10	1.95	29	2.9
Hughenoltz et al. (2016)	<i>eBee™ RTK</i>	5.2	0.48	5.7 – 7.2	1.1 – 1.4 (1.2)
Roze et al. (2014)	<i>eBee™ RTK</i>	2.5 – 5.0	0.2	3.1 – 7.0	1.2 – 1.4 (1.3)
Benassi et al. (2017)	<i>eBee™ RTK</i>	~ 2.0	0.25	2.0 – 10.0	1.0 – 5.0 (3.0)
Leitão et al. (2016)	<i>eBee™</i>	2.5 – 10.0	0.039	No data	No data
Gindraux et al. (2017)	<i>eBee™</i>	6	1.4 – 6.9	10 – 25	1.7 – 4.2 (2.9)
Immerzeel et al. (2014)	<i>Swinglet CAM™</i>	3 – 5	3.75	No data	No data
Yilmaz et al. 2018	<i>Gatewing™ X100</i>	5.0 – 6.0	2.0	5.0 – 33.0	1.0 – 5.5 (3.3)
Coveney et al. (2017)	<i>Swinglet CAM™</i>	3.5	0.29	9	2.6
Langhammer et al. (2017)	<i>Mikrokoetter® Hexa</i>	1.5	~ 0.14	2.5	1.7
Ajayi et al. (2017)	<i>DJI™ Phantom 2</i>	10.91	0.81	46.87	4.3
Sherwood et al. (2018)	Aeronave utilitaria	35 – 50	9	48	1.4 – 1.0 (1.2)
Grammatikopoulos et al. (2015)	Aeronave utilitaria	20	No data	30	1.5

* NMAD y RMSE son estadísticos utilizados para evaluar la precisión altimétrica de los modelos digitales según la distribución de los errores: NMAD (*Normalized median absolute deviation*) es un estimador robusto (basado en la mediana, ver Höhle et al., 2009). RMSE es el estimador de más amplio uso en la literatura RPAS y se basa asumiendo una distribución normal de los errores (Abdullah, 2019; ASPRS, 2014)**El promedio del rango en las ratios de precisión se muestra en paréntesis.

Según la literatura el impacto del método de georreferenciación en la precisión de los productos SfM-MVS de elevación es crítico (M. R. James et al. 2017; Manfreda et al. 2019; Padró et al. 2019; Singh and Frazier 2018). Por lo general, la georreferenciación por GCP en terreno se considera el método más preciso (Mike R. James et al., 2017), aunque absorbe un alto porcentaje de esfuerzo, aproximadamente el 15 % de tiempo de todo el flujo de trabajo de un proyecto fotogramétrico RPAS (Nex & Remondino, 2014). Padró et al. 2019 reporta costos de materializar los GCP, incluido el alquiler de un equipo GNSS estático y personal, de aproximadamente a 500 € (para 8 GCP, lo que supone aproximadamente 63 € por cada GCP considerado). El tiempo invertido para pintar y materializar puntos de plataformas de hormigón fue aproximadamente una hora por GCP.

El uso de datos de elevación disponibles, por ejemplo, de LiDAR, puede ser una alternativa viable para georreferenciar un proyecto fotogramétrico RPAS. La literatura muestra la complementariedad entre LiDAR, como una fuente alternativa para los puntos

de control en el terreno, y la fotogrametría aerotransportada (James et al. 2006; Liu et al. 2007; Mitishita et al. 2008). Liu et al. (2007) y James et al. (2006) han sugerido el uso de puntos de control alternativos llamados "*puntos de control derivados de LiDAR*". Sherwood et al. (2018) desarrolló una metodología de determinación manual de la ubicación X,Y,Z de puntos de control "*sintéticos*" en aplicaciones costeras a partir de productos geoespaciales existentes: LiDAR aéreo para la extracción de la elevación y ortoimágenes de *Google Earth* para la ubicación horizontal de los puntos (Figura 18a); posteriormente los puntos de control sintéticos fueron utilizados para el procesamiento SfM de imágenes obtenidas de plataformas aerotransportadas. Algunos autores (Grammatikopoulos et al., 2015; Persad, Armenakis, Hopkinson, & Brisco, 2017), han aplicado técnicas de detección de características comunes entre imágenes con el fin de extraer automáticamente valores de posición (X,Y,Z) de puntos de control en ortoimágenes (Figura 18b) como en modelos digitales (Figura 18c).

Este método alternativo de georreferenciación indirecta se ha aplicado también en la generación de modelos 3D urbanos (Grammatikopoulos et al., 2015). Recientemente se ha explotado el principio de complementariedad LiDAR-fotogrametría a partir de imágenes RPAS multirrotor de alta resolución para el modelado de ciudades en 3D (Gruen et al., 2013). Persad et al. (2015) ha propuesto la integración automática de nubes 3D de plataformas RPAS con puntos de LiDAR terrestre para fines de reconstrucción y modelación 3D. El mismo autor, ha propuesto un método de correregistro automático de nubes de puntos generados de a partir de imágenes RPAS multirrotor y LiDAR aéreo, aplicado para la generación de MDEs en zonas deltaicas (Persad et al., 2017). Con respecto a plataformas ala-fija, Magtalas et al. (2016) utiliza la nube de puntos densa clasificada manualmente, producto de la cadena de procesamiento SfM, para georreferenciarla respecto a datos LiDAR ya existentes mediante un proceso iterativo de minimización de la distancia entre las dos fuentes de datos.

Figura 18. Casos citados en los que se utiliza información geoespacial disponible (p. ej. LiDAR) como control fotogramétrico: (a) Nube de puntos 3D SfM sobre 8 km de costa, los puntos de control sintéticos se indican rojo (Fuente: Sherwood et al. 2018). (b) Puntos de control extraídos automáticamente en la ortofoto (izquierda) e identificados en una de las imágenes aéreas (derecha) (Fuente: et al. 2015). (c) Resultados de coincidencia de puntos clave de enlace entre MDE RPAS (superior) y LiDAR (inferior) en zona deltaica (Fuente: Persad et al. 2017).

Basándose en la anterior revisión, se puede concluir que son muy pocas las referencias en la literatura especializada que demuestren la contribución de datos geoespaciales disponibles, por ejemplo, de tipo altimétrico LiDAR como método alternativo de control fotogramétrico de un proyecto RPAS tipo ala fija. En concreto, la aplicación del de los modelos digitales de elevación de apoyo a la estimación de la amenaza de inundación. En la literatura revisada, la gran mayoría de estudios de fotogrametría RPAS han sido realizados en condiciones experimentales ideales y áreas pequeñas ($< 2 \text{ km}^2$), siendo muy poco tratado las aplicaciones en condiciones reales de operación, es decir, bajo condiciones que ameriten cubrimientos de área mayores y desafiantes en cuanto a la georeferenciación precisa del proyecto fotogramétrico.

De la revisión de literatura se plantea el interrogante general de si la aplicación de datos altimétricos existentes contribuye en la generación de modelos digitales precisos basados en fotogrametría SfM de imágenes RPAS. Específicamente, el anterior interrogante plantea el objetivo (a) de la presente tesis referente a la propuesta de un método de georreferenciación alternativo. La aplicación de los MDEs obtenidos mediante el método propuesto y el procesamiento SfM en la estimación de la amenaza de inundación, planteó el objetivo (b) de la tesis. El logro de los objetivos trazados fue divulgado en la revista *Sensors* (2019) bajo el título: “*DEM Generation from Fixed-Wing UAV Imaging and LiDAR-Derived Ground Control Points for Flood Estimations*” (<https://doi.org/10.3390/s19143205>).

En el presente capítulo se ubicó la temática de la tesis en el contexto global de la problemática de las inundaciones, su estimación a nivel local, además de mostrar los avances existentes sobre la generación de MDEs. Concretamente en la técnica fotogramétrica SfM para imágenes RPAS y del cual se plantea un método de georreferenciación a la luz de la literatura especializada. A continuación, el capítulo 3 describe la ciudad caso de estudio donde se aplicará el método propuesto y analizará el potencial de los MDEs generados en la estimación de la amenaza de inundación para un evento hidrológico extremo.

CAPITULO 3.

CASO DE ESTUDIO

Este capítulo tiene como objeto presentar la ciudad considerada como caso de estudio para el logro de los objetivos planteados en la tesis. El capítulo consta de tres secciones en el que se describen, la ubicación y características fisiográficas más relevantes de la zona, el clima, demografía y urbanismo. Por último, se presentan los desafíos locales a las inundaciones.

3.1. Ubicación y morfología de la ciudad considerada como caso de estudio

El caso de estudio se encuentra en el Caribe Continental Colombiano, en el departamento (unidad administrativa territorial) de La Guajira - Colombia, concretamente dentro de la ciudad de Riohacha ($11^{\circ}32' N$; $72^{\circ}54' O$), estando limitado al norte con el Mar Caribe y al este con el Delta del Río Ranchería (Figura 19).

Figura 19. Ubicación general del caso y área de estudio, las flechas azules indican la dirección dominante de las inundaciones. Abajo se muestra una imagen de enero de 2019 satelital de la Ciudad de Riohacha, $11^{\circ}32' N$; $72^{\circ}54' O$. (Fuente imagen: © Maxar Technologies-Google Earth, 2019).

La elección del área de estudio se basa en dos criterios. Primero, el interés local debido a su alta exposición a fuertes inundaciones por tormentas torrenciales como ocurrieron en el curso de la llamada “*ola invernal 2010-2011*” causada por el fenómeno de La Niña (Hoyos et al., 2013). En segundo lugar, la disponibilidad de datos hidrológicos procedentes de estudios previos y de información geoespacial disponible de otras fuentes (datos LiDAR aéreo y cotas topográficas del plan local de alcantarillado). Adicionalmente, su elección se justifica debido al contexto emblemático como ciudad en desarrollo de tamaño intermedio, de alto crecimiento poblacional y altamente vulnerable a amenazas naturales. Ello ha llevado a un interés científico local e internacional como caso de estudio (Nardini, Cardenas Mercado, and Pérez Montiel 2018; Nardini and Miguez 2016; Pérez, Nardini, and Zuñiga 2018, de Oliveira et al. 2019) y gubernamental, a través del del programa “*Ciudades Emergentes y Sostenibles en Colombia*” del Banco Interamericano de Desarrollo (FINDETER S.A. 2019).

La ciudad de Riohacha cuenta con una zona urbana aproximada de 24 km² según el ordenamiento territorial e incluyendo terrenos no ocupados (Alcaldía de RIOHACHA - LA GUAJIRA, 2016). En esta superficie es notable la presencia y aumento de asentamientos improvisados y no regulados en las zonas periféricas. Según estudios multitemporales realizados usando imágenes satelitales, se ha estimado una huella urbana de 17 km² en 2016, como se ilustra en polígono gris de la figura 19 (FINDETER., 2017). El área de estudio general es una cuenca urbana de aproximadamente 13 km², donde existen cuatro humedales de origen seminatural que cruzan longitudinalmente la cabecera urbana (Polígonos en verde en la figura 19). Existen humedales naturales como es el caso de la “*Laguna Salá*”, y antrópicos como el llamado “*La Esperanza*” (Pérez, Nardini, and Zuñiga 2018). Estos humedales demarcan el eje principal de drenaje en dirección sur a noreste, hasta su evacuación final en el río Ranchería (represando por flechas azules en la figura 19).

La morfología del terreno se caracteriza por un relieve plano con ondulaciones ocasionales y una pendiente media de aproximadamente 1 %. Las elevaciones del terreno varían desde los 25 msnm en el sur, hasta valores cercanos a los 0 msnm en el norte (línea de costa). Esta topografía plana y regularmente ondulada favorece las inundaciones, especialmente en asentamientos humanos próximos a los humedales y delta del río Ranchería. La zona del Delta del Río Ranchería (zona nororiental de la figura 19) (Teng et al., 2017) es destinada como área de preservación ambiental, no obstante, cuenta con

presencia de asentamientos periurbanos en terrenos de cotas bajas (0.15 – 0.50 msnm) como es el caso de la comunidad Villa Fátima, asentamiento periurbano altamente expuesto a inundaciones fluviales. Debido a la configuración plana y de escasa pendiente de la zona, los factores de estudio hidrodinámicos, no son relevantes para los objetivos planteados en la tesis. Por tanto, bajo el anterior supuesto se justifica para la zona de estudio el uso de modelos conceptuales simplificados o “*non-physics-based models*” (Teng et al., 2017). Lo anterior limitando el estudio a determinar la extensión de inundación final/máxima y los niveles de agua para un MDE determinado, asumiendo que los efectos físicos dinámicos como velocidad, son insignificantes.

3.2. Climatología, demografía y urbanismo

La ciudad de Riohacha está en el departamento de La Guajira, tiene forma de península y es caracterizada por su clima árido (BWh) y semiárido cálido (BSh) según la clasificación de Köppen-Geiger, es decir, lluvias entre los 300 y los 800 mm anuales (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007). La precipitación local media es de 541 – 580 mm (IDEAM, 2019), con un régimen bimodal de lluvias: dos temporadas secas (abril-mayo) y dos temporadas lluviosas (septiembre a noviembre) como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Climograma de precipitación media mensual (mm) y temperatura (°C) en el eje de las ordenadas para Riohacha (11°32' N; 72°54' O): Temperatura media mensual en °C, en línea roja. (Fuente: climate-data.org, 2019).

En los meses de temporada lluviosa se registra entre 5 y 8 días de lluvia/mes, mientras que en los meses de septiembre y octubre se registran entre 16 y 18 días de lluvia/mes. Generalmente en los meses lluviosos se registran lluvias de alta intensidad y poca duración. El mes más seco es marzo, con 1 mm de lluvia, mientras que octubre es el

más lluvioso con 150 y 175 mm. La temperatura media anual es 28,3 °C variando durante el año en 2.7 °C (línea roja figura 20). La humedad relativa está entre 69 % y 88 % y los vientos alisios son predominantes en la dirección noroeste con una velocidad promedio de 2.2 m/s (Vengoechea, Rojano, & Arregoces, 2018).

En cuanto a demografía, Riohacha es una ciudad relativamente pequeña en comparación con otras ciudades del caribe colombiano (entre 200.000 y 300.000 habitantes, siendo Barranquilla la ciudad más grande de la Región Caribe Colombiana con 1.2 millones de habitantes en 2015). Riohacha es una de las ciudades con mayor pobreza en el país. En el año 2017, la pobreza extrema se estimó en el 15.1 % y el coeficiente de equidad *Gini* en 0.524, mientras que los valores nacionales se estimaron en 7,4 % y 0,508 respectivamente (Ricciulli-Marin et al. 2018). La población oficial estimada para 2019 es de 252.951 habitantes, de los cuales el 81 % se estima que viven en la zona urbana (figura 21, DANE 2019).

Figura 21. Población cabecera urbana de la ciudad de Riohacha. Estimaciones 1985 – 2005 y proyecciones 2005 – 2020. Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (2019).

Es posible que esta cifra estimada sea mucho mayor, dado el escenario actual de migración, convirtiendo la ciudad de Riohacha en un punto receptor de población desplazada. Un importante flujo migratorio se explica por la migración desde las zonas rurales del municipio hacia su cabecera y en proporción más significativa, desde otras regiones del país lo cual se refleja en la evidente acelerada expansión urbana, especialmente de asentamientos improvisados (FINDETER 2017; Niño y Luque 2017). A lo anterior se suma la población flotante de migrantes del vecino país de Venezuela que vienen desarrollándose desde el 2016 y de forma masiva a partir del 2018, siendo Riohacha una de las principales ciudades receptoras de migrantes (DNP, 2018).

La ciudad está experimentando una rápida expansión de asentamientos incontrolados sin planificación sin acceso a servicios básicos. Estos asentamientos presentan altas de crecimiento de la población principalmente en la periferia, entre el 4,2 % y el 5,7 % anual (FINDETER, 2017; Ricciulli-Marin et al., 2018). Estudios de imágenes satelitales Landsat de coberturas del suelo entre 1986 y 2016 (Figura 22), confirman el incremento acelerado de la huella urbana estimando dicho crecimiento en un 223 % (FINDETER, 2017). En esta expansión predominan viviendas altamente vulnerables que no cumplen los criterios mínimos de construcción, ocupando suelos destinados a usos diferentes al residencial y en zonas de alta amenaza, como depresiones del terreno y cercanía a los humedales urbanos (Pérez, Nardini, and Zuñiga, 2018), terrenos que pertenecen a particulares, por tanto, estas unidades se conocen como ocupaciones ilegales.

Figura 22. Estudio de crecimiento urbano y clasificación del uso del suelo a partir de imágenes Landsat (1986 y 2016) para la ciudad de Riohacha. Fuente: Tomado de “ESTUDIOS BASE PARA LA CIUDAD DE RIOHACHA, COLOMBIA- (FINDETER, 2017)”

3.3. Problemática local ante la amenaza de inundaciones

En esta sección se describirán las particularidades hidrológicas del área de estudio, concretamente el impacto de la La Niña 2010-2011, los posibles escenarios futuros de precipitación, la oferta de estudios locales previos y la descripción del contexto local de escasez de información

El fenómeno de La Niña 2010-2011.

Durante la segunda mitad de 2010, el sistema climático global se vio afectado por la presencia de condiciones climáticas anómalas en el océano Pacífico Tropical relacionadas con el fenómeno de La Niña. Estas condiciones permanecieron durante la primera mitad de 2011, lo que implicó fuertes precipitaciones sobre la región ecuatorial

(Merz et al., 2014). Colombia no fue ajena a este fenómeno, con niveles de precipitación por encima de los registros históricos. El gobierno de Colombia denominó esta variabilidad climática como “*Ola invernal 2010-2011*”, declarando el estado de emergencia. Las pérdidas y daños en infraestructura, cultivos y medios de vida fueron aproximadamente el 2 % del PIB, afectando a 2.3 millones personas (Germán Vargas et al., 2018). En lo local, Riohacha fue una de las ciudades colombianas más afectadas durante La Niña 2010-2011, sufriendo inundaciones, pérdida de bienes materiales, viviendas deterioradas y/o destruidas, además de enfermedades ligadas al estancamiento de aguas (Ávila Brito, Nardini, & Pérez Montiel, 2017). La Figura 23 muestra la precipitación media anual para la ciudad de Riohacha desde los años 1974 a 2016. El evento más fuerte de precipitación registrado en la ciudad de Riohacha ocurrió el 18 de septiembre de 2011 (barras rojas, Figura 23).

Figura 23. Registros de precipitación media anual de la ciudad de Riohacha en milímetros (mm) de lluvia. Las barras en rojo indican el periodo de La Niña 2010-2011. La serie de tiempo en años se muestra en el eje de las abscisas (Fuente: Estación meteorológica “Almirante Padilla”, <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>)

Se observa que durante el periodo de La Niña 2010-2011, la cantidad de lluvia estuvo por encima de lo normal, casi tres veces la media anual, seguido de un periodo de sequía durante el periodo 2013-2015 debido al fenómeno de El Niño (German Vargas, 2016). El 2016 fue un año lluvioso, que provocó inundaciones importantes como la del día 19 de noviembre, en el cual se registró una lluvia extrema de 115 mm en tres horas aproximadamente, cuando 60 mm eran lo esperado para todo el mes. Fuera del periodo de observación, se resalta el evento de inundación del 31 de mayo de 2019, con un registro de lluvia torrencial de 189.9 mm en 3 horas. Lo anterior dictamina un escenario de clima

local extremo, con años lluviosos seguidos de periodos de sequía importantes y aumento de la frecuencia de lluvias de alta intensidad y poca duración.

Escenarios futuros de precipitación.

Respecto a los escenarios globales de precipitación y calentamiento, estudios recientes revelan cambios importantes en las características del evento climático de El Niño, pero aún no está claro cómo cambiará La Niña (Cai et al., 2015). En el ámbito de Colombia, estudios de la distribución espacial de aridez para diferentes escenarios climáticos, concluyó que el CC ampliará las áreas áridas y semiáridas del país, especialmente en la región Caribe colombiana (Pabón et al, 2016). Según el instituto de meteorología nacional (IDEAM), el departamento de La Guajira podría presentar reducciones de precipitación de hasta un 20 % para fin de siglo (IDEAM, 2015b); y en la ciudad de Riohacha reducciones estarían entre un 30 % y 40 % (IDEAM, 2015a).

En términos de temperatura, el IDEAM estima que estas se elevarían a corto plazo en promedio entre los 0.95 °C y los 2.3 °C a finales siglo. Simulaciones regionales de precipitación anual para el año 2100 (figura 24), confirman la tendencia decreciente de la precipitación según los modelos de circulación global del IPPC para tres escenarios de emisiones RCP.

Figura 24. Precipitación anual (mm) al año 2100 para escenarios de emisiones RCP (Representative Concentration Pathways) en la península de La Guajira (Colombia). Escenario RCP: Bajo (azul oscuro) estabilización (azul claro) y alto (gris). La serie de tiempo en años se muestra en el eje de las abscisas (Fuente: <http://rainsphere.eng.uci.edu/> Nguyen et al., 2017).

Según las observaciones locales históricas y los escenarios futuros regionales de precipitación, se concluye que la región peninsular de La Guajira, donde se ubica la ciudad de Riohacha (caso de estudio), estaría marcada por eventos de sequías seguido de precipitaciones extremas. La anterior hipótesis plantea periodos prolongados de sequía con un decaimiento general de lluvias, pero con incrementos en la frecuencia de eventos

de lluvias potencialmente intensas. Es posible el escenario regional de reducción de las lluvias podría considerarse favorable para la gestión local del riesgo de inundación, pero, existe una alta probabilidad de que aumente la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia extrema (Choi, Lee, & Kim, 2016), lo cual es altamente desfavorable. Por tanto, la frecuencia de eventos extremos de inundación aumentaría para el caso de estudio. Además, este escenario hidroclimático extremo y el evidente crecimiento urbanístico acelerado, incrementaría notablemente el valor expuesto, reduciendo la capacidad de infiltración de los suelos, lo que implica mayor inundación para lluvias de la misma intensidad (Pérez, Nardini, and Zuñiga, 2018).

Estudios locales de inundaciones y escasez de información.

Los países en desarrollo como es el caso de Colombia, demandan grandes capacidades institucionales y de conocimiento para la adaptación ante desastres naturales debido a su alta vulnerabilidad, en particular a eventos hidrometeorológicos cada vez más extremos (Mertz et al, 2009). Ello ha llevado a la realización de estudios locales motivados por el desafío que impuso La Niña 2010-2011.

El proyecto “*Adaptación urbana Verde frente a inundaciones con el soporte de la modelación matemática y del programa MODCEL en Riohacha - La Guajira (Colombia)*”, financiado por la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Fundación CREACUA, 2014), es uno de dichos proyectos. Este tuvo como objeto la introducción de nuevas medidas y conceptos para el control de inundaciones con el apoyo de una herramienta de simulación apropiada bajo un enfoque de sistemas.

Según Nardini y Miguez (2016) las inundaciones son favorecidas por la impermeabilización de los drenajes naturales hacia las depresiones topográficas que conforman los humedales. Adicionalmente, las inundaciones ocurren cuando se excede la capacidad del escaso drenaje pluvial y del alcantarillado sanitario que actúa como sistema de evacuación temporal. Las principales causas que favorecieron la ocurrencia de inundaciones en Riohacha son la ocupación de viviendas en zonas de almacenamiento o desagüe natural, las múltiples interrupciones del eje de drenaje natural y construido, la impermeabilización generalizada e inapropiado manejo de los 4 humedales presentes en el territorio.

A partir del evento histórico ocurrido el 18 de septiembre de 2011 se estimó un tiempo de retorno (TR) de 84 años según el estudio hidrológico e hidráulico de Nardini y

Miguez (2016). La lluvia del evento mostró una duración de tormenta de aproximadamente tres horas, con una precipitación acumulada de casi 200 mm (intensidad > 60 mm/hora), un evento considerado como extremo (figura 25a y 25b). En el año 2019 ocurrió una inundación sin precedentes desde el 2011, con un registro de precipitación torrencial de 189.9 mm en aproximadamente tres horas (figura 25c), valor muy cercano al pluviograma reconstruido. Lo anterior parece vislumbrar un escenario hipotético de disminución de lluvias con un aumento de la frecuencia de precipitaciones intensas para el caso de la ciudad de Riohacha.

Figura 25. Intensidad de lluvia en el caso de Riohacha: (a) Pluviograma reconstruido a partir de mediciones de la estación de aforo del aeropuerto local para el evento del 18/09/2011 (Fuente: Nardini y Miguez 2016), y clases de precipitación según su intensidad (Fuente: Agencia Estatal de Meteorología AEMET 2015). (b) Imagen inundación evento extremo Ola Invernal 2010-2011 (Fuente: Nardini y Miguez 2016). (c) Imagen durante inundación del 31/05/2019 (Fuente: Zona Cero en prensa, 2019)

El modelo MODCEL (Gomes Miguez et al., 2017) fue la herramienta hidrodinámica *cuasi*-2D utilizada para simular las inundaciones urbanas pluviales para el evento extremo de referencia del 18 de septiembre de 2011. Este evento fue utilizado para fines de calibración del modelo aplicando una encuesta de profundidades de inundación en 450 viviendas para reconstruir el evento histórico extremo (Nardini y Miguez 2016; de Oliveira et al. 2019). Dicha encuesta permitió recoger información adicional sobre los bienes expuestos para la evaluación del riesgo en la cuenca urbana (Pérez et al. 2018).

Estudios locales comparativos de MODCEL con un modelo hidrodinámico 2D (IBER 2D, Bladé et al. 2014) utilizando los mismos datos de calibración, concluyen que MODCEL tiene un mayor rendimiento para recrear el evento extremo de 84 años, dado que puede trabajar con un modelo digital del terreno de baja resolución (Nardini et al. 2018). Por los anteriores trabajos y su rigor científico, se justifica el uso de las profundidades simuladas del evento local de 84 años como datos hidrológicos para evaluar la utilidad de modelos derivados del procesamiento fotogramétrico de imágenes RPAS (Objetivo b de la tesis). En la sección 4.1 del capítulo 4 (materiales y métodos) se describe en detalle las profundidades de inundación simuladas con MODCEL utilizadas en la presente tesis.

Aparte de las inundaciones pluviales ocurridas en la subcuenca urbana, se suman inundaciones fluviales, concretamente en el sector nororiental de la ciudad de Riohacha (figura 26, Delta del Rio Ranchería). Parte de la zona del delta es destinada como área de preservación ambiental, aunque con asentamientos dispersos como es el caso del Barrio de “Villa Fátima”, comunidad suburbana altamente vulnerables a inundaciones fluviales. Además de la pasada Niña 2010-2011 en esta zona, se han producido inundaciones en las siguientes fechas: 27/10/2015, 19/11/2016 y 14/05/2017. En particular, el barrio de Villa Fátima ha tenido un crecimiento descontrolado en términos de ubicación de las viviendas, de estructura del tejido urbano y también en la tipología de las construcciones (completamente inadecuadas para hacer frente al problema); suponiendo un “desarrollo” que inevitablemente llevará a niveles inmanejables del alto riesgo de inundación ya existente.

Figura 26. Vista aérea oblicua del Delta del Rio Ranchería adquirida por un RPAS multirotor (Phantom 3 Advanced) durante el desbordamiento del Rio Ranchería (2017/14/05) afectando a Villa Fátima.

La identificación rápida de áreas inundadas en situación de emergencia por medio de RPAS es una aplicación posible para la estimación local de daños (Boccardo et al.,

2015; Feng, Liu, & Gong, 2015; Gebrehiwot, Hashemi-Beni, Thompson, Kordjamshidi, & Langan, 2019; Murhy, 2019; Toschi & Remondino, 2018). Por tanto, Villa Fátima constituye otro caso de estudio en el que se plantea la necesidad de captura de información para apoyar la estimación de daños una vez ocurrida la inundación por medio de plataformas RPAS. Pérez et al., (2018) sugiere que información obtenida a partir de ortoimágenes generadas con imágenes RPAS podría apoyar procesos de modelización de inundaciones fluviales periurbanas en un contexto de escasez de datos geospaciales.

Por último, la escasez de información geoespacial altimétrica para la gestión de inundaciones suele constituir un limitante a nivel global, regionalmente más acentuada en países en desarrollo (Osti et al., 2008). En el contexto de Latinoamérica, la modelación de inundaciones se encuentra limitada por la escasez de datos tanto topográficos como hidrológicos, pero también puede considerarse como una oportunidad de investigación (Stehr, Debels, Arumi, Romero, & Alcayaga, 2009). La determinación del área de inundación en zonas urbanas y periurbanas en expansión es de suma importancia en países en desarrollo como Colombia (Hoyos et al., 2013). En lo local, para el caso de estudio, la información geoespacial es limitada, escasa y no actualizada. La poca información disponible se reduce a la oferta de recursos satelitales globales, o a partir de plataformas tripuladas con cobertura parcial y generalmente de acceso restringido (no público). Aunque existen iniciativas de adquisición de información geoespacial de plataformas tripuladas por parte de agencias nacionales gubernamentales, estas no están disponibles de forma directa. El acceso a información base de partida es crucial para la planificación y adaptación local. Por tanto, se parte en un contexto de escasez de datos, tal como se demuestra en Pérez et al. (2018); siendo un desafío el aumentar el aprovechamiento de la oferta existente para poder modelar inundaciones a una escala local de detalle. Por tanto, la ciudad de Riohacha ofrece una oportunidad de estudio de nuevas contribuciones metodológicas para solventar la escasez de información con vistas al logro de los objetivos de desarrollo sostenible al año 2030, en concreto el Objetivo 11: “*Ciudades y comunidades sostenibles*” (Naciones Unidas, 2016) y por ello ha sido seleccionada para el desarrollo de la presente tesis.

En el presente capítulo se presentó la ciudad caso de estudio de donde se obtuvieron los datos e información utilizados para el logro de los objetivos planteados en la tesis. A continuación, se desarrolla la descripción de los materiales y métodos aplicados para el caso de estudio presentado.

CAPÍTULO 4.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se expone la metodología para la consecución de los objetivos de la tesis: generación de modelos digitales de superficie (MDS) y terreno (MDT) por medio de un método alternativo propuesto para el control fotogramétrico de imágenes RPAS (objetivo a); y evaluación de modelos obtenidos en el análisis espacial de la amenaza de inundación (objetivo b). La figura 27 describe la estructura metodológica detallada presentada en la figura 1 del capítulo introductorio. Se muestran los materiales y medios necesarios (línea discontinua) como datos existentes, plataformas RPAS para la captura de imágenes y programas propuestos para la preparación de datos y procesamiento fotogramétrico. El esquema metodológico se divide en tres secciones: 1) Análisis de modelos existentes, procesamiento fotogramétrico SfM y análisis preliminar de modelos digitales RPAS. 2) Propuesta metodológica de control fotogramétrico para la generación de modelos de elevación derivados de RPAS y 3) la aplicación de los modelos generados para estimar la amenaza de inundación.

Figura 27. Esquema general del capítulo 4 (Materiales y Métodos)

La división de la metodología en tres secciones (4.4., 4.5 y 4.6), se justifica con el objeto de diferenciar entre la etapa de procesamiento previo, la propuesta metodológica y la evaluación de la aplicación de productos obtenidos. A continuación, se describe cada una de las secciones metodológicas y detalle del contenido de sus subsecciones (en negrilla y cursiva).

4.1. Datos existentes de referencia altimétrica e hidrológicos.

Esta sección presenta la información secundaria de tipo altimétrica a ser utilizada como superficies de referencia para comparaciones posteriores con los modelos RPAS obtenidos. También se presentan los datos hidrológicos utilizados como profundidades de inundación producto de simulaciones hidrodinámicas llevadas en el área de estudio.

Nube de puntos LiDAR clasificadas

El área de estudio cuenta parcialmente con información altimétrica obtenida mediante sensores LIDAR² (figura 28a). El conjunto de datos LiDAR fue adquirido en 2008 por la Autoridad nacional marítima colombiana, DIMAR, con el fin de realizar un levantamiento topográfico de la línea de costa. El sensor activo utilizado fue el Leica ALS540 montado sobre una plataforma Cessna 402B. La altitud de vuelo realizado fue de aproximadamente 900 m AGL (Corbley, 2014). El espaciado nominal (muestreo horizontal) se situó entre 1 y 1.3 m, con una densidad final de aproximadamente 0.7 puntos/m². Los datos suministrados presentaban clasificación de terreno (Figura 28b y 28c clase 8 “*Model Key Point*”) realizada por el contratista Merrick & Company con su programa propietario MARS® (Afanador Franco, Orozco Quintero, Gómez Mojica, & Carvajal Díaz, 2008) presentando una densidad de aproximadamente de 0.25 puntos-terreno/ m². De acuerdo con los metadatos anteriores, se puede asumir que los datos LiDAR se encuentran dentro de la precisión vertical de la clase ASPRS de 20 cm (Abdullah et al., 2015) y que presentan un nivel de calidad QL3 (≤ 20 cm RMSE) de acuerdo con las especificaciones del USGS (Heidemann, 2018).

Para el conjunto de datos altimétricos LIDAR, es necesario su transformación a superficie continua tipo ráster con el fin de facilitar el análisis de precisión en estudios de inundaciones. Además, los datos están referidos sobre el elipsoide terrestre, que para el caso de estudio presenta altitudes negativas, es decir, el geoide se encuentra sobre el elipsoide de referencia. Por lo que es necesario su transformación a alturas ortométricas (referidas sobre el nivel medio del mar) y así poder utilizar el mismo sistema de referencia MAGNA-SIRGAS (WGS84) empleado para todos los datos geoespaciales a utilizar. La descripción de la transformación de nube de puntos LIDAR a ráster y la corrección

² Planchas LiDAR Metadatos DIMAR: “ATL14535” y “ATL14541”. Capitanía de Puerto de Riohacha. Departamento de La Guajira. Municipio de Riohacha. Año 2008. Contratista: Merrick & Company

ortométrica de los MDEs obtenidos de los datos LIDAR se desarrolla en detalle en la sección 4.4. del capítulo 4 (materiales y métodos).

Figura 28. Ubicación y vistas previas de las planchas LiDAR (“ATL14535.las”; “ATL14541.las”) para el caso de estudio: (a) Nube de puntos sin clasificar, (b) nube de puntos clasificadas (tonos oscuros representan el terreno, calles/suelo desnudo) y (c) nube de puntos de terreno “Model Key Point”. Las elevaciones son elipsoidales en metros.

Modelo digital de elevaciones derivado de topografía convencional (Topo).

Este modelo proviene de los productos geospaciales derivados del proyecto “Adaptación Urbana Verde” cedido por la Fundación CREACUA (2014) como se muestra en la figura 29.

El modelo fue construido a partir de las cotas topográficas del diseño del Plan Maestro de Alcantarillado, con una densidad de 686 puntos por km^2 por medio de interpolación *Kriging*, resultando en un MDE de mediano detalle de 5 metros de resolución espacial. Este MDE constituye la base altimétrica utilizada en los estudios hidrodinámicos de inundaciones con el modelo hidrodinámico *cuasi-2D* “MODCEL” para el proyecto “Adaptación Urbana Verde”. El uso de este MDE con MODCEL, se

justificó frente a otros modelos hidrodinámicos 2D más complejos que requerían un mayor nivel de resolución espacial (de Oliveira et al., 2019; Nardini et al., 2018; Nardini & Miguez, 2016).

Figura 29. Modelo derivado información topográfica (Topo) del alcantarillado local (5 m) y puntos para su corrección altimétrica (en rojo): (a) Modelo de elevación con gradiente color. (b) Vista tipo iluminación de sombreado (Hill-shade).

Dicho modelo de elevaciones fue corregido verticalmente con respecto a la red geodésica oficial del instituto geográfico IGAC a partir de observaciones externas con el fin de asegurar la calidad altimétrica del mismo (Fundación CREACUA 2014). El procedimiento para la corrección vertical del MDE se realizó utilizando 26 puntos cuyo valor de elevación (Z) se determinó mediante nivelación geométrica y su ubicación (X,Y) a partir de cartografía S.I.G tomando como criterio el centro de la tapa del pozo de inspección. En la figura 29 se presenta el modelo junto con los 26 puntos de corrección altimétrica (rojo): la figura 29a se muestra el MDE y la 29b la visualización “hillshaded”. En esta última imagen se pueden observar ligeras depresiones del terreno a través del curso de la escorrentía del conjunto de humedales urbanos (polígonos amarillos). La comparación altimétrica en los 26 puntos con los valores del MDE, arrojó un error medio de 35 cm (desviación estándar 23 cm), por tanto, se espera que la precisión vertical esté por debajo de 1 m. Luego es necesario determinar la precisión del modelo generado a partir de los datos de topografía convencional. Este modelo se evaluará junto con los productos altimétricos del vuelo 2.

En la Tabla 12 se resume las características de los datos altimétricos disponibles para el caso de estudio.

Tabla 8. Resumen datos altimétricos disponibles para el caso de estudio.

Modelo	Formato	Origen	Método Interpolación	Área	Resolución (horizontal)
Topografía Convencional	Ráster (*.tif)	Datos elevación plan maestro alcantarillado + corrección local altimétrica ($n = 26$). Empleado en MODCEL.	Krigin de puntos (X,Y,Z) a partir de topografía convencional	24 km ²	1 - 1.3 m (Espaciado nominal entre puntos)
LiDAR aéreo	Vectorial (nube de puntos *.las)	Láser escáner aéreo (LiDAR)	No aplica	2.81 km ²	5 m

Datos hidrológicos: profundidades simuladas para un evento de inundación extremo.

Como fuente de información hidrológica, se han considerado las salidas de la simulación de profundidades (h) máximas de inundación obtenidas con el modelo hidrodinámico MODCEL calibrado con el evento extremo de referencia de 84 años (de Oliveira et al. 2019). MODCEL es un modelo conceptual cuasi 2D que soporta una familia de modelos hidráulicos que discretiza el territorio en “celdas” con elementos dinámicos interconectados que permiten representar el almacenamiento, la escorrentía superficial y subterránea en la red natural y artificial urbana. Para cada celda hay se modelan los procesos hidrológicos que transforman la precipitación en escorrentía

sometidos al principio de conservación de la materia según la ecuación 3 (Miguez et al. 2009; Miguez et al. 2017):

$$As_i \frac{dz_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde $Q_{i,k}$ representa la descarga entre celdas vecinas i y k , función del nivel de las aguas Z_i y Z_k . que toma formas diferentes según la situación y es así capaz de representar diferentes regímenes hidráulicos posibles; Z_i representa el nivel de la superficie del agua en el centro hidráulico de la celda i (en adelante *subcuenca*); As_i representa el área de la superficie del agua para la célula i ; P_i representa la descarga generada por la precipitación sobre la celda y t es la variable independiente relacionada con el tiempo.

Las salidas simuladas de profundidad h del evento de referencia de 84 años de tiempo de retorno se muestran en la figura 30.

Figura 30. Mapa de inundación (profundidades en metros) de la calibración de MODCEL equivalente a una lluvia para el evento extremo de 84 años de periodo de retorno del 18/09/2011. Las celdas en la imagen derecha se codifican en números de color blanco. Los nombres de los humedales urbanos son igualmente resaltados. Fuente: de Oliveira et al. 2019.

Los datos hidrológicos de profundidad (h) utilizados fueron extraídos de un área amplia de 0.93 km² constituida por la superposición de las coberturas de datos disponibles de elevación (LiDAR y Topo) y, de las celdas MODCEL codificadas con los números 506, 603, 703, 704 y 705.

En la figura 31 se presenta el área considerada para la obtención de los datos de profundidad, para las 5 celdas consideradas, así como la ubicación del centro de celda, que es el punto menor elevación del terreno dentro (punto rojo)

Figura 31. Celdas (subcuencas) seleccionadas de MODCEL y profundidades (h) de simuladas para el evento extremo de referencia de 84 años.

Cada celda es una subcuenca urbana que interactúa con otras dependiendo de la función, ya sea de transferencia o almacenamiento de escorrentía asignada por el modelador (Gomes Miguez et al., 2017). En la Tabla 9 se describen las características territoriales de cada una de las 5 subcuencas seleccionadas a analizar en la presente tesis.

Tabla 9. Descripción de cada subcuenca y profundidades (h) para el evento extremo de referencia de 84 años simulado con MOCEL. Fuente: Fundación CREACUA (2014); Nardini y Miguez (2016).

Subcuenca (Código)	Profundidad simulada h (m) (TR 84 años) *	Descripción hidráulica de la subcuenca
704	1.22	Subcuenca urbana (0.32 km^2) que transfiere la escorrentía al río "Ranchería" y viceversa.
705	0.29	Subcuenca también urbana (0.32 km^2) con un nivel medio de elevación superior a la 704.
703	1.78	Subcuenca de evacuación (0.02 km^2) adyacente a la 604. Transfiere al río la descarga.
603	1.63	Humedal "Laguna Salaá" parcialmente ocupado por cobertura urbana
506	1.12	Subcuenca de entrada de la celda 603 que transfiere la escorrentía aguas arriba de la subcuenca urbana.

* Detalles de la profundidad simulada h y la delimitación de la subcuenca y codificación se explican en Nardini y Miguez (2016).

4.2. Captura de datos: Diseño de vuelos fotogramétricos con RPAS.

En esta sección se describe las plataformas RPAS y sensores propuestos para la adquisición de imágenes. Se presenta los escenarios propuestos de vuelos fotogramétricos diseñados con RPAS. Por último, se presentan la georreferenciación tradicional de los vuelos fotogramétricos mediante la utilización de un número limitado de puntos de control en el terreno (GCP).

Dos tipos de plataformas RPAS (ala fija y multirotor) se utilizaron para la adquisición y procesamiento SfM de las imágenes. En el anexo A1.3 se amplía la información sobre las particularidades (ventajas y desventajas) de plataformas, sensores y sistemas autopilotos más comunes para proyectos fotogramétricos con RPAS.

Sistema ala-fija

El equipo utilizado fue el sistema *eBee*™ fabricado por la empresa suiza senseFly. Esta plataforma es una solución diseñada para cubrir áreas relativamente grandes ($> 1 \text{ km}^2$). Tiene 96 cm de envergadura y pesa 700 gr incluidos sensores (figura 32a).

Figura 32. (a) Sistema RPAS *eBee*™ y sensor Canon IXUS 127 HS. (b) Preparación del sistema en zona de despegue. (c) Lanzamiento manual del RPAS, (d) Seguimiento vuelo, equipo de estación en tierra, (e y f) almacenamiento de información para el procesamiento en gabinete.

Cuenta con sistemas de navegación que permiten la georreferenciación directa de la posición de cada imagen en postproceso a partir del fichero de datos recogidos por los sistemas de posicionamiento GPS/GNSS que lleva a bordo. La ejecución del plan de

vuelo, seguimiento y captura fue gestionado por el programa *eMotion*. Dicho programa fue utilizado para el geoetiquetado de imágenes en postproceso.

El sistema está equipado con una cámara RGB adaptada por el fabricante, la Canon IXUS 127 HS (Exif ID: CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456) de tecnología CMOS de 16.1 megapíxeles, operando la captura de imagen en modo automático controlado por el programa *eMotion*. El RPAS se lanza manualmente, por lo cual requiere de un área despejada tanto para despegue como aterrizaje (figura 32c). El sistema se complementa con un ordenador de campo y un sistema de radio control con interfase USB para la visualización de la telemetría en tiempo real (figura 32d y 32e, ordenador portátil con CPU Intel®, procesador Core® i7 de RAM: 15GB). Esta plataforma fue propuesta para la adquisición de imágenes y posterior procesamiento fotogramétrico para áreas mayores a 1 km² como se describirá detalladamente en el capítulo metodológico 5.

Sistema multirotor

Fue utilizada la plataforma multirotor (cuadricóptero, figura 33) Phantom 3 de la compañía DJI™ (Shenzhen, China). Este sistema es el que presenta un mayor número de ventas, así como es el de un mayor uso en aplicaciones fotogramétricas SfM (Singh & Frazier, 2018). La plataforma mencionada fue utilizada para cubrir misiones de respuesta una vez ocurrida una inundación, mediante la adquisición de imagen y video para menores extensiones de superficie (< 1 km²). La instrumentación de este equipo está formada por un sistema compuesto por una cámara digital y un estabilizador de tres ejes. El sistema permite un geoetiquetado automático de imágenes en formato de archivo de imagen intercambiable (Exif) ayuda partir de los datos extraídos de la unidad GPS/GNSS que lleva a bordo. Su peso total es de 1280 g (batería y hélices incluidas) teniendo un tamaño en diagonal de 35 cm sin incluir hélices.

La plataforma tiene una cámara tipo CMOS de 12.4 megapíxeles *Sony Exmor R BSI* (Exif ID: FC300S_3.6_4000x3000) de obturación mecánica. La sensibilidad de la cámara y disparo de la imagen se ajustan automáticamente. Los datos se almacenan en formato *.JPG de 24 bytes. Tiene varias modalidades de video de alta resolución, desde los 2704 ×1520 píxeles (2.7k) hasta 1280x720 píxeles (HD). El programa *Drone Deploy* fue la solución utilizada para controlar las misiones. El sistema requiere de menos área para el aterrizaje y despeje comparado con la solución ala fija. El equipo de vuelo se complementa con un radio control conectado vía USB a una Tableta PC (Sistema operativo Android) que es utilizada para el diseño el plan de vuelo y para la visualización

de la telemetría del vuelo. El uso de multirotor fue propuesto para la adquisición de imágenes y generación de ortomosaicos para áreas inundadas menores a 1 km².

Figura 33. Sistema Phantom 3 Advanced y sensor Sony Exmor de DJI™ en una operación de Aterrizaje/despeje vertical de la plataforma.

Las especificaciones técnicas de ambas plataformas y sus sensores propuestos se resumen en la Tabla 8.

Tabla 10. Resumen especificaciones de las plataformas RPAS y sensores utilizados para la adquisición de imágenes.

Característica	Ala fija	Multirotor (Cuadricóptero)
Plataforma		
Nombre comercial	eBee™ SenseFly	Phantom 3 Advanced
Finalidad	Cartografía	Ocio, fotografía, video
Despegue/ aterrizaje	Despegue: Manual Aterrizaje: Automático sobre el terreno	Despegue y aterrizaje vertical (automático)
Peso (incluidos sensores)	700 gr.	1300 gr.
Altura de crucero	Min.: 60 m	Min.: 20 m
(Min. – Max.)	Max.: 1000 m	Max.: 500 m (para fines de cartografía)
Tiempo max. de vuelo	50 min.	23 min
Radio enlace	3 km	3.5 km
Velocidad de crucero	Min.: 40 km/h Max.: 90 km/h	Min.: 0 km/h Max.: 57 km/h
Sensor		
Modelo de cámara	Canon IXUS 127 HS, sensor CMOS	Cámara con gimbal: Sensor CMOS Sony Exmor R BSI (FC300S) y Video
Resolución	4608 × 3456 (~16 millones de píxeles)	4000 × 3000 (12 millones de píxeles)
Tamaño del sensor	6.16 mm × 4.62 mm	6.32 mm × 4.74 mm
Tamaño del píxel (Tp)	0.00133 mm (1.33 μm)	0.00158 mm (1.58 μm)
Distancia focal	4.3 mm (3308 píxeles)	3.6 mm (2250 píxeles)
Velocidad del obturador	Min.: 15 s Max.: 1/2000 s	Min.: 8 s Max.: 1/8000 s
Posicionamiento	L1 GPS/GNSS (coord. X,Y,Z)	L1 GPS/GNSS (coord.. X,Y,Z)
Costo de mercado aprox	10,000 USD (2018)	1,200 USD (2018)

Escenarios propuestos de vuelos fotogramétricos con RPAS

Tres escenarios de vuelos fotogramétricos fueron establecidos para el área de estudio: 2 diseños de vuelos fotogramétricos ejecutados con la plataforma ala fija a diferentes alturas, y un tercer diseño de vuelo orientado al sobrevuelo de zonas inundadas con la plataforma multirotor. Según la revisión de Singh y Frazier (2018), más del 80 % de los estudios examinados, adquieren las imágenes a resoluciones espaciales entre <1 y 50 cm y a alturas de vuelo entre 5 y 250 metros. Por tanto, alturas de vuelo mayores a las referidas son justificables para un mayor cubrimiento de superficie.

El **vuelo 1** cubrió un área de vuelo de 3.52 km² y el del **vuelo 2**, el área máxima de 22.9 km², para alturas constantes de vuelo a 325 a 900 metros respectivamente sobre el punto de despegue. Los detalles del diseño geométrico de los vuelos 1 y 2 se muestran en la Tabla 9. El perímetro de cada vuelo se muestra en la figura 34.

Tabla 11. Diseño de los Vuelos fotogramétricos 1 y 2 para la adquisición de imágenes RPAS.

Parámetro	Vuelo 1	Vuelo 2
Objeto del vuelo	Cubrimiento sector Nororiental	Cubrimiento de toda la cuenca urbana
Plataforma	Resolución media/área mediana.	Resolución baja/área grande.
Datos propuestos	Sistema ala-fija eBee™	Sistema ala-fija eBee™
Altura de vuelo (m)	~ 325	~ 900
Solapamiento frontal (%)	70	70
Solapamiento lateral (%)	80	80
Velocidad de crucero (m/s)	~ 14.0	~ 15.3
Datos del terreno		
Anchura de la zona (m)	1600	3700
Altura de la zona (m)	2200	6200
Área de vuelo (km ²)	3.52	22.94
Datos de la imagen*		
GSD teórico (cm/píxel)	9.83	27.21
Escala de la imagen	1:800	1:2100
Ancho imagen en terreno (m)	452.97	1253.8
Altura imagen en terreno (m)	339.72	940.38
Huella imagen en terreno (ha)	15.4	117.9
Especificaciones del vuelo*		
Fotobase (m)	101.9	282.1
Ratio Altura/Fotobase	1: 3.2	1: 3.2
Imágenes por pasada o línea	17	14
Distancia ente pasadas (m)	90.6	250.8
Nº de pasadas o líneas de vuelo	25	26
Numero de imágenes	425	364
Intervalo entre tomas (s)	7.3	18.4
Duración total vuelo (min.)	52	112
Número de vuelos	3	6
Puntos de control fotogramétrico (de control GCP/de verificación CP)		
N.º GCP/ (Equipo topográfico)	5 (Estación total)	8 (Estación total)
N.º CP/ (Equipo topográfico)	104 (Nivel); 21 (RTK)	69 (RTK)

* Los cálculos necesarios y explicación de cada parámetro de imagen y vuelo se describen en el Anexo A2.

El diseño de las misiones se ejecutó con los programas *eMotion* para los vuelos 1 y 2, y *DroneDeploy* para el vuelo 3. En el anexo A1.3 se amplía detalles del sistema

autopilotos y la oferta de software para la automatización del diseño de vuelos. En el anexo A2, se profundiza el detalle los parámetros de cálculo de la imagen a obtener y diseño teórico de vuelos RPAS. La figura 35 describe gráficamente la altura para cada vuelo fotogramétrico, la huella de imagen y GSD.

Los vuelos 1 y 2 se efectuaron dentro del marco de un proyecto de cartografía humanitaria en el que participó la Universidad de La Guajira (universidad local) en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la empresa especializada en servicios RPAS *EcoExplora SAS* (Open SteetMap Colombia, 2016; Universidad Politécnica de Madrid, 2015, 2016).

Figura 34. Esquema grafico espacial de los vuelos fotogramétricos RPAs 1, 2 y 3 para el caso de estudio.

Figura 35. Altura y GSD para cada escenario: (a) Vuelo 1, (b) Vuelo 2. En rojo se representa la huella de la imagen en terreno. **Nota:** Las dimensiones no son proporcionalmente exactas a las figuras.

El **Vuelo 3**, se corresponde con una serie de levantamientos de imágenes y video de detalle para áreas pequeñas ($< 1 \text{ km}^2$) una vez ocurrido la inundación dentro del área de estudio. Los vuelos se realizaron en la planicie fluvial, en el sector nororiental del área de estudio de baja elevación. Esta zona periurbana ha sido ocupada inapropiadamente y por tanto tienen una alta frecuencia a inundaciones fluviales. El modelo conceptual de escenario de vuelo 3 se describe en la figura 36.

Figura 36. Concepto del Vuelo 3 para el registro posterior a una inundación.

La georreferenciación directa o geoetiquetado de imágenes fue utilizada para el procesamiento SfM para la generación de un ortomosaico. La captura de video para el vuelo 3 con el multirrotor se realizó utilizando la aplicación DJI GO con una secuencia de imágenes de 60 imágenes por segundo. La Tabla 10 presenta las especificaciones para el registro de inundaciones del Vuelo 3.

Tabla 12. Especificaciones Vuelo 3 para el registro de zonas inundadas.

Objeto	Plataforma	Altura/GSD	Solapamiento	Video/fotografía
Detección rápida de áreas inundadas en paisajes periurbanos	Multirotor Phantom 3 Advanced.	60 – 80 m (3 – 4 cm/píxel)	~ 50 – 70 % (frontal y longitudinal)	- Video resolución de 2704 × 1520 píxeles (2.7K) a 60 cuadros/segundo. - Imagen JPG de 12 mega píxeles y 24 bytes.

Los MDEs producto del procesamiento SfM de los vuelos 1 y 2 serán usados como material para la consecución del objetivo (a) de la tesis (evaluación del método de georeferenciación propuesto). Para la consecución del objetivo (b) se emplearán los productos altimétricos obtenidos de los vuelos 1 y 3. En el capítulo 4 de materiales y métodos se describe la forma de utilización de los modelos obtenidos de los vuelos anteriormente propuestos.

Puntos de control en el terreno (GCP).

Se materializaron en el terreno GCPs para los vuelos fotogramétricos 1 y 2, mediante marcas como pintura topográfica (figura 37a), dianas impresas en lona (figura 37b). Además, se utilizaron elementos del paisaje urbano tales como intersecciones, esquinas de andenes/aceras, tapas de alcantarilla o elementos geométricos uniformes que pudieran ser visibles y fácilmente identificables por el operador en varias imágenes (figura 37c). La determinación de la posición de los GCPs se realizó utilizando el marco de referencia espacial del sistema de coordenadas X,Y,Z MAGNA- SIRGAS-Bogotá referido al elipsoide WGS84 (Código EPSG 3116). Las coordenadas X,Y,Z para cada GCPs fueron determinados usando una estación total LEICA TCR 403 (figura 37d), de precisiones posicionales milimétricas según el fabricante ($2 \text{ mm} + 2 \text{ p.p.m} < 0.5 \text{ cm/km}$).

Figura 37. Metodología para la materialización y determinación de los GCPs de los Vuelos 1 y 2: (a) pintura topográfica, (b) dianas en lona, (c) elementos geométricos del paisaje urbano y (d) Estación total **LEICA TCR 403** para la determinación de la ubicación X,Y,Z.

En la figura 38 se muestra la distribución de los GCP fotogramétricos dentro del perímetro del Vuelo 1 y la figura 39 la distribución del Vuelo 2 ejecutados en el área de estudio. La distribución homogénea de los GCP sigue un diseño de vuelo fotogramétrico clásico tripulado.

Figura 38. Ubicación de los puntos de control (GCP) materializados para el vuelo 1.

Figura 39. Ubicación de los puntos de control (GCP) materializados para el vuelo 2.

El número final de GCPs (5 GCP para el vuelo 1 y 8 para el vuelo 2), fue definido por la disponibilidad de equipos topográficos y recursos financieros al momento de ejecutar los vuelos. Además, las condiciones de acceso a zonas altamente vegetadas dentro del delta (manglar) y de seguridad para los topógrafos y los equipos en el terreno, limitaron la materialización de un mayor número de GCP.

Debido a estas restricciones logísticas, se plantea la búsqueda de alternativas metodológicas de georreferenciación para la densificación de los GCP de los vuelos fotogramétricos planteados, siendo este uno de los objetivos centrales de la presente tesis. La propuesta metodológica de georreferenciación indirecta por GCP se expone en el capítulo 4 de materiales y métodos (sección 4.5).

4.3. Programas propuestos para la preparación de datos espaciales, modelado de inundaciones y procesamiento fotogramétrico de imágenes.

En la Tabla 14 se muestra la información general de cada programa utilizado en este estudio, así como su descripción y aplicación. Se distinguen tres tipos de programa empleados: 1) herramientas o módulos S.I.G para la preparación de datos espaciales, 2) programa de modelado espacial hidrológico, y 3) programa auxiliar para la gestión de datos.

Tabla 13. Programa para la gestión de datos geoespaciales y modelado de inundaciones en SIG

Programa	Descripción Módulo	Aplicación
1. ArcGIS® (S.I.G para la reparación datos)		
"Add x,y data"	Agregar datos tabulares que contienen ubicaciones de coordenadas X,Y,Z a un proyecto SIG	Importar archivos *.csv de coordenadas topográficas adquiridas en campo
"Georeferencing"	permite la Georeferenciación de un ráster o vector con ayuda de puntos de control	Georeferenciación del diseño AutoCAD "Plan de alcantarillado"
"Clip"	Herramienta para recortar una imagen o modelo ráster a partir de un polígono vectorial.	Definición de áreas de interés para visualización
"Hillshade"	Crea un relieve sombreado a partir de un ráster de superficie al considerar el ángulo y las sombras de la fuente de iluminación.	Visualización de modelos ráster
"Extract Values to Point"	Extrae como puntos, valores de celda de un ráster en función de un archivo de entrada de puntos *.shp	Análisis de modelo de referencia LiDAR obtenido y corregido.
"Extract Values to Multi Point"	Extrae como puntos, valores de celda de varios ráster en función de un archivo de entrada de puntos *.shp	Extracción de los GCP sintéticos de los modelos RPAS obtenidos.
"Resample"	Cambia la resolución espacial del ráster y establece reglas para agregar o interpolar valores en los nuevos tamaños de píxeles	
"Mosaic to New Raster"	Modulo que permite fusionar conjuntos de modelos o ortoimágenes tipo ráster.	
"Raster calculator"	Crea y ejecuta una sola expresión de Álgebra de mapas utilizando la sintaxis de Python en una interfaz similar a una calculadora.	Aplicación dentro del proceso Generación del modelo LiDAR
"Create TIN"	Crea un conjunto de datos de red irregular triangulada (TIN)	
"TIN to Raster"	Crea un ráster interpolando sus valores de celda desde la elevación del TIN de entrada a la distancia de muestreo especificada.	
2. Gestores de datos espaciales auxiliares (Misceláneo)		
Fugro Viewer™	"Export from las format"; "Filter Config"	Permite exportar archivos con formato LAS a archivos ASCII y 2D o 3D con forma de punto ESRI y elegir cómo se filtrarán los puntos a los archivos exportados.
Aplicativo Magna Sirgas Pro 3.0	"Calculo ondulación Geoidal para Un Archivo de Puntos"	Aplicación que permite manejo estandarizado de coordenadas sobre el territorio colombiano, como el cálculo de la ondulación del geoide bajo modelo nacional "Geocol2004"
Google Earth®	"Importación GPS"	Consulta de imágenes satélites para planificación de actividades, importar archivos *.gpx de equipo GPS (Garmin™). La conversión de datos *.kml de Google Earth a *.gpx se utiliza: https://mygeodata.cloud/converter/kml-to-gpx

Tabla 14. (Continuación Tabla 14) Programa utilizado para la preparación y gestión de datos geoespaciales y modelado de inundaciones en SIG

Programa	Descripción	Aplicación
3. Modelación espacial hidrológica		
GRASS GIS © “r.lake.xy”	<p>Módulo hidrológico espacial (Mitasova & Neteler, 2004; Nartiss, 2015), este llena un MDE para un nivel de agua (H) dado en punto determinado. Las salidas son: un mapa ráster profundidades, el cálculo del área (A) y volumen inundado (V). Para ejecutar el módulo se requiere los siguientes 3 parámetros de entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ “dem=name”: modelo ráster en formato *.tif. ▪ “xy=east,north” = Ingresar coordenadas X,Y del punto de llenado. ▪ “wl=float”: Valor de elevación del nivel de agua H (absoluto), o cota de agua en el punto de llenado en metros sobre el nivel de mar (m.s.n.m). Este se define como: $H = Z + h$; donde (Z) es la elevación del terreno en el modelo y (h) la profundidad de la columna de agua en el mismo punto. 	Aplicación a los modelos de referencia y a los obtenidos por RPAS en la estimación de la amenaza de inundación

Soluciones propuestas para el procesamiento SfM de imágenes adquiridas con RPAS.

En el presente estudio se propone el uso de los códigos de procesamiento SfM de imágenes de mayor uso comercial según la revisión de programas en el anexo A1.4: La figura 40 muestra las interfases graficas para las dos soluciones de procesamiento SfM propuestas: Agisoft® Professional v.1.1.2 (40a) y Pix4Dmapper® Pro v.4.1.23 (40b) (Agisoft LLC, 2013; Pix4D SA, 2017). En el anexo A1.4 se presenta un listado ampliado de programas de fotogrametría SfM comerciales o gratuitos para el procesamiento de imágenes con RPAS y referencias en la literatura especializada.

La solución Pix4Dmapper ha sido desarrollado por la empresa suiza Pix4D, centrada en aplicaciones RPAS. Puede incorporar GCP en el flujo de trabajo. Revisiones bibliográficas de literatura especializada de Singh et al. (2018) y Fawcett (2019), confirman que estos dos paquetes son los más utilizados y son los que cuentan con más referencias en las metodologías para aplicaciones RPAS, en especial el programa PhotoScan, justificándose así su elección como soluciones avanzadas para el procesamiento de imágenes SfM.

Figura 40. Interfaces gráficas de las soluciones de procesamiento SfM propuestas: (a) AgisoftPhotoScan y (b) Pix4D.

Ambos paquetes comerciales utilizan algoritmos de procesamiento similares de tipo “propietario” o modificados similares al algoritmo de visión artificial *Scale-invariant Feature Transform* (SIFT), ampliamente utilizado para detección automática de puntos de características comunes entre imágenes o puntos de enlace (Lowe, 2004). El ajuste en bloque para ambos programas se da partir de los puntos de enlace identificados, el geotiquetado de imágenes como datos iniciales mediante un proceso iterativo de optimización por ajuste de mínimos cuadrados en el que son calculados los parámetros de orientación exterior de la escena. A partir del geotiquetado de imágenes los parámetros intrínsecos iniciales de la cámara, las coordenadas aproximadas de los centros

de las imágenes y altitud de vuelo se realiza el proceso de orientación externa preliminar del bloque de imágenes. De esta forma, se obtiene una nube de puntos dispersa georreferenciada, sobre la que se optimiza la orientación y autocalibración de la cámara utilizando los GCP (georreferenciación absoluta). Posteriormente se densifica la nube dispersa de puntos mediante algoritmos personalizados de reconstrucción por correlación de píxeles *Multi-view Stereo Matchig* (MVS, Fabio Remondino et al., 2014). La Tabla 11 presenta los flujos de trabajo comparados para el procesamiento de las imágenes con los dos programas considerados.

Tabla 15. Parámetros (comandos) para el flujo de trabajo SfM en PhotoScan y Pix4Dmapper^a.

PhotoScan	Pix4Dmapper
Paso 1.	
<i>Align photos</i>	<i>Initial processing</i>
Accuracy	Keypoint image scale
Pair selection	Matching image pairs
Paso 2.	
<i>Build dense Cloud</i>	<i>Point cloud densification</i>
Quality	Point density
Deep filtering	Minimum number of matched
Paso 3.	
<i>Classifying dense cloud points</i>	<i>Point cloud classification</i>
Cell size (m)	
Max distance (m)	
Max angle (deg)	
Paso 4.	
<i>Build mesh</i> [superficie o terreno]	<i>Raster DSM</i>
Build DEM ← [de la malla de superficie]	Additional outputs
Build DEM ← [de la malla de terreno]	<i>Raster DTM</i>

^a Nota: Los parámetros se mantuvieron en el inglés original para evitar errores de interpretación durante su traducción.

Básicamente, ambas cadenas de procesamiento se dividen en cuatro pasos diferenciados: procesamiento inicial (generación puntos de enlace y ajuste de haces), densificación de la nube dispersa, clasificación de la nube densa y generación de modelos de superficie y terreno. Esta cadena de procesamiento de imágenes es descrita conceptualmente con mayor detalle en el anexo A1.4.

El equipo informático utilizado (CPU) para el procesamiento de las imágenes fue un Intel® Core™ i7-6700 HQ @2.60GHz y RAM: 32GB con una unidad gráfica de procesamiento (GPU) Intel® HD Graphics 530.

4.4. Análisis de los modelos de referencia y procesamiento fotogramétrico SfM.

Esta sección se enfoca en el análisis de la información geoespacial existente, específicamente a los datos geoespaciales altimétricos disponibles como modelos generados a partir de la nube de puntos de LiDAR aéreo, el modelo de elevaciones utilizado en estudios locales de inundaciones de topografía convencional (Topo). Además del procesamiento para la obtención de modelos por la técnica fotogrametría SfM. El objetivo de esta sección es preparar los modelos ráster de referencia altimétrica, detallar el procesamiento SfM para obtención de modelos derivados de imágenes RPAS y analizar preliminarmente su aplicación en estudios de inundación. Esta sección se divide en 4 apartados: **i)** generación modelo ráster LiDAR y corrección altimétrica, **ii)** análisis de inundaciones entre modelos de referencia LiDAR y derivado de topografía convencional, **iii)** procesamiento SfM para generación de modelos derivados de imágenes RPAS y **iv)** análisis preliminar de los modelos RPAS en la estimación de la amenaza de inundación.

Generación modelo ráster LiDAR y corrección altimétrica.

El objetivo de este apartado es la generación de modelos digitales tipo ráster de referencia a partir de la nube de puntos LiDAR disponible y la utilización de datos de elevación verdad-terreno puntuales para el ajuste altimétrico del modelo ráster a utilizar para la evaluación de los modelos RPAS.

En una primera etapa se ha seguido el procedimiento propuesto de la figura 41 para la generación del modelo ráster de elevaciones (MDT). Los módulos SIG utilizados para el procesamiento de datos geoespaciales han sido descritos en la sección 4.3. El procedimiento se describe como sigue:

- i) Desde un gestor de datos LiDAR (FugroViewer™ 2.0) se exportan los ficheros de extensión *.las a formato ESRI Shapefile *.shp seleccionando la clase 8 “*Model Key Point*” que representa el terreno clasificado e incluyendo la opción de retorno de punto único (“*single point returns*”).
- ii) Se genera una superficie tridimensional de la nube de puntos *.shp del terreno mediante interpolación basada en una malla irregular de triángulos (TIN) con el módulo “*Create TIN*” de ArcScene™ Esri®.
- iii) Se rasteriza la malla TIN con “*TIN to Raster*” para un 1 metro de resolución espacial.

- iv) Los dos ficheros LiDAR se unen con la herramienta “*Mosaic to New Raster*”, obteniendo finalmente el modelo ráster con de referencia altimétrica elipsoidal.

Para la obtención del modelo LiDAR de superficie (MDS), se ejecuta el mismo procedimiento de la figura 41, salvo en el tercer paso, en el que se exportan todas las categorías clasificadas de la nube de puntos densa.

Figura 41. Procedimiento propuesto para la generación del modelo de referencia LiDAR

En la figura 42 se muestra el procedimiento propuesto en dos pasos para la transformación de alturas elipsoidales (Paso 1, figura 42a) de los modelos LiDAR tipo ráster anteriormente generados a alturas ortométricas y su corrección altimétrica definitiva (Paso 2, figura 42b).

Figura 42. Tratamiento efectuado para la corrección de altura (Z) para el LiDAR ráster generado: (a) Transformación a alturas ortométricas (H). Corrección en altimetría (minimización de error).

Paso 1: La transformación a alturas ortométricas H' viene dada por:

$$H' = h' - N \quad \text{Ec. 4}$$

Donde h' es la altura elipsoidal del LiDAR y N es la ondulación geoidal (Pérez et al. 2012), dato desconocido y que es calculado mediante interpolación TIN de una cuadrícula de puntos del modelo geoide local. Para el cálculo de la ondulación N se proponen los siguientes pasos:

- i) Se genera una malla regular de coordenadas geográficas sobre el área de interés (archivo *.csv),
- ii) Se asignan los valores de ondulación N al archivo *.csv en la aplicación "MAGNA SIRGAS PRO 3.0" (IGAC, 2010), que contiene el geoide oficial para Colombia "GeoCol2004" (Sánchez 2003).
- iii) Utilizando un SIG (ArcMap™ Esri®) se rasteriza la malla de puntos N (coordenadas planas) con los módulos "Create TIN" y "TIN to raster".
- iv) Se reemuestra del ráster N a una resolución de 1 m mediante el módulo "Resample".

- v) Se realiza la transformación a alturas ortométricas (nivel medio del mar) del modelo LiDAR generado aplicando la ecuación 4 con la ayuda del módulo “*Raster Calculator*”.

Paso 2: Los ajustes posteriores en altimetría para el ráster LiDAR generado fueron realizados usando un conjunto de observaciones disponibles ($n = 17$) de elevación (Z) medidas con topografía clásica, consideradas como verdad-terreno descritos en la sección 4.1 de datos existentes de referencia altimétrica. Con el fin de verificar si existen diferencias (ΔZ) significativas entre el conjunto de observaciones verdad-terreno y el modelo LiDAR (verificación del error sistemático), se realizó una prueba t-Student para medias de muestras emparejadas. Los valores Z del modelo LiDAR fueron determinados con el módulo “*Extract Values to Points*” de ArcMap™ Esri®. Las correcciones finales en altimetría se realizaron con el fin de establecer las elevaciones del modelo LiDAR lo más coherente posible respecto al conjunto de observaciones utilizado como perfil topográfico de referencia. Asumiendo que la traslación vertical de la corrección de elevación (error) es ΔZ , esta cantidad es mejor cuanto menor resulte la suma cuadrática $\sum(\Delta Z)^2$ entre las elevaciones del modelo LiDAR y el perfil de los puntos considerados verdad-terreno (Wang et al., 2019). El sistema de referencia utilizado es el MAGNA-SIRGAS-Bogotá (WGS84, Código EPSG 3116).

Análisis de inundaciones entre modelos de referencia LiDAR y derivado de topografía convencional.

El propósito de esta sección es describir el análisis comparativo espacial entre los diferentes modelos digitales del terreno de referencia disponible dentro del área de estudio para justificar la selección de uno como superficie de referencia altimétrica. Los modelos a comparar son el modelo ráster obtenido a partir de la nube de puntos del LiDAR aéreo disponible, y el modelo ráster empleado en las simulaciones hidrodinámicas con MODCEL, generado por métodos de topografía convencional y *krigging* geoestadístico. Los modelos se compararon topográficamente por medio de perfiles ($n = 17$, Sec 4.6.1.) y por las estimaciones de área/volumen inundado en cada subcuenca considerada tomando el evento extremo adoptado (TR 84 años). La herramienta de modelado hidrológico utilizada para estimar el área y volumen inundado fue *r.lake.xy* de GRASS-GIS.

La elevación del punto de llenado (Z) del modelo se encuentra en la zona topográficamente más baja (centro de celda) del modelo. La profundidad de la inundación

(h) se obtuvo a partir de simulaciones hidrodinámicas con MODCEL ©. En la Tabla 16 se presentan los parámetros de entrada para *r.lake.xy*, tales como: 1) elevación de inundación $H (Z + h)$, 2) punto de llenado y 3) modelos analizados (LiDAR y topografía convencional).

Tabla 16. Entrada de datos para el cálculo de área y volumen inundado con *r.lake.xy*: Punto de llenado (X,Y) y nivel de llenado $H (Z + h)$ para los modelos LiDAR y de topografía convencional (Topo).

Subcuenca (Celda)	Punto de llenado (Centro de celda) *		Elevación Z (m s. n. m.)*		Nivel de inundación H (m s. n. m.)	
	X (m)	Y (m)	LiDAR	Topo	LiDAR	Topo
704	1128199.44	1769511.49	0.32	0.31	1.54	1.53
705	1128253.26	1769130.90	1.03	1.37	1.32	1.66
703	1128285.75	1768827.45	0.22	0.27	2.00	2.05
603	1128259.87	1768547.10	0.22	1.42	1.85	3.05
506	1127979.47	1768163.34	2.03	3.27	3.15	4.39

* El centro de celda es la ubicación horizontal del punto en la zona más baja en los MDT considerados para cada subcuenca. **Valores de elevaciones ortométricas en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) extraídos para cada modelo con el módulo S.I.G “*Extract Values to Multi Point*”.

Para evaluar la similitud entre volumen y área inundada para cada modelo se utilizó el índice Bray-Curtis, método de normalización de la similitud entre dos conjuntos de datos (Teknomo, 2015), según la ecuación 5:

$$\text{Indice Similitud } d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|}{\sum_{k=1}^n (x_{ik} + x_{jk})} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde x_i y x_j representan las variables a comparar. Para el caso de estudio, estas variables se corresponden con el volumen (V) y el área (A) inundada. Los valores del índice de similitud de Bray-Curtis oscilan entre cero (0) y uno (1); donde 0 representa valores exactos similares y 1 absolutamente diferentes.

Procesamiento SfM para generación de modelos derivados de imágenes RPAS

Este apartado tiene como propósito describir la configuración del procesamiento fotogramétrico de las imágenes obtenidas con RPAS usando como asistente de procesamiento el programa especializado SfM para la generación de modelos de superficie y terreno. Se proponen dos estrategias de procesamiento:

- Programa **PhotoScan**, aplicando un procesamiento semiautomático.
- Programa **Pix4D**, aplicando un proceso totalmente automatizado.

La justificación sobre la elección de los programas de procesamiento SfM se encuentra en la sección 4.3 del capítulo 4 (materiales y medios). La aplicación de ambas soluciones se ejecuta sobre el mismo conjunto de imágenes geoetiquetadas obtenidas con RPAS y para los mismos GCPs. No se realizaron eliminaciones manuales de puntos de

enlace anómalos durante la generación de la nube dispersa de puntos y el etiquetado de los puntos de control se realizó de forma manual con la asistencia del programa SfM. El geotiquetado de las imágenes adquiridas fue utilizado en ambas soluciones como parámetros iniciales de orientación externa de las cámaras. La configuración del procesamiento SfM para ambas soluciones propuestas se describen en la Tabla 17.

Tabla 17. Configuración del procesamiento SfM para la generación de modelos de superficie y terreno.

PhotoScan* (semiautomatico)		Pix4Dmapper (automatico)	
Parámetro	Valor seleccionado	Parameter	Valor seleccionado
Align photos		Initial processing	
Accuracy	“High”	Keypoint image scale	“Full”
Pair selection	“Reference”	Matching image pairs	“Aerial Grid or Corridor”
Build dense Cloud		Point cloud densification	
Quality	“Medium”	Point density	“Optimal”
Deep filtering	“Mild”	Minimum number of matched	“3”
Classifying dense cloud points	“Ground points”	Point cloud classification	“Classify Point Cloud”
Cell size (m)	“40”	-	-
Max distance (m)	“0.3”	-	-
Max angle (deg)	“5”	-	-
Build mesh		-	-
Source type	“Height field (2.5D)”	-	-
Point classes		-	-
[Malla de superficie]	“Created (Never classified)”	-	-
[Malla de terreno]	“Ground”	-	-
Build DEM ← [from surface mesh]		Raster DSM	
Source data	“mesh”	Method	“Inv. Dist. Weighting”
Interpolation	“Enable (default)”	DSM filters	[Todos seleccionados]
Resolution	[Valor por defecto]	Resolution	“Automatic” [1×GSD]
Build DEM ← [from terrain mesh]		Additional outputs	
Source data	“mesh”	Raster DTM ⁴	[Seleccionado]
Interpolation	“Enable (default)”	Resolution	“Automatic” [5×GSD]
Resolution	[Valor por defecto]		
Build Orthomosaic		DSM and Orthomosaic	
Pixel size (m)	[Valor por defecto]	Resolution	“Automatic” [1×GSD]

* Esta cadena de procesamiento fue aplicada para las imágenes adquiridas con los vuelos 1 y 2 (sección 4.3.).

El proceso de generación de modelos de superficie y terreno en cada una de las estrategias de procesamiento consideradas fue el siguiente:

PhotoScan. El flujo de trabajo seguido fue el protocolo propuesto por Agisoft (Agisoft LLC, 2013):

- PhotoScan calcula la información de profundidad para cada cámara a partir de las posiciones estimadas. La combinación de los mapas de profundidad de las distintas cámaras permite determinar la nube de puntos densos (Agisoft LLC, 2016). Durante del procesado se eliminaron los puntos correspondientes a cuerpos de agua en la nube densa.
- Posteriormente se procede a clasificar los puntos del terreno utilizando un algoritmo de clasificación adaptativo desarrollado por Axelsson (2000). La figura 43a presenta el enfoque de clasificación utilizado. Este algoritmo

divide los datos en cuadrículas (“*cell size*”) en las que, primero se crea un modelo TIN temporal del terreno con los puntos más bajos de cada cuadrícula, y segundo, se densifica con nuevos puntos calculando parámetros tales como: distancia (“*max distance*”) y ángulos verticales (“*max angle*”) con respecto a dicho TIN. El proceso se repite hasta que los puntos de terreno se clasifiquen ajustando los parámetros según el criterio del operador.

- iii. Los modelos se rasterizarán a partir de las nubes de puntos clasificadas.

Pix4Dmapper: El flujo de trabajo seguido fue el protocolo propuesto por el propio programa (Pix4D SA, 2017):

- i. El primer paso implica la utilización un algoritmo iterativo completamente automático para el ajuste SfM y la generación de la nube dispersa de puntos.
- ii. En el segundo paso se aplica un algoritmo personalizado de correlación de vista múltiple MVS para la densificación de la nube dispersa generada en el primer paso.
- iii. Posteriormente se realiza una interpolación tipo IDW para la generación del modelo de superficie y terreno. La generación del modelo del terreno es completamente automatizada con la herramienta “*Classify Point Cloud*”. La clasificación de la nube densa e identificación del suelo desnudo (suelo desnudo o terreno, figura 43b) se basa en un algoritmo propio de aprendizaje automático (“*machine learning*”) según las características geométricas y cromáticas de los puntos (Becker et al. 2018; Remondino and Golkar 2019). La principal desventaja de estos algoritmos es que el usuario no tiene control previo en el entrenamiento en el proceso de clasificación de la nube densa de puntos (aprendizaje no supervisado).

Figura 43. Métodos para la clasificación del terreno utilizados: (a) PhotoScan: Proceso Algoritmo adaptativo TIN (Fuente: Vasi et al. 2014), (b) Pix4D: Escena nube de puntos clasificada en varias categorías por un algoritmo propietario basado en aprendizaje de máquina. (Fuente: Becker et al. 2018).

Análisis preliminar de los modelos RPAS en la estimación de la amenaza de inundación.

El objeto de esta subsección es realizar un análisis preliminar para evaluar la aplicación de los productos geoespaciales del procesamiento fotogramétrico SfM (ortomosaicos y MDS) de imágenes RPAS en el análisis local de la amenaza de inundación. En consecuencia, se proponen dos pruebas específicas:

La primera consiste en la comparación entre MDS derivados de imágenes RPAS y datos LiDAR. Para esta prueba se analizó la subcuenca urbana, la celda 704 con una superficie de 32.2 ha. La elección de esta subcuenca se justifica por la recurrencia de inundaciones pluvio-fluviales dada su proximidad al delta del río Ranchería en el sector nororiental de la ciudad. El MDS a utilizar es el producto fotogramétrico del diseño del vuelo 1 y la georreferenciación indirecta por los 5 GCP físicos determinados. La configuración de la cadena de procesamiento SfM para la obtención del MDS preliminar se muestra en la Tabla 17. La estimación de la inundación se hizo con módulo SIG “*r.lake.xy*” del paquete GRASS-GIS, para la profundidad simulada con MODCEL del evento extremo de 84 años de tasa de retorno. El modelo ráster de superficie LiDAR (2008) ajustado altimétricamente se establece como referente de comparación, asumiéndose estable en el tiempo para el análisis. Los resultados de la aplicación de *r.lake.xy* sobre cada modelo digital fueron:

- i) Mapas de profundidad y tabulados
- ii) El área (m^2) de inundación.
- iii) El volumen inundado (m^3)
- iv) La profundidad media (m)

Con el fin de comparar los MDS de RPAS y LiDAR, se ha procedido a generar mapas producto de la diferencia entre modelos utilizando la calculadora ráster en un SIG (“*raster calculator*” de ArcMap). Se han calculado distintos estadísticos descriptivos para cada MDS obtenido con RPAS, el LIDAR de referencia y el modelo de diferencias entre ambos (media, desviación estándar valores máximo y mínimos). Para determinar la similitud de las estimaciones de área y volumen entre los modelos LiDAR y RPA, se ha propuesto del índice de Bray-curtis (Ecuación 5).

La segunda prueba consiste en una comparación entre el ráster de profundidades de inundación generado a partir del MDS RPAS obtenido, con las imágenes panorámicas

(oblicuas) y el ortomosaico generados una vez ocurrido un evento específico de inundación. Las imágenes son capturadas aplicando el diseño del vuelo 3 ocurrido el evento de inundación. La Tabla 18 describe el detalle de la captura durante el evento de inundación considerado.

Tabla 18. Eventos de inundación registrados mediante la ejecución del Vuelo 3.

Fecha	Plataforma	Plano	Comentario
2016/17/02	Ala fija	Nadir	Ortomosaico producto del procesamiento SfM del Vuelo 1 sin inundación en la zona.
2017/14/05	Multirotor	Nadir	Ortomosaico generado con 1231 imágenes geoetiquetadas, GSD de 4.4 cm/pix (100 m. alt), 1.15 km ² para la una fuerte inundación fluvial
2017/14/05	Multirotor	Oblicuo	Captura de imágenes oblicuas enfocada al área inundada (figura 35).
2017/28/06	Multirotor	Nadir	Ortomosaico generado con 1160 imágenes geoetiquetadas, GSD de 6.2 cm/pix (140 m. alt) para un área de 1.3 km ² . El área inundada es mínima.
2018/13/10	Multirotor	Oblicuo	Video sobre el área inundada para una fuerte inundación (Anexo A3)
2018/29/10	Multirotor	Oblicuo	Ortomosaico generado con 12073 imágenes geoetiquetadas, GSD de 3 cm/pix (80 m. alt) para un área de 0.68 km ² . El área inundada es mínima (Anexo A3)

El área sobrevolada con el RPAS multirotor (entre 0.6 a 1.3 km²), es el sector indicado por la figura 44a referido a un sector periurbano del delta del área de estudio. Se midió una profundidad de referencia en campo para el evento de inundación pluvio-fluvial ocurrido el día 13 de octubre de 2018 en la zona más baja de la profundidad de inundación con mira topografía (figura 44b). La profundidad de inundación con mira topografía se ha medido en 86 cm (figura 44c).

La representación espacial (mapa de profundidades *.tif) y estimaciones del área inundada fueron calculadas con el módulo *r.lake.xy*. Para la comparación de los ráster de profundidades y ortoimágenes, estos se visualizaron en S.I.G. con la ayuda ArcScene™ y ArcMap™ de Esri®.

Figura 44. Procedimiento para la determinación de la ubicación y profundidad de inundación para el evento de inundación fluvial el día 2018/10/13: (a) Sector de Villa Fátima donde se aplica el diseño del Vuelo 3, (b) determinación de la ubicación aproximada punto de llenado con GPS métrico (Garmin Datoka 10) cm y (c) determinación de la profundidad de inundación con mira topografía.

4.5. Método de georeferenciación propuesto: Puntos de control GCP sintéticos para el procesamiento SfM y generación de modelos RPAS.

La georeferenciación de un proyecto fotogramétrico por puntos de control en el terreno (GCP) es la opción más utilizada y de mayor fiabilidad tanto en fotogrametría RPAS como en plataformas tripuladas. Este control fotogramétrico posicional permiten anclar los modelos de elevación generados a las coordenadas del sistema de referencia utilizado, así como establecer restricción al proceso de ajuste de haces, siempre y cuando las coordenadas de dichos puntos sean precisos y suficientes (Fawcett, 2019; M. R. James et al., 2017). En esta sección se propone un procedimiento alternativo de georeferenciación para un proyecto fotogramétrico RPAS mediante el aumento de GCP no físicos o de origen sintético que surge de las brechas de conocimiento identificadas en la revisión de literatura de la sección 2.5. Esta propuesta metodológica de georeferenciación alternativa es aplicada para la generación de modelos de los vuelos RPAS fotogramétricos 1 y 2. La figura 45 describe la propuesta metodológica en dos pasos, basada en información altimétrica existente y procesamiento de imágenes SfM.

La propuesta incluye los siguientes pasos (1 y 2):

1. Generación de un ortomosaico georeferenciado para ser utilizado posteriormente como entrada de datos planimétricos en la extracción de coordenadas X,Y de los puntos de control sintéticos.

Para la generación y corrección geométrica del ortomosaico se propone la configuración de procesamiento SfM para Pix4D y la utilización de GCP físicos de precisión milimétrica determinados con estación total. La resolución espacial para los ortomosaicos de los vuelos se estableció por defecto, sugerido del programa SfM Pix4D ($1 \times \text{GSD}$).

2. Identificación manual de los GCP sintéticos y asignación de coordenadas X,Y,Z .

Para ello se propone la utilización de un S.I.G. para localizar elementos de fácil identificación sobre el ortomosaico obtenido en la fase anterior situados sobre el suelo despejado. Se propone la ayuda de un modelo ráster en vista de relieve sombreado o “*hillshade*” tal como sugiere James et al. (2006).

Los puntos de control a seleccionar deben caracterizarse por estar ubicados en terreno llano y despejado, ser reconocibles por el operador en varias imágenes y permanecer altimétricamente estables durante el período comprendido entre la captura del modelo de referencia y los vuelos RPAS. Los valores de elevación Z

de los puntos de control sintéticos se extraerán de los modelos de referencia para cada punto de control (X,Y) geoetiquetado. La asignación del valor de elevación Z a cada punto de control se realizará con el módulo S.I.G. “*Extract Values to Multi Point*” de ArcGIS® (opción “*Interpolate values at the point locations*”).

El número final de puntos de control sintéticos definitivos con coordenadas X,Y,Z conocidas y distribuidas para cada uno de los vuelos (1 y 2) considerado fue de 13 (figuras 46 y 47); este valor está cerca al recomendado sugerido por la literatura especializada de 15 puntos de control (Agüera-Vega et al., 2017; Coveney & Roberts, 2017). Por último, estos puntos de control son utilizados para el procesamiento SfM final de las imágenes RPAS y la obtención de los modelos de superficie y terreno.

Figura 45. Metodología general de dos pasos para la determinación de puntos de control sintéticos a partir de modelos de referencia disponibles.

Figura 46. Modelos ráster de referencia altimétrica (mostrada en relieve sombreado) y puntos sintéticos de control distribuidos ($n = 13$): (a) Modelo LiDAR del terreno (1m) para el vuelo 1; (b) Modelo basado en topografía convencional (5m) para el vuelo 2.

Figura 47. Distribución puntos de control sintéticos definitivos para el procesamiento SfM de imágenes adquiridas con RPAS: (a) vuelo 1 y (b) vuelo 2.

Evaluación de precisión de los modelos RPAS generados.

Para evaluar los modelos derivados del procesamiento SfM de los vuelos RPAS 1 y 2 aplicando el método propuesto de georreferenciación, se propone utilizar observaciones de alta precisión. Estas observaciones son llamados puntos de verificación o *check points* (CP). La utilización de estos datos independientes o “verdad-terreno” se hace con el objeto de verificar la precisión altimétrica de los modelos digitales producto del procesamiento fotogramétrico SfM de las imágenes adquiridas. Las coordenadas de los CPs fueron determinadas con instrumentación topográfica de un orden de precisión mayor a la esperada en los modelos finales. Para todos los vuelos, el número de CP fue superior a 20, atendiendo la recomendación de Abdullah (2019). La ubicación de estos puntos de control fue realizada dentro del área de vuelo, en zonas donde se asume con menos probabilidad la existencia de posibles errores en la modelización, principalmente intersecciones de carreteras o calles.

Para evaluar la precisión de los modelos derivados del vuelo 1, se emplearon observaciones ($n = 104$), obtenidos a partir de una nivelación geométrica, para la que se suponen un rango de precisión milimétrico. Estos datos provienen de un proyecto de

reemplazo de tuberías de alcantarillado (2018) cedidos en formato CAD por la oficina local planeación urbana (Secretaría de Planeación - Distrito de Riohacha, 2018). El archivo CAD (*.dwg) con elevaciones (Z) y ubicación horizontal (X,Y) para cada pozo de inspección, fue transformado a un archivo de puntos *.shp (ArcMap de ArcGIS). La distribución los de los CPs basados en topografía convencional para el vuelo 1 se muestran en la figura 48 (Puntos rojos). La utilización de los datos se justifica por ser una fuente de información altimétrica independiente y de alta precisión respecto a la esperada en los MDS y MDT a generar con el vuelo 1.

Figura 48. Distribución de los puntos de verificación (CP) usados como verdad-terreno para el vuelo 1. Los puntos rojos están basados en nivelación geométrica y los puntos grises en GPS/GNSS RTK.

Para el vuelo 2, los CPs ($n = 69$) fueron determinados con un equipo TOPCON GR-5 GNSS (base + rover) en modo cinemático (RTK, figura 49a) de precisión de 10 mm + 0.8 ppm, bajo condiciones ideales según el fabricante (< 3 cm/km). La figura 49b muestra la puesta en marcha de la base 1 dentro del área de estudio. En la figura 49c y 49d se expone un ejemplo de la toma de CPs con el equipo propuesto. La distribución de los CPs se muestra en la figura 50.

Figura 49. Equipo utilizado para la determinación de las coordenadas de los CPs del vuelo 2. (a) Equipo Topcon GR-5 RTK GNSS, (b) instalación base sobre punto de coordenadas conocidas, (c) y (d) toma de puntos en modo RTK con rover móvil colectora de datos Topcon FC 2500.

Figura 50. Distribución de los puntos de verificación (CP) usados como verdad-terreno para el vuelo 2 determinados con GPS/GNSS RTK.

Para completar una distribución homogénea de los GCP, sobre todo dentro del perímetro del vuelo 1, fueron utilizados 21 CPs determinados con el equipo GPS RTK Topcon GR-5. La localización de estos puntos se muestra en figura 48 en color gris.

Respecto a las precisiones de los instrumentos, los datos proporcionados por levantamientos GPS diferencial o en modo RTK pueden llegar un nivel de precisión similar a una estación total, dependiendo de la cantidad de tiempo de observación y el modo de levantamiento estático de registro continuo (mayor precisión) o cinemático (Bangen et al., 2014; Wiseman & van der Sluijs, 2019). Sin embargo, la precisión de los datos por posicionamiento GPS/GNSS está sujeta al número de satélites utilizados, además de interferencias entre Base y Rover. A diferencia de los levantamientos con estación total, los receptores GPS/GNSS no requieren de línea de visión directa entre el instrumento (base) y punto de levantamiento (Rover); siendo estos más útiles para cubrir mayores superficies (Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, 2016).

Finalmente, los datos de elevación y los obtenidos del GPS/GNSS RTK utilizado, son de una precisión mayor respecto a la esperada en los modelos fotogramétricos a generar. Por tanto, sus mediciones pueden ser consideradas como verdad-terreno, justificando así su elección para la evaluación de la precisión de los modelos a obtener mediante procesamiento fotogramétrico de imágenes de los vuelos RPAS diseñados.

Los modelos ráster de referencia LiDAR y de topografía convencional, también se incluyen dentro de la evaluación de precisión altimétrica con el objetivo de verificar sus precisiones como superficie de control. Los puntos de verificación se asumen como una fuente independiente tipo “verdad-terreno” para el cálculo de estadísticas del error (ΔZ) entre el valor observado del punto de verificación (Z_j) y el estimado en los modelos (Z_k) generados por las soluciones de procesamiento SfM propuestas. El valor de elevación Z_k de los modelos se determina en la misma ubicación horizontal del archivo vectorial *.shp de puntos de verificación Z_j con ayuda del módulo S.I.G. “*Extract Values to Multi Point*”.

Se proponen dos estadísticos para evaluar la precisión de los modelos considerados según la función de distribución de los errores: raíz del error cuadrático medio (*Root mean squared error* RMSE) y Desviación Absoluta Mediana Normalizada (*Normalized median absolute deviation* NMAD).

RMSE es una métrica de dispersión comúnmente usada para evaluar la precisión en los MDS obtenidos con RPAS desde el supuesto de que el conjunto de errores $\{\Delta Z\}$ se distribuyen normalmente, en áreas abiertas no propensas a valores atípicos y se expresa según la ecuación 6 (Abdullah, 2019; Abdullah et al., 2015):

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i)^2 \right]} \quad \text{Ec. 6}$$

NMAD es una medida de precisión de modelos basada en estimadores robustos, se determina según la ecuación 7 (Höhle et al. 2009):

$$NMAD = 1.4826 \cdot \text{mediana}_i(|\Delta Z_i - m_{\Delta Z}|) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde ΔZ_i son los errores individuales y $m_{\Delta Z}$ es la mediana de los errores. Por tanto, NMAD es proporcional a la mediana de las diferencias absolutas entre los errores y la mediana del error. Es una medida de precisión que no requiere un conocimiento *a priori* de la función de distribución de errores (Zazo et al., 2018) y es especialmente útil en terrenos no abiertos o construidos, propensos a la presencia de valores atípicos (Höhle & Höhle, 2009).

Fueron calculados estadísticos básicos para ΔZ (media, desviación estándar y mediana), junto con diagramas de cajas e histogramas para observar la distribución de los errores de los modelos obtenidos. Para decidir sobre el uso del estimador de precisión más apropiado, se realizaron pruebas de normalidad de las distribuciones de los errores (ΔZ) según la prueba de Shapiro-Wilk como siguieron en otros estudios RPAS (Gašparović, Seletković, Berta, & Balenović, 2017).

Con el fin de comparar el comportamiento del procesamiento fotogramétrico SfM utilizando puntos de control sintéticos respecto otros estudios RPAS, se propone determinar la relación entre el error estimado en los modelos (RMSE-NMAD) y el GSD obtenido (Eltner et al., 2016; M.R. James et al., 2019). Este error relativo se determina mediante el ratio entre la precisión estimada y GSD (píxel), y es un criterio generalizado en la literatura RPAS. Este ratio varía en el intervalo de 1 a 3 veces el GSD para modelos correctamente reconstruidos (Nex & Remondino, 2014; Ruzgiene et al., 2015). Por ejemplo, asumiendo una precisión del modelo de referencia LiDAR ≤ 20 cm y un GSD de 10.3 cm/píxel, la precisión absoluta esperada (RMSE) para los modelos obtenidos debería estar en el intervalo de 20.6 – 30.9 cm, es decir, en términos relativos, de 2 a 3 veces el GSD. De igual forma, los rangos de precisión esperados por el estimador robusto NMAD se asumen estarían dados por las precisiones reportadas según Bühler et al. (2015) y Zazo et al. (2018), es decir, en el rango de 11.5 – 23.7 cm (1.1 – 2.3 veces el GSD).

4.6. Aplicación de modelos RPAS para estimar la amenaza de inundación.

Para evaluar el potencial de aplicación de los modelos del terreno derivados de RPAS, se propone analizar el efecto hipotético del evento de inundación pluvial de TR 84 años simulado con MODCEL utilizando el MDT, es decir, el producto altimétrico según la estrategia de clasificación adoptada en la cadena de procesamiento SfM. Para este objetivo se empleó el módulo S.I.G. de análisis espacial hidrológico *r.lake.xy*, estimando la amenaza de inundación en función del área y volumen. Los datos de entrada para el módulo *r.lake.xy* de GRASS-GIS son (Tabla 19):

- 1) El modelo de terreno RPAS para cada subcuenca producto del procesamiento SfM del vuelo 1 (Agisoft, Pix4D);
- 2) La elevación H (m) de inundación calculada a partir de las profundidades existentes h simuladas con MODCEL; y
- 3) La ubicación horizontal (X,Y) del punto de llenado considerado para cada subcuenca.

Producto del análisis espacial de inundación se obtiene: el volumen (V , m^3), el área (A , m^2) y, un mapa ráster de profundidades (h , en metros).

Tabla 19. Entrada de datos para el cálculo de área y volumen inundado con *r.lake.xy*: Punto de llenado (X,Y) y nivel de llenado H ($Z + h$) para los modelos LiDAR y RPAS (Pix4D y PhotoScan).

Subcuenca	Punto de llenado Centro de celda*		Elevación (Z) (m s. n. m.) **			Nivel de inundación H (m s. n. m.) *		
	X (m)	Y (m)	LiDAR	Pix4D	PhotoScan	LiDAR	PhotoScan	Pix4D
704	1128199.838	1769510.14	0.26	0.58	0.13	1.48	1.35	1.80
705	1128253.263	1769130.90	1.03	0.99	0.50	1.32	0.79	1.28
703	1128282.439	1768885.99	0.09	0.24	-0.04	1.87	1.74	2.02
603	1128259.871	1768547.10	0.22	-0.39	0.38	1.85	2.01	1.63
506	1127979.473	1768163.34	2.03	2.66	1.98	3.15	3.10	3.78

* El centro de celda es la ubicación horizontal del punto en la zona más baja en los MDT considerados para cada subcuenca. **Valores de elevaciones ortométricas en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) extraídos para cada modelo con el módulo S.I.G “*Extract Values to Multi Point*”.

Debido a que el módulo *r.lake.xy* no implica ninguna simulación del proceso físico de inundación (p. ej. cálculo del vector de velocidad), la elección del modelo “no-físico” se justifica bajo la suposición de que los factores dinámicos a estimar, tales como velocidad no son relevantes para las subcuencas analizadas dada su configuración plana y de escasa pendiente.

Análisis de volumen y área inundada entre modelos RPAS y referencia LiDAR.

Para esta sección se propone considerar el modelo del terreno RPAS resultante del procesamiento SfM del vuelo 1, ya que su diseño fue concebido para ser comparado con el modelo de referencia a escala de detalle disponible tipo LiDAR. Se proponen dos criterios como métricas para evaluar el desempeño de los modelos derivados de RPAS con respecto al modelo de referencia. El primer criterio se basa en la comparación del cálculo de volumen y el área inundada para las profundidades simuladas en MODCEL con el evento extremo histórico de TR 84 años para las 5 subcuencas bajo estudio. El segundo criterio se basa en la similitud de las curvas de acumulación de las estimaciones de volumen y de área inundada. Los criterios considerados son los siguientes:

Criterio 1: Diferencias porcentuales (errores) en el área y el volumen (V_{DIF} , A_{DIF}), de acuerdo con las ecuaciones 8 y 9 respectivamente sugeridas por Laks et al. (2017):

$$V_{DIF} = \frac{|V_{PhotoScan, Pix4D} - V_{LiDAR}|}{V_{LiDAR}} 100 \% \quad \text{Ec. 8}$$

$$A_{DIF} = \frac{|A_{PhotoScan, Pix4D} - A_{LiDAR}|}{A_{LiDAR}} 100 \% \quad \text{Ec. 9}$$

Criterio 2: Similitud de áreas y volúmenes acumulados progresivamente respecto a la referencia LiDAR. El volumen (V) y el área (A) se calculan para 10 profundidades (h) de llenado, para el caso en el que la inundación se incrementa progresivamente en intervalos similares hasta alcanzar la profundidad máxima del evento TR de 84 años en cada modelo. Los 10 valores de (A) y (V) calculados para cada modelo RPAS se comparan con los estimados con modelo LiDAR de referencia mediante el índice propuesto de Bray-Curtis (Ecuación 5).

CAPÍTULO 5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de la ejecución de la metodología e interpretación de los resultados obtenidos respecto a la base actual del conocimiento, y presentar la importancia de las contribuciones logradas en la tesis.

El capítulo se compone de tres secciones relacionadas con la metodología planteada. La primera sección (5.1.) aborda los resultados sobre el procesamiento fotogramétrico de imágenes RPAS y la aplicabilidad de sus productos preliminares en dos pruebas de áreas pequeñas. En la segunda (5.2), se presenta los resultados de la propuesta metodológica de control fotogramétrico y su contribución en el procesamiento SfM de imágenes RPAS. Por último (5.3), se presentan los resultados de la aplicación de los modelos obtenidos del procesamiento SfM y método propuesto para la estimación de la amenaza de inundación. Al final de cada una de las tres secciones anteriormente descrita, se discuten los resultados obtenidos.

5.1. Procesamiento SfM de imágenes RPAS y análisis preliminar en la estimación de la amenaza.

Generación modelo ráster de referencia LiDAR y corrección altimétrica

En la figura 51, se observan los modelos ráster MDS y MDT (figuras 51a y 51b respectivamente) obtenidos a partir de los datos LiDAR disponibles. La figura 52 muestra un acercamiento de detalle dentro de la subcuenca 704.

Figura 51. Modelos LiDAR ráster generados (iluminación de sombreado): (a) modelo digital de superficie y (b) modelo digital del terreno. En rojo se indican las subcuencas bajo estudio. El polígono negro representa el acercamiento de la figura 51.

Figura 52. Detalle de los modelos LiDAR generados para el acercamiento de la figura 51: (a) Imagen satelital (World-View 2 de 0.5 m, 2009), (b) modelo de superficie y (c) modelo del terreno.

Como puede observarse, los resultados de los ráster LiDAR (1 m) obtenidos parecen indicar que reflejan apropiadamente la topografía del paisaje urbano tanto construido como el terreno completamente desnudo. Visualmente, los datos LiDAR MDS (figura 52b) son coherentes con la realidad observada en la imagen satelital de la figura 52a. Esto es congruente con las comparaciones realizadas en la literatura especializada (Leitão et al., 2016).

En la figura 53 se presenta el geoide (N) usado para la transformación de alturas elipsoidales a ortométricas de los ráster LiDAR. Los valores negativos de N significan que existe una deficiencia local de masas, es decir, el geoide está por debajo del elipsoide de referencia (WGS84). Se muestran también las observaciones ($n = 17$) ortométricas (Z) utilizadas para la corrección altimétrica final de los ráster LiDAR generados.

Figura 53. Salida visual del modelo del geoide y las 17 observaciones de alturas (Z) ortométricas para la corrección final de los ráster LiDAR generados.

La transformación a alturas ortométricas del modelo LiDAR revela que existe un error (ΔZ) o diferencia media de 0.63 m por debajo para las 17 observaciones verdad-terreno en el eje de las abscisas de la figura 54. Esto significa una desviación altimétrica importante respecto al terreno real que debe ser corregida en el modelo LiDAR a generar. Lo anterior significa que el uso del modelo N local genera un error sistemático altimétrico de 0.63 m entre el terreno real y modelo LIDAR.

Figura 54. Perfil de comparación valores de elevación Z observados y los extraídos del modelo ráster LiDAR sin corrección altimétrica ($n = 17$). En la izquierda se muestra el diagrama de cajas del error ΔZ del modelo LiDAR respecto a los datos verdad-terreno.

En la Tabla 20 se presentan los resultados de la prueba *t-student* realizada para los 17 datos de elevación con el fin de confirmar si el error de 0.63 m es sistemático o aleatorio.

Tabla 20. Prueba *t-student* para medias de muestras de elevación entre elevaciones Z observadas y LiDAR para 17 puntos de elevación.

Parámetro	Observaciones Z (verdad-terreno)	LiDAR Z (Elevación estimada modelo)
Media $\bar{X}$ (m)	3.43	2.80
Varianza S^2 (m)	6.56	6.55
Coefficiente r de correlación de Pearson	0.998	
Diferencia hipotética de las medias ΔZ (m)	0.63	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	-0.063	
Valor p^*	0.475	

*Si el valor $p \geq \alpha$ (nivel significancia = 0.05) $\rightarrow$ no hay diferencias significativas entre las medias poblacionales.

El valor p de la Tabla 20 es mucho mayor al nivel de significancia 0.05, lo que indica que no hay diferencias significativas entre las observaciones y modelo LiDAR si la diferencia hipotética media $\bar{X}$ entre ambos es de 0.63 m. Esto significa que el error ΔZ de 0.63 m es sistemático, por tanto, puede ser utilizado para corregir (minimizar) las diferencias altimétricas entre modelo LiDAR y las observaciones verdad-terreno (James

et al. 2019). En la figura 55 se confirma que el error ΔZ de 0.63 m es el que minimiza la desviación entre el conjunto de datos verdad-terreno y los extraídos del modelo LiDAR ($n = 17$).

Figura 55. Error ΔZ obtenido a minimizar en el ráster LiDAR preliminar para su corrección final altimétrica respecto a las observaciones “verdad-terreno” utilizadas ($n = 17$).

Verificado el tipo de error (sistemático) y cuantificado, se procedió sumar el valor de 0.63 m al ráster LiDAR (modulo “Raster calculator”) obteniendo finalmente los modelos ajustados a las observaciones verdad-terreno. En la figura 56 se observa la corrección altimétrica en el modelo LiDAR para los 17 puntos de verdad-terreno propuestos (eje de las abscisas).

Figura 56. Comparativa entre el modelo LiDAR sin y con corrección altimétrica respecto a los puntos asumidos como verdad-terreno ($n = 17$): (a) Perfil de elevación Z y (b) Diagrama de cajas para el error ΔZ (Generado con BoxPlotR, 2014).

Finalmente, la figura 57 muestra las salidas gráficas de los modelos ráster definitivos del LiDAR (superficie y terreno) a usar como referencia altimétrica.

Figura 57. Modelos raster de referencia LiDAR generados y ajustados altimétricamente: (a) modelo digital de superficie y (b) modelo digital del terreno (sin elementos naturales y artificiales).

En esta sección han presentado los resultados de la aplicación del método propuesto para la generación del modelo LiDAR y su corrección altimétrica. Los ráster LiDAR MSD y MDT fueron generados exitosamente, la transformación a alturas ortométricas evidenció un error sistemático notable que fue minimizado con observaciones locales. Se puede concluir que el modelo LiDAR corregido es otra fuente de datos geospaciales de tipo altimétrico para el caso de estudio. Por tanto, se incluye el modelo generado tales como superficie de referencia local altimétrica junto con otras fuentes disponibles como el modelo basado en topografía convencional (Topo).

Análisis de inundaciones entre modelos de LiDAR y topografía convencional (Topo).

En la figura 58 se muestra el perfil de comparación del modelo del terreno LiDAR corregido respecto al modelo topográfico convencional (topo). Según la figura, el modelo Topo se encuentra ligeramente por encima del terreno (12.1 cm de error medio), mientras que el modelo LiDAR corregido es más coherente si es comparado con el perfil de los puntos verdad-terreno. Además, el modelo Topo se desvía de forma considerable por encima de los puntos verdad-terreno a partir de los puntos que se encuentran en zonas de baja elevación donde se prestan las obras hidráulicas de evacuación de la escorrentía pluvial urbana al río (del 11 al 17 en el eje de las abscisas). Los puntos del modelo Topo

de las zonas bajas están sobre las subcuencas 704 y 706 como se muestra en la figura 59 donde se aprecian los MDT Topo y LiDAR.

Figura 58. Comparación entre verdad-terreno ($n=17$) y MDT derivados de LiDAR y topografía convencional (Topo). Izquierda, perfil de elevación absoluta (Z), derecha diagrama de cajas de error (ΔZ).

Visualmente hay aparentes diferencias entre los modelos, la resolución espacial del LiDAR de 1 m comparado con el modelo Topo de 5 m, explicarían las discrepancias identificadas. En la figura 59, el MDT LiDAR muestra una clara definición del tejido urbano sobre el terreno como calles y vías en comparación del MDT Topo que carece de la definición de dichos detalles propios del paisaje urbano. La figura 60 representa el modelo de diferencias entre LiDAR y el derivado de topografía convencional. Las áreas con fuertes discrepancias, mostradas en color amarillo a rojo (0.84 – 4.8 m), no ocupan una superficie considerable en el mapa; se destacan las diferencias observadas en la subcuenca 603, que representa un humedal intervenido y altamente urbanizado. Las diferencias menos marcadas en color azul (< 84 cm), ocupan la mayor parte, siendo 37 cm la diferencia media entre ambos modelos.

Figura 59. Modelos de elevaciones (terreno) ráster y observaciones verdad-terreno (n = 17) utilizadas para la corrección de los datos LiDAR. (a) modelo derivado de topografía convencional (5 m) y (b) obtenido de datos LiDAR (1 m).

Figura 60. Modelo ráster de diferencias entre los modelos derivados de datos LiDAR y de topografía convencional.

Zonas concretas donde aparecen grandes diferencias, como en la subcuenca 603 y zonas bajas de evacuación hacia el río, pueden ser explicadas por la presencia de vegetación considerable lo que dificulta la capacidad de captura de las variaciones en el terreno sobre todo en el modelo topográfico (Topo). En calles, avenidas y demás zonas abiertas, no se muestran diferencias marcadas, sugiriendo coherencia altimétrica en ambos modelos, sobre todo en zonas altas. Aunque se observa que el modelo Topo sobreestima las elevaciones en zonas más bajas.

Según los resultados de las comparaciones altimétricas y de resolución espacial, ambos modelos analizados difieren entre sí, aunque no acusadamente. Con respecto a detalle y representación de la realidad, el modelo Topo se puede definir como conceptual, muy moderado para detectar elementos característicos del paisaje urbano. Mientras en el caso del LiDAR, el nivel de detalle es superior, pues la captura masiva información por esta tecnología geomática, permite una mayor discretización de la realidad, confirmando ser la tecnología referente de generación de información altimétrica según a literatura.

En la figura 61 se presentan los resultados de las estimaciones de la representación espacial de inundación con el módulo *r.lake.xy* para las profundidades alcanzadas del evento extremo de un TR de 84 años. Se observa que la inundación es mucho mayor si se utiliza el modelo topográfico en comparación del modelo LiDAR.

La Tabla 21 describe los valores de similitud para el cálculo de la inundación en función del área y volumen por subcuenca y modelo considerado. La profundidad promedio (*h*) para el modelo topográfico es mucho mayor frente al LiDAR, el cual presenta una estimación mucho más conservadora (81 cm y 58 cm respectivamente).

Tabla 21. Área y volumen inundado para el cálculo de Índice de Similitud Bray-Curtis entre estimaciones de inundación de los modelos LiDAR y de topografía convencional (Topo).

Subcuenca	Área (m ²)				Volumen (m ³)			
	Topo	LiDAR			Topo	LiDAR		
	x_i	x_j	$ x_i - x_j $	$(x_i + x_j)$	x_i	x_j	$ x_i - x_j $	$(x_i + x_j)$
704	200,425	176,579	23,846	377,004	63,599	78,402	14,803	142,002
705	67,525	16,682	50,843	84,207	19,264	4,065	15,199	23,329
703	18,700	16,434	2,266	35,134	13,720	16,075	2,355	29,795
603	244,000	155,268	88,732	399,268	335,552	114,339	221,213	449,891
506	58,600	7,878	46,597	62,353	48,879	7,312	37,083	51,707
Total (Σ)	585,125	372,841	212,284	957,966	476,530	215,471	295,376	692,001
Índice Similitud*	0.22				0.43			

* Interpretación Índice de similitud (distancia) de Bray-Curtis (Ecuación 5). La puntuación de similitud perfecta es 0, mientras que 1 es absolutamente diferente (peor).

Topo (704)
 $V = 63,599 \text{ m}^3$; $A = 200,425 \text{ m}^2$; $h = 0.32 \text{ m}$

LiDAR (704)
 $V = 78,402 \text{ m}^3$; $A = 176,579 \text{ m}^2$; $h = 0.44 \text{ m}$

Topo (705)
 $V = 19,264 \text{ m}^3$; $A = 67,525 \text{ m}^2$; $h = 0.29 \text{ m}$

LiDAR (705)
 $V = 4,065 \text{ m}^3$; $A = 16,682 \text{ m}^2$; $h = 0.24 \text{ m}$

Topo (703)
 $V = 13,720 \text{ m}^3$; $A = 18,700 \text{ m}^2$; $h = 0.73 \text{ m}$

LiDAR (703)
 $V = 16,075 \text{ m}^3$; $A = 16,434 \text{ m}^2$; $h = 0.98 \text{ m}$

Topo (603)
 $V = 335,552 \text{ m}^3$; $A = 244,000 \text{ m}^2$; $h = 1.38 \text{ m}$

LiDAR (603)
 $V = 114,339 \text{ m}^3$; $A = 155,268 \text{ m}^2$; $h = 0.74 \text{ m}$

Topo (506)
 $V = 48,879 \text{ m}^3$; $A = 58,600 \text{ m}^2$; $h = 0.83 \text{ m}$

LiDAR (506)
 $V = 7,312 \text{ m}^3$; $A = 7,878 \text{ m}^2$; $h = 0.93 \text{ m}$

Figura 61. Salidas gráficas de la estimación de volumen (V), área (A) inundado y profundidad promedio (h) de los modelos de referencia LiDAR y topografía convencional (Topo).

El índice revela que en términos de área inundada los modelos no difieren tan marcadamente como las que se observan en términos de volumen. Es evidente que ambos modelos estiman diferente la inundación, lo anterior puede explicarse debido a las diferencias en cuanto al nivel de detalle, método de obtención y precisión altimétrica de ambos modelos (el modelo topográfico está ligeramente por encima del terreno real). Lo anterior explicaría que mientras el modelo topográfico (Topo) parece sobredimensionar la inundación, el modelo LiDAR la subestima para los mismos datos de profundidad del evento considerado de TR 85 años.

Según los mapas de inundación, el modelo topográfico derivado del diseño del plan de alcantarillado local, no captura suficientemente el entramado urbano, debido a que no posee el mismo detalle para discretizar el territorio como si lo hace la tecnología geomática de LiDAR aéreo aplicado en la zona. Los datos de topografía convencional tienen un detalle razonable cuando existe una adquisición de puntos suficientes para permitir la generación de un modelo representativo del terreno a modelar (Schumann et al. 2008). Para el caso de estudio, la densidad de puntos explicaría las diferencias halladas entre modelos a la hora de representar la estimación de la inundación. La densidad media en puntos/km² es de 650.000 para LiDAR, frente a los 686 del modelo derivado de topografía convencional.

Estos resultados sugieren que de la selección y origen del modelo digital depende la respuesta de la estimación de la amenaza de inundación y los supuestos empleados de modelación (Li & Wong, 2010). A nivel conceptual, como en el caso de la modelación hecha para toda la cuenca urbana con MODCEL (Nardini & Miguez, 2016), el modelo topográfico fue suficiente para el estudio de alternativas de solución con un enfoque de sistema (de Oliveira et al., 2019). Sin embargo, si se requiere un nivel de detalle mayor, la literatura sugiere que tecnologías geoespaciales como el LiDAR ofrece una mejor solución para describir particularidades del paisaje urbano (calles avenidas) determinantes en la dispersión de la inundación (Leitão et al., 2016).

En conclusión, las diferencias de resolución espacial, altimétricas, así como de estimación de la amenaza inundación, explicaría las diferencias observadas entre ambos modelos. Debido que el LiDAR es actualmente la tecnología más confiable y precisa para modelado espacial de la inundación a escala de detalle (Wedajo, 2017), los resultados aquí obtenidos parecen confirmar la tendencia en la literatura. Luego teniendo en cuenta el objetivo de modelar inundaciones con el mayor detalle posible en zonas urbanas, se

justifica la selección del modelo LiDAR sobre el de topografía convencional como superficie de referencia altimétrica.

Análisis preliminar entre modelos LiDAR y RPAS para inundaciones urbanas.

El GSD final obtenido del procesamiento SfM (programa Pix4D) fue de 10.35 cm/píxel para una resolución espacial del MDS de 10.35 cm ($1 \times \text{GSD}$). Según la literatura especializada (Yao et al, 2019), el GSD de 10 cm/píxel es el límite máximo considerado como toma de datos de ultra alta definición. Una evaluación visual de la figura 62 permite inferir que en general el MDS de tipo LIDAR y RPAS son similares. Sin embargo, cuando se efectúa un acercamiento de detalle (polígono rojo), se observan diferencias importantes. El modelo LIDAR posee menos ruido y bordes más definidos de los edificios que el modelo RPAS. Diferencias en la presencia de elementos cambiantes sobre el terreno como edificaciones (flecha roja), se explican debido a que los modelos tienen fechas de captura diferentes (2008 LiDAR, 2016 RPAS). Otras diferencias no menos importantes pueden deberse principalmente a cambios físicos sobre el terreno, como puede ser la presencia vegetación urbana y automóviles durante la adquisición.

Figura 62. Modelos digitales de superficie (MDS) en vista de relieve sombreado (subcuenca 704) según la fuente de datos: LiDAR disponible (izquierda) y levantamientos de imágenes del Vuelo 1 (derecha). Abajo se muestra el detalle indicado por el polígono rojo. La ortoimagen de (15 cm resolución) proviene del Instituto geográfico IGAC (vuelo tripulado a 800 metros del año 2007).

La figura 63 superior describe los MDS de la subcuenca de estudio 704 en el cual se observa visualmente la coherencia altimétrica entre ambos modelos a nivel general. Se demarca claramente la presencia de calles y avenidas en zonas de menor elevación denotado en azules. Elevaciones más altas de manzanas y edificios se representan en tonos amarillos a rojos.

Figura 63. MDS para el modelo LiDAR y RPAS en la subcuenca 704. Abajo se muestra el modelo de diferencia calculado de restar el MDS RPAS del LiDAR.

La figura 63 inferior, muestra el modelo de diferencias resultado de sustraer el modelo LiDAR del modelo RPAS para la subcuenca. Este último modelo revela cambios significativos sobre el terreno como edificaciones, representados en tonos rojos y amarillo, entre el tiempo de las adquisiciones LiDAR y RPAS (2008 y 2016 respectivamente). Para el resto del modelo de diferencias, estas corresponden principalmente a cambios en la vegetación e inconsistencias en la reconstrucción de los contornos de edificios que aparecen en tono amarillo. Estas diferencias pueden ser explicadas porque la huella de los edificios en el modelo LiDAR es menor que la de modelo obtenido con RPAS, ya que su resolución es menor. Lo cual es consistente con lo expuesto por Kucharczyk & Hugenholtz, (2019).

La Tabla 22 presenta los resultados de los estadísticos descriptivos de elevación para los MDS ráster LiDAR, RPAS y modelo de diferencia. El valor medio $\bar{X}$ de elevación es superior en el modelo RPAS comparado con el modelo LiDAR de referencia. El valor mínimo de elevación en el modelo RPAS confirma lo anterior. Esto significa que el modelo derivado de imágenes RPAS podría estar sobrestimando sistemáticamente los valores de elevación, lo cual puede ser explicado por los errores en la generación de ambos modelos, incluidos la falta de GCP adecuados en mayor número y cobertura.

Tabla 23. Estadísticos descriptivos para los MDS ráster LiDAR, RPAS y modelo de diferencia entre ambos.

Parámetro	Modelo	
	LiDAR (referencia)	RPA (Ala-fija) *
Media $\bar{X}$ (m)	4.36	5.07
Desviación estándar S^2 (m)	3.00	3.24
Valor mínimo, máximo (m)	[- 0.06 – 21,17]	[0.26 – 21.99]

*Con base en los resultados de la ejecución del vuelo 1.

Los mapas de profundidad del evento de TR 84 años fueron generados con el módulo *r.lake.xy* para el modelo LiDAR (referencia) y el derivado de RPAS. Los resultados se presentan en la figura 64.

Figura 64. Mapas de profundidad de inundación (TR 84 años) para el MDS LiDAR de referencia y RPAS. Abajo se muestra la ampliación del polígono rojo junto con las ortoimágenes para el respectivo modelo.

Los resultados muestran que las trayectorias de distribución espacial de la inundación usando el MDS RPAS son similares al LIDAR de referencia, con una tendencia preferencial por calles y avenidas. Una inspección de detalle (polígono rojo y flecha amarilla), muestran a modo de ejemplo, que elementos sobre la superficie del terreno como vegetación y construcciones, pueden influir en el patrón de distribución espacial de la inundación. En la Tabla 23 se muestran los resultados de similitud para las estimaciones de área y volumen inundado en cada MDS considerado.

Tabla 24. Área y volumen inundado para el cálculo de Índice de Similitud Bray-Curtis entre estimaciones de inundación de los MDS LiDAR y RPAS para el evento extremo de 84 años.

Parámetro	Modelo		Índice Similitud (Bray-Curtis) *
	LiDAR	RPA (Ala-fija)	
Volumen (m ³)	31560	30732	0.013
Área (m ²)	61722	63194	0.012
Profundidad h promedio (cm)	49.941	49.791	0.001

* Interpretación Índice de similitud (distancia) de Bray-Curtis (Ecuación 5). La puntuación de similitud perfecta es 0, mientras que 1 es absolutamente diferente (peor).

La estimación de la inundación por parte del modelo RPAS es muy similar comprada con el modelo de referencia LiDAR, esto pese a las evidentes variaciones superficiales y diferencias en cuanto elevación absoluta observada en ambos modelos. Lo anterior sugiere que la reconstrucción fotogramétrica lograda en el MDS de imágenes RPAS, tiene las mismas prestaciones que un modelo generado por técnicas de captura como el LiDAR para la estimación de la amenaza de inundación a escala local. Se confirma que las construcciones y la presencia de considerable de vegetación y de otros elementos (p. ej. automóviles), son críticos en la representación espacial de la amenaza de inundación.

En la figura 65 se muestran los resultados de la comparación visual y estimación del área inundada a partir de un ortomosaico generado a partir de imágenes tomadas durante una inundación (vuelo 3). El ortomosaico producto del procesamiento SfM (figura 65a), se asume como una referencia visual para estimar extensión de la inundación junto con el MDS obtenido del procesamiento imágenes en condiciones sin inundación del vuelo 1. La figura 65b muestra el ortomosaico del evento inundado y la 65c muestra la sobreposición del mapa ráster de profundidades de inundación sobre el ortomosaico de la zona afectada. Se estima que la profundidad h para cubrir aproximadamente la extensión de la inundación del ortomosaico es de 50 cm (punto de llenado indicado por el círculo rojo). El área inundada estimada en la planicie de inundación es 3 ha aproximadamente.

Mediante esta prueba se confirma que es posible la segmentación y evaluación empírica de la extensión de áreas inundables de forma y relativamente rápida a partir de imágenes aéreas derivadas de RPAS y herramientas S.I.G.. Esto es congruente con lo expuesto por Boccardo et al., (2015); Hashemi-Beni et al., (2018) y Murhy, (2019).

Figura 65. Ortomosaicos de eventos de inundación registrados mediante la ejecución del Vuelo 3: (a) zona sin inundación (adquisición del Vuelo 1 con ala fija), (b) sobrevuelo una vez ocurrida la inundación (Vuelo 3 con multirotor), (c) ampliación de la zona inundada y la estimación de la extensión de inundación (azul semitransparente) calculada a partir el MDS del vuelo 1 con r.lake.xy.

En la figura 66, se muestran las imágenes de capturas oblicuas adquiridas mediante el RPAS multirotor. Las estimaciones del área afectada se realizaron con la ayuda del

MDS obtenido a partir del vuelo 1 (ala fija) y la herramienta S.I.G espacial hidrológica *r.lake.xy*. La representación espacial de la inundación (figura 66c, 66d y 66e), se calculan a partir de la profundidad de llenado que más se aproxima visualmente a lo observado en las imágenes oblicuas de referencia (figuras 66a y 66b).

Figura 66. Las imágenes 66a y 66b representan dos eventos de inundación particulares adquiridas con la plataforma multirrotor. La imagen 66c (2017/14/05) y 66d (2018/13/10) son representaciones de la estimación del evento de inundación. La imagen 66e representa la inundación del 2018/13/10 desde desde el punto de vista de la imagen 66b..

En el Anexo A3 se aplica el procedimiento anterior para otras fechas en la misma zona, lo que confirman el uso conjunto de imágenes de inundación e información altimétrica RPAS (MDS) para el cálculo aproximado de áreas de inundación y seguimiento de las mismas. De los anteriores resultados se puede confirmar que las imágenes adquiridas en nadir u oblicuas por RPAS multirrotor son referencias útiles para la estimación empírica de la extensión de inundación con el apoyo de modelos previos derivados RPAS y herramientas de análisis espacial hidrológico en S.I.G.

A partir de los resultados de las dos pruebas preliminares realizadas con el modelo LiDAR de referencia e imágenes (oblicuas/nadir) de áreas inundadas, se puede concluir

que los productos primarios del procesamiento SfM (MDS y ortomosaicos) pueden ser útiles en la estimación de la amenaza de inundación, confirmando la factibilidad de los productos geoespaciales RPAS declarados en la literatura especializada (Coveney & Roberts, 2017; Giordan, Manconi, Remondino, & Nex, 2017).

Discusión de los resultados del procesamiento SfM y análisis preliminar de inundaciones

A continuación, se presenta una discusión sobre el procesamiento SfM de imágenes RPAS y análisis preliminar en la estimación de la amenaza. Los resultados del análisis preliminar muestran que los productos geoespaciales preliminares RPAS (MDS/ortomosaicos e imágenes panorámicas oblicuas), son apropiados para la estimación rápida de la inundación para áreas poco extensas ($< 1 \text{ km}^2$) utilizando herramientas S.I.G. de modelación espacial como *r.lake.xy*.

El producto MDS derivado de RPAS genera estimaciones de inundación similares a los estimados a partir de los MDS LiDAR, pese a la diferencia entre fechas de captura. Las diferencias de la resolución espacial de los MDS RPAS generados y de referencia LiDAR (de 0.51 m y 1 m respectivamente), coloca en evidencia que no tienen un impacto considerable en las estimaciones de inundaciones según el análisis preliminar de similitud de la subcuenca urbana 704. Lo anterior es congruente con los resultados por Coveney y Roberts (2017) para inundaciones fluviales y Leitão et al. (2016) en zonas urbanas.

Por otro lado, la aplicación de la plataforma tipo Multirrotor para la captura de imágenes una vez ocurrida una inundación, demostró ser una herramienta para la detección *in situ* de daños o para el seguimiento de amenazas naturales en zonas urbanizadas. Las imágenes oblicuas y ortomosaicos generados a partir del vuelo multirrotor, en combinación con los MDS obtenidos de un área amplia con ala fija, permitió el modelado espacial de la inundación de forma empírica.

El uso del módulo espacial hidrológico *r.lake.xy*, permitió evaluar la calidad de los modelos basados en RPAS para representar espacialmente la inundación. Los modelos generados aplicando el concepto de adquisición, antes y después del evento de inundación, podrían aplicarse en la implementación de un sistema local de alerta temprana para estimar el volumen inundado y la distribución del agua, según la información topográfica adquirida en vuelos RPAS previos. El módulo de código abierto *r.lake.xy*, utilizado como modelo conceptual de inundación simplificado (Teng et al., 2017), es

eficiente y fácil de usar en términos de uso computacional para propósitos de cartografía de inundaciones; demuestra ser una herramienta útil en la que solo se requiere la extensión máxima de inundación y los niveles de agua, siempre que los factores dinámicos no son relevantes. El módulo *r.lake.xy* tiene un gran potencial para su uso en futuros estudios de modelado de inundaciones en grandes llanuras urbanizadas y la utilización de los MDEs y ortoimágenes generados en la evaluación de daños.

Los resultados obtenidos confirman que se pueden obtener modelos apropiados utilizando métodos fotogramétricos e imágenes de RPAS en situaciones donde el acceso a información geoespacial es un factor limitante. Estos modelos pueden ser fuente de información complementaria para la modelación de inundaciones hidrodinámicas, como sugieren Pérez et al (2018). La principal ventaja de los RPAS son su flexibilidad para adquirir imágenes, confirmado lo sugerido por Leitão et al (2018), especialmente para áreas reducidas ($< 1 \text{ km}^2$), hasta los 7 km^2 , como se muestra en la revisión de literatura de la sección 2.5. Por otro lado, las principales desventajas de la tecnología RPAS incluyen una cobertura de vuelo limitada (por ejemplo, tiempo de vuelo, carga útil y condiciones climáticas) y altos requisitos para el procesamiento de datos. La literatura demuestra que las plataformas tripuladas son las más adecuadas para levantamiento de ámbito nacional o regional, mientras que los RPAS son más adecuadas para una escala de detalle de subcuenca urbana ($< 1:5.000$). Desde el punto de vista del procesamiento de datos, se observó que cuanto mayor sea el área a cubrir del proyecto fotogramétrico RPAS, mayor es el tiempo de procesamiento. Dicho tiempo constituye según Nex y Remondino (2014) aproximadamente el 45 % del flujo de trabajo con RPAS, a diferencia del LiDAR aerotransportado de sensores activos, en el que los datos altimétricos se obtienen automáticamente y en tiempo real.

Con respecto al aspecto económico, en el análisis realizado por Jeunnette y Hart (2016) concluyen que las plataformas pilotadas conducen a un menor costo de operación a partir de 610 m de altura de vuelo. Los RPAS son competitivos en costos, a aproximadamente 305 m de altura de vuelo, valor cercano al utilizado en el vuelo 1 del presente estudio ($\sim 325 \text{ m}$). Yurtseven (2019) confirma lo anterior, sugiriendo alturas de vuelo de 350 m para plataforma ala fija, lo que proporcionaría precisiones verticales razonables y minimizarían el potencial de errores sistemáticos durante el procesamiento inicial de las imágenes tales como el "efecto cuenco" en los modelos de elevación.

Por último, la creciente facilidad operativa de los RPAS civiles, lleva parejo la integración de sus datos con tecnologías geoespaciales, como es el caso de los datos derivados de LiDAR aerotransportado. Sin embargo, las regulaciones de seguridad de la aviación actuales, plantean limitaciones a los esfuerzos de investigación, especialmente porque las regulaciones rara vez mantienen el ritmo del desarrollo tecnológico (Claudia Stöcker et al., 2017). Esto significa que los operadores de vehículos aéreos no tripulados, junto con las autoridades aeronáutica y la industria, necesitan seguir trabajando conjuntamente hacia una mejora y adaptación continua de las regulaciones locales que respondan al desarrollo acelerado de la tecnología RPAS (SESAR, 2018; Claudia Stöcker et al., 2019; Wild et al., 2016). Se espera que las innovaciones en la seguridad de los RPAS permitan que la próxima generación de plataformas totalmente integradas ingrese al espacio aéreo de forma rápida (Altawy & Youssef, 2016).

5.2. Método de georeferenciación propuesto: Puntos de control GCP sintéticos para el procesamiento SfM y generación de modelos RPAS.

A continuación, se describen los resultados de la evaluación de precisión de los modelos obtenidos del procesamiento SfM de imágenes adquiridas del Vuelo 1 (ala-fija) y la propuesta de puntos de control sintéticos extraídos del modelo de referencia LiDAR. El GSD final obtenido para ambas soluciones es de ~ 10.3 cm/píxel.

La figura 67 presenta los diagramas de caja de error ΔZ para cada modelo derivado del procesamiento SfM de imágenes del vuelo 1 utilizando GCP sintéticos derivados del modelo de referencia LiDAR. También se incluye el diagrama de cajas los MDS y MDT LiDAR obtenido y corregido altimétricamente. Como se observa, los errores obtenidos para los modelos fotogramétricos considerados, son mayores a nivel de MDS que de MDT, siendo más altos los errores en el modelo de superficie obtenido con PhotoScan.

Figura 67. Diagramas de caja de error ΔZ para cada modelo derivado del procesamiento SfM de imágenes del vuelo 1 utilizando los GCP sintéticos derivados del modelo LiDAR (puntos de verificación $n = 104$).

Estas diferencias se explican debido al procesamiento inicial SfM de las imágenes. Según los resultados de la Tabla 24, estas se deben a errores de reproyección (en píxeles) durante la reconstrucción de la nube dispersa de puntos (1.97 en PhotoScan vs. 0.19 en Pix4D); y durante la optimización (autocalibración) de los parámetros internos o geometría interna de la cámara en la etapa de procesamiento inicial. El porcentaje de variación de la geometría interna fue mayor en Photoscan (1.90 %) que en Pix4D (0.21 %). Por tanto, es evidente la introducción de un cierto error sistemático en la reconstrucción del MDS obtenido con PhotoScan. Según lo observado en el

procesamiento inicial, Pix4D parece evidenciar un algoritmo de autocalibración más eficiente comparado con PhotoScan para la reconstrucción de la nube de puntos dispersa y calibración de la cámara sin necesidad de intervención del operador. Luego según los resultados, una correcta reconstrucción de la nube dispersa de puntos es crítica para la minimización de errores en los ráster definitivos, especialmente en los MDS.

Tabla 25. Resultados de la configuración de la cadena de procesamiento SfM de imágenes RPAS del Vuelo 1 y los puntos de control sintéticos propuestos a partir del ráster LiDAR de referencia.

PhotoScan (semiautomático)		Pix4Dmapper (automático)	
Parametro	Valor obtenido	Parametro	Valor obtenido
1. Align photos		1. Initial processing	
Error de reproyección (píxel) ¹	1.97	Error de reproyección (píxel) ¹	0.19
Precisión punto de control (píxel) ²	0.16	Precisión punto de control (píxel) ²	0.65
Optimización cámara (%) ³	1.90	Optimización cámara (%) ³	0.21
Nube dispersa (punto/m ²)	0.04	Nube dispersa (punto/m ²)	0.12
2. Build dense Cloud		2. Point cloud densification	
Nube densa (puntos/m ²)	6.4	Nube densa (puntos/m ²)	6.6
3. Classifying dense cloud points		3. Point cloud classification	
Nube puntos terreno (puntos/m ²)	2.09	Nube puntos terreno (puntos/m ²)	3.51
4. Build DEM ← [malla de superficie]		4. Raster DSM	
Resolution	40.84 × 40.84 cm	Resolution	10.35 × 10.35 cm
5. Build DEM ← [malla del terreno]		5. Raster DTM	
Resolution	40.83 × 40.83 cm	Resolution	51.73 × 51.73 cm

¹ indicador de calidad utilizado para la reconstrucción de puntos 3D durante el ajuste del bloque SfM del bloque de imágenes; valores ≤ 1 píxel son mejores. ² indicador de calidad (en píxel eles) del punto de control etiquetado manualmente en las imágenes (valor medio para 13 puntos de control); los valores de píxel eles ≤ 1 son mejor (el error es menor que el GSD). ³ diferencia relativa (%) entre los valores iniciales y optimizados de los parámetros internos de la cámara (distancia focal, píxel), los valores más bajos son mejores.

La figura 68 muestra los histogramas de la distribución de errores $\{\Delta Z\}$ para las mediciones en los modelos (MDS y MDT) comparados con los puntos de verificación utilizados ($n = 104$) para el diseño del Vuelo 1. Se ajustó una curva de distribución gaussiana (superpuesta en rojo) obtenida de la estimación de error medio y varianza para comparar visualmente si los errores siguen una distribución normal.

El valor absoluto del error ΔZ medio para los modelos considerados es inferior a 10 cm, a excepción del modelo de superficie obtenido con PhotoScan, que es de 16.5 cm. El signo del valor medio indica si los modelos están por encima o debajo de los puntos verdad-terreno considerados. Por encima se encuentran los MDS LiDAR y PhotoScan, por debajo, el MDS Pix4D y todos los MDT considerados.

Las pruebas de normalidad (*Shapiro-Wilk*) indican que los errores no siguen una distribución normal (excepto para el modelo de terreno PhotoScan). Lo anterior significa que los estimadores de precisión basados en la normalidad de los errores como es el RMSE, no son adecuados para el presente caso de estudio, desarrollado en zonas urbanas altamente propensas a la presencia de valores atípicos. Por ende, el uso del RMSE sobreestimaría la precisión medida en los modelos. Por tanto, la métrica RMSE se

mantiene solo para fines comparativos con estudios similares. Basado en lo anterior, se justifica la estimación de precisión de los modelos RPAS basados en métodos robustos como es el NMAD.

Figura 68. Histograma de los valores de error ΔZ para cada modelo generado del Vuelo 1 con puntos de control sintéticos basados en LIDAR (puntos de verificación $n = 103$). En el histograma se superponen las curvas de distribución normal esperadas con media y RMSE estimadas a partir de todos los datos (rojo). Se muestran los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk (si valor $p \geq 0.05$, ΔZ se distribuye normalmente).

Los resultados de la Tabla 25 muestran las precisiones calculadas por ambos estimadores para cada modelo obtenido de la cadena de procesamiento SfM y la referencia LiDAR.

Tabla 26. Evaluación de la precisión de modelos derivados del Vuelo 1 y puntos de control LiDAR (puntos de verificación $n = 104$).

Estimador de precisión según distribución de los errores { ΔZ }:	MDS			MDT		
	LiDAR	PhotoScan	Pix4D	LiDAR	PhotoScan	Pix4D
Normal						
Media $\bar{X}$ (m)	0.010	0.165	-0.080	-0.089	-0.073	-0.093
Desviación estándar S^2 (m)	0.373	0.433	0.284	0.166	0.219	0.262
RMSE ¹ (m)	0.371	0.462	0.294	0.187	0.230	0.277
RMSE:GSD ² (ratio)	-	4.5	2.9	-	2.2	2.7
No-normal (método robusto)						
Mediana (m)	0.125	0.172	0.142	0.123	0.131	0.135
NMAD ³ (m)	0.185	0.255	0.211	0.181	0.185	0.200
NMAD:GSD ² (ratio)	-	2.5	2.0	-	1.8	1.9

¹ Root mean square error RMSE. ² GSD (tamaño del píxel proyectado ground sample distance: 10.3 cm/ píxel). ³ Normalized median absolute deviation NMAD.

La mediana de los errores obtenidos para todos los modelos considerados está entre 10 y 20 cm. Al igual que para el cálculo del error medio, la mediana más alta se alcanza para el MDS de PhotoScan. Para las estimaciones de precisión con el estimador NMAD,

los valores obtenidos son similares para todos los modelos, aunque ligeramente superiores para los MDS. Debido a la subestimación del error medio y sobredimensionamiento del RMSE, los valores obtenidos por estimadores robustos (NMAD) confirman ser más adecuados para la estimación de la precisión de los productos altimétricos derivados de RPAS en áreas urbanizadas, por tanto, su uso es preferible a los estimadores estándar (RMSE). Además, el estimador NMAD como método no paramétrico, ofrece la ventaja de no requerir conocimiento previo ni supuestos acerca de la distribución de los errores $\{\Delta Z\}$. La figura 69 compara los valores absolutos y relativos de la precisión esperada de cada modelo de RPAS con la referencia estándar LiDAR.

Figura 69. Precisión (absoluta y relativa) de los modelos derivados del Vuelo 1 y referencia LiDAR (número de puntos de verificación = 104). Las precisiones relativas como el ratio RMSE:GSD y NMAD:GSD se muestran entre paréntesis. Los estándares de precisión USGS/ASPRS (izquierda), así como la precisión esperada (derecha), se muestran como líneas discontinuas horizontales.

Con respecto a los MDS, la precisión de PhotoScan es inferior a Pix4D, pero cerca del rango esperado. Para los MDT las precisiones obtenidas son similares, destacando que el producto de PhotoScan alcanza precisiones cercanas al LiDAR de referencia. Los ratios de precisión se encuentran dentro del rango esperado ($\sim 2 \times \text{GSD}$), al igual que las precisiones absolutas (en negrilla), muy próximas a las observadas en el modelo de referencia LiDAR. Una evaluación adicional de la precisión de los modelos con los $n = 21$ puntos de verificación RTK, revela un ratio de precisión en promedio 2 veces el GSD entre ambas soluciones fotogramétricas. Las precisiones con respecto a MDT pueden explicarse principalmente debido a las diferencias en interacción del operador con el programa SfM en la etapa de clasificación y edición de la nube densa.

Como se esperaba, el modelo de referencia LiDAR ofrece una precisión altimétrica de 18 cm, esta evaluación confirma la sospecha de que dichos datos se encuentran dentro del estándar de precisión “media” según la ASPRS/USGS (≤ 20 cm en RMSE). Además,

esta precisión es similar a la evaluación empírica efectuada por Hodgson et al. (2004) y Schumann et al. (2008) para un conjunto de datos de LiDAR aéreo de características similares al utilizado en el presente estudio. Por tanto, los resultados de precisión del modelo de referencia LiDAR con datos externos justifican la metodología trazada para la generación y su corrección altimétrica del modelo ráster. En función de los resultados de precisión obtenidos de los modelos del Vuelo 1 en comparación con los esperados, se demuestra que el método propuesto de georreferenciación fotogramétrica por puntos de control sintéticos basados en LiDAR es válido para la obtención de MDS y MDT a partir de procesamiento SfM de imágenes.

Resultados diferentes a los anteriormente descritos fueron encontrados cuando es utilizada una superficie de referencia altimétrica de menor resolución espacial como superficie de control altimétrico. En la Tabla 26 se muestran los resultados de la evaluación de precisión (absoluta y relativa) de los modelos producto del procesamiento SfM de las imágenes del Vuelo 2 y puntos de control ($n = 13$) sintéticos extraídos del modelo obtenido por topografía convencional (Topo) de 5 m de resolución espacial. La precisión del modelo Topo se determinó en 48 cm, valor dentro de lo esperado por debajo de 1 m. En todos los modelos RPAS obtenidos las precisiones absolutas (NMAD) son en promedio el doble de la precisión observada para el modelo Topo. Las precisiones obtenidas en los MDS y MDT RPAS son ligeramente diferentes entre sí, variando de 4 a 5 cm. El MDT para el caso de Pix4D mejora su precisión, mientras que empeora obtenido con PhotoScan. Lo anterior significa que la intervención del operario en la clasificación semiautomática del terreno aplicada para el Vuelo 2 no tuvo efectos considerables sobre la precisión de los modelos en comparación con los modelos del Vuelo 1.

Tabla 27. Evaluación de la precisión de modelos derivados del Vuelo 2 y puntos de control ($n = 13$) extraídos del modelo basado en topografía convencional (Topo) (Puntos de verificación $n = 69$).

Estimador de precisión de los errores $\{\Delta Z\}$:	MDS			MDT	
	PhotoScan	Pix4D	Topo	PhotoScan	Pix4D
Mediana (m)	0.63	0.60	0.32	0.67	0.57
NMAD* (m)	0.94	0.89	0.48	0.99	0.85
NMAD:GSD** (ratio)	3.5	3.3	-	3.7	3.1

*GSD obtenido (tamaño del píxel proyectado “ground sample distance”: 27.0 cm/ píxel). ** Normalized median absolute deviation NMAD.

Con respecto a las precisiones relativas (ratio NMAD/GSD), todos los modelos obtenidos muestran valores superiores a los esperados, del orden de 3 a 4 veces el tamaño GSD, cuando el valor máximo esperado es de un ratio de 2.3 según la referencia tomada de Zazo et al. (2018). Esto sugiere que la reconstrucción de los modelos obtenidos no fue

lo suficientemente satisfactoria aplicando el método de control fotogramétrico propuesto utilizando como superficie de referencia el modelo derivado de topografía convencional (Topo).

El efecto del origen de los puntos de control sobre la precisión de los modelos obtenidos puede explicar las precisiones obtenidas del vuelo 2. En la figura 70 se puede observar el efecto indicado. En ella se muestran las precisiones logradas en los modelos (MDT) utilizando puntos de control para los vuelos diseñados según su origen: físicos (estación total) y sintéticos (derivados de LiDAR o topografía convencional).

Figura 70. Efecto del origen de los puntos de control sobre la precisión de los modelos (MDT) producto de la fotogrametría SfM (Pix4D) con RPAS. Las barras azules y verdes representan las precisiones alcanzadas para los vuelos 1 y 2 respectivamente. (n) es el número de puntos de control. Entre paréntesis se muestra el ratio NDMA/GSD. Las líneas discontinuas representan las precisiones máximas esperadas tomando como referencia las precisiones reportadas por Zazo et al. (2018).

Para los 13 puntos de control sintéticos derivados de LiDAR se observa que mejora la precisión de los modelos, si se compara con los 5 puntos de control físicos convencionales. Lo opuesto fue observado cuando los puntos de control fueron extraídos del modelo derivado de topografía convencional, de menor resolución espacial (5 m) y precisión vertical (48 cm) en comparación con la utilización del modelo LiDAR de 1 m y 18 cm respectivamente. La utilización de los 8 puntos de control físicos en el vuelo 2 permite obtener modelos próximos a los valores esperados. Por consiguiente, la calidad

altimétrica y resolución espacial del modelo de referencia son críticos para la generación de productos precisos aplicando el método propuesto. Lo anterior sugiere que la aplicación del método de control propuesto requiere que la superficie de referencia tenga una calidad alta espacial como de precisión altimétrica. Por tanto, se recomienda utilizar modelos derivados de datos LiDAR de precisión similar o mejor a los empleados en el presente estudio.

Según los resultados de los vuelos fotogramétricos ejecutados, se ha demostrado que es posible la generación de modelos precisos derivados por el procesamiento SfM de imágenes RPAS junto con el método de georeferenciación propuesto, basado en puntos de control sintéticos, en especial, derivados de fuentes altimétricas como LiDAR aéreo.

Discusión de los resultados sobre el método de georeferenciación propuesto

En esta sección se analiza la precisión de los modelos obtenidos mediante el método propuesto de georeferenciación en el procesamiento fotogramétrico SfM de imágenes adquiridas con RPAS.

Los resultados evidencian que los puntos de control sintéticos derivados de fuentes existentes (p. ej., LiDAR aéreo) son útiles para obtener modelos del terreno de precisiones verticales de aproximadamente dos veces el tamaño de píxel de las imágenes RPAS utilizadas. La estrategia de procesamiento SfM con PhotoScan ofrece una mejor interactividad, especialmente en la generación de MDTs. Aunque la precisión con respecto al MDS de PhotoScan resultó ligeramente inferior al modelo generado con la solución Pix4D, dicha precisión se compensa notablemente cuando se genera el MDT. Ambas soluciones de procesamiento SfM de imágenes RPAS produjeron MDTs tan precisos como el del LiDAR aéreo utilizado como referencia, lo cual está en concordancia con la evaluación de precisión de Polat y Uysal (2018). En general, las precisiones absolutas de los modelos de terreno obtenidos están dentro de los rangos esperados según la literatura, tal como puede observarse en los resultados. Con respecto a las precisiones relativas, la figura 71 evidencia que incluso para el ratio RMSE (estadístico conservador para el caso de estudio), las precisiones son próximas a estudios similares (en GSD y tipo de plataforma) como los realizados por Hugenholtz et al. (2013) y Gindraux et al. 2017 y Yilmaz et al. (2018).

Figura 71. Ratios de precisión NMAD/RMSE en los modelos (MDT): GSD reportados en la revisión de literatura del capítulo 2 y los obtenidos del estudio (Vuelo 1, barra color verde).

Por tanto, a la luz de los resultados, se justifica la propuesta de georreferenciación alternativa por puntos de control sintéticos para el procesamiento SfM de imágenes adquiridas por plataformas RPAS, método análogo a los empleados en plataformas tripuladas por James et al. (2006) y Liu et al. (2007) de los cuales se deriva el método de control fotogramétrico sugerido. Además, los resultados contribuyen a ampliar las aplicaciones de fotogrametría RPAS cuando la determinación de los puntos de control es una actividad desafiante y/o compleja, por ejemplo en situaciones de emergencia o estimación de pérdidas durante desastres (Boccardo et al., 2015; Hashemi-Beni et al., 2018; Sherwood et al., 2018). También permitirían explotar la integración/fusión automática entre la nube de puntos densa producto del procesamiento fotogramétrico SfM de imágenes RPAS y puntos de control derivados de LiDAR aéreo, como se demuestra en la literatura reciente por Gneeniss et al. (2013), Persad et al. (2017), Huang et al. (2018) y Zhang y Lin (2017). Además, la metodología propuesta haría posible la generación rápida y eficiente de modelos de superficie y terreno para análisis multitemporales, una de las principales ventajas comparativas de las plataformas RPAS como sugiere (Giordan et al., 2018). La disponibilidad cada vez mayor de datos de elevación de LiDAR terrestre puede convertirse en una fuente adicional de puntos de control sintéticos para la fotogrametría de RPAS, como se ha demostrado recientemente en la literatura (Gruen et al., 2013; Park, Kim, Cho, & Kang, 2019). Basándose en las tendencias de la literatura y los resultados mencionados anteriormente, la creciente oferta de productos geoespaciales

es prometedora, especialmente para lograr el Objetivo 11 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (2016) al año 2030 denominado: “*Ciudades y comunidades sostenibles*”.

Las limitaciones importantes para la replicación del método descrito son las regulaciones internacionales actuales para la operación civil de vehículos aéreos no tripulados, en particular, la altitud de vuelo. Sin embargo, al disminuir la altura de vuelo, y por ende el tamaño del píxel (GSD), se esperan precisiones similares o mejores (en términos relativos), que las reportadas en la literatura a costa de una menor cobertura de superficie. Por tanto, se hace manifiesta la necesidad de conseguir mayores duraciones de vuelo, como se describe en el diseño de los vuelos experimentales de Yurtseven (2019). Se requiere que la precisión vertical del modelo de referencia (p. ej. LiDAR) y el GSD deseado de las imágenes RPAS a adquirir mantengan un ratio aproximado de al menos 2:1. Por ejemplo, para un píxel (GSD) de 5 cm (~ 150 m de altura con el equipo ala fija utilizado), el modelo LiDAR debe tener una precisión vertical igual o inferior a 10 cm.

Finalmente, en el uso de los puntos de control sintéticos para la generación de modelos fotogramétricos de imágenes RPAS deben considerarse las siguientes limitaciones (James et al. 2006): (i) disponibilidad de datos LiDAR, por lo general de cobertura parcial o nula, (ii) resolución, los datos primarios LIDAR deben ser lo suficientemente detallados para permitir al operador identificar las características distinguibles de puntos de control en el terreno, (iii) pérdida de información debido a la interpolación de datos de nubes de puntos sin procesar a datos ráster o rejilla, y (iv) posibles variaciones debido a las diferencias temporales entre la adquisición de datos LIDAR y las adquisiciones de imágenes para el procesamiento fotogramétrico.

5.3. Aplicación de modelos RPAS para estimar la amenaza de inundación.

El modelo de terreno derivado del procesamiento SfM del Vuelo 1 se utiliza para la comparación respecto al modelo de referencia LiDAR. Debido a que los modelos RPAS (2016) y LIDAR (2018) tienen fechas de adquisición diferentes, y según se evidencia, existen diferencias vinculadas a cambios físicos sobre el terreno (vegetación, automóviles y construcciones), la comparación de los productos altimétricos se limita a la utilización del MDT, que se asume estable en el tiempo. Lo anterior justifica la elección del MDT sobre el MDS. El propósito es analizar el potencial de los modelos RPAS para la estimación de la amenaza en el caso de un evento hipotético de inundación extremo.

La Tabla 27 muestra los resultados de las estimaciones de inundación del evento simulado de 84 años modelado con el modelo hidrodinámico MODCEL. Se consignan los resultados de volumen y área para cada una de las subcuencas seleccionadas y modelos a analizar (PhotoScan y Pix4D), así como su correspondiente error respecto al modelo LiDAR de referencia estimado con las ecuaciones 8 y 9. En general, es claro que según los resultados de la Tabla 27, los volúmenes y las áreas inundados generadas con el modelo PhotoScan están más cerca que las del LiDAR.

Tabla 28. Comparaciones de las estimaciones del evento de inundación considerado de 84 años entre los modelos del terreno RPAS generados (Vuelo 1) y el modelo de referencia LIDAR.

Subcuenca	Vol. (m ³) Area (m ²)	LiDAR	Pix4D	PhotoScan	Pix4D Diferencia (%) ²	PhotoScan Diferencia (%) ²
704 (urbano)	V	68,072	61,728	53,699	9.3	21.1
	A	166,385	114,940	141,985	30.9	14.7
705 (urbano)	V	4,065	185	126	95.4	96.9
	A	16,682	941	758	94.4	95.5
703 (salida de 603)	V	13,986	4,294	7,638	69.3	45.4
	A	15,646	5,756	11,793	63.2	24.6
603 (laguna + urbano)	V	114,311	51,103	106,135	55.3	7.2
	A	155,245	21,015	146,596	86.5	5.6
506 (entrada de 603)	V	2,589	5,690	7,180	119.8	177.3
	A	7,878	11,206	14,514	42.2	84.2
Diferencia (absoluta)						
Total (Σ) *	V	203,023	123,000	174,778	80,023	28,245
	A	361,836	153,858	315,646	207,978	46,190
Diferencia (%) ²	V				42.5	18.4
	A				59.3	16.4

* Σ = Total V y A, correspondiente a la suma de todas las subcuencas inundadas. ² Valores calculados a partir de las ec.8 y 9.

La Tabla 28 resume las estimaciones de similitud para la progresión de la inundación utilizando el índice de Bray-curtis. Los resultados observados de similitud, confirman que la progresión del llenado de la inundación para el modelo PhotoScan está más cerca de la referencia LiDAR que el modelo obtenido por Pix4D.

Tabla 29. Índice de similitud de Bray-Curtis para las estimaciones entre modelos RPAS y LiDAR

Subcuenca (Cobertura)	Pix4D	PhotoScan	Pix4D	PhotoScan
	Volumen*		Área*	
704 (urbano)	0.09	0.14	0.16	0.12
705 (urbano)	0.85	0.91	0.79	0.85
703 (salida de 603)	0.47	0.27	0.51	0.19
603 (laguna + urbano)	0.34	0.06	0.69	0.07
506 (entrada de 603)	0.46	0.54	0.33	0.44
Puntaje general (promedio)	0.44	0.38	0.50	0.33

*Valor de similitud perfecto es 0, mientras que 1 es absolutamente diferente.

La figura 72 muestra los mapas de inundación para los diferentes métodos en las subcuencas 704 y 603.

Figura 72. Mapas ráster de inundación correspondientes a los modelos las subcuencas en 704 y 603

La figura 73 muestra las curvas de progresión para el modelo de referencia modelos LiDAR junto con los obtenidos con PhotoScan y Pix4D (Subcuencas 704 y 603).

Figura 73. Similitud de las curvas de progresión de inundación entre modelos RPAS en comparación con el modelo de referencia LiDAR en las subcuencas 704 y 603. El índice de Bray-Curtis se muestra entre paréntesis.

De la figura 72 se observa que los mapas de inundación para la Subcuenca 704 muestran que los modelos RPAS generados comparten estimaciones de inundación similares en comparación con los valores obtenidos con el modelo de referencia LiDAR. Las diferencias son en cuanto a la distribución espacial de la inundación. Mientras en el modelo Pix4D la inundación ocurre principalmente a lo largo de las calles, la obtenida con PhotoScan, genera una superficie inundada amplia que no sigue el trazado de calles o avenidas.

Respecto a la progresión de inundación presentada en la figura 73, se observa que para el modelo Pix4D en la subcuenca 704, los volúmenes obtenidos para cada paso de tiempo están más cerca de los estimados de la referencia LiDAR, aunque ligeramente más altos. Para el modelo obtenido con PhotoScan, las estimaciones de volumen inundado siempre están por debajo de la superficie de referencia. En la Subcuenca 603, donde se encuentra el humedal “Laguna salaá”, la extensión de inundación del modelo Pix4D se

reduce al perímetro del cuerpo agua visible, mientras que PhotoScan el área está mucho más próxima al modelo de referencia.

Las principales diferencias observadas entre los modelos obtenidos se explican por el método de clasificación y edición de la nube densa de puntos de la cadena de procesamiento SfM. Los modelos generados de forma semiautomática (PhotoScan), donde la intervención del operador es importante, producen resultados mucho más cercanos a la referencia LiDAR que cuando el proceso es completamente automatizado (es decir, Pix4D). Se puede ver que para los productos altimétricos 3D generados con la estrategia de procesamiento de Pix4D, parte de la infraestructura (edificios, por ejemplo) permanece en el MDT final, producto del proceso totalmente automatizado de clasificación.

Discusión de los resultados de la aplicación de los modelos RPAS (MDT) en la estimación de la amenaza.

Esta sección discute el potencial de los modelos RPAS generados para la estimación de la amenaza de inundación. Los resultados de las estimaciones de inundación (área y volumen), en comparación con la referencia LiDAR, demuestran la utilidad de los modelos generados a partir de nubes de puntos densos del procesamiento fotogramétrico SfM, cuando el usuario participa activamente en su clasificación. Estos hallazgos están de acuerdo con los de Leitão et al. (2016), Coveney y Roberts (2017) y Schumann et al. (2019), que basaron sus comparaciones en modelos existentes de referencia tipo LiDAR.

Los resultados del análisis de inundaciones (área y volumen) mostraron la idoneidad del uso de modelos producto del procesamiento de SfM, como herramienta para apoyar estudios locales de inundaciones en cuencas urbanas o llanuras de inundación periurbanas, confirmando lo sugerido por la revisión de Giordan et al. (2018). Específicamente, los RPAS comerciales como fuente de información geoespacial, permiten obtener datos de entrada de elevación útiles para el modelado hidrodinámico 2D en áreas urbanas con escasez de datos hidrológicos topográficos, como es demostrado recientemente por Yalcin (2018).

Por otro lado, la estimación de eventos de inundaciones extremas hace posible evaluar el comportamiento del espacio ocupado por el agua en los modelos de terreno más allá del ámbito espacial de calles y avenidas, por lo general, con disponibilidad de información altimétrica precisa para su verificación. Esta evaluación del modelo obtenido

de fotogrametría RPAS mediante el análisis espacial de la inundación en S.I.G., garantiza una evaluación más general, donde no se tiene o es difícil adquirir datos altimétricos de verificación (techos, domos, doseles) y donde los errores en estas coberturas complejas se esperan sean altos como lo demuestra Bolkas, Sichler, and Mcmarlin (2019).

Si bien las discrepancias son evidentes entre los modelos de RPAS y el LiDAR de referencia, estas se deben a la estrategia de generación del MDT. El modelo generado es sensible a la estrategia de procesamiento SfM adoptada. Es decir, al método de clasificación utilizado para la identificación de puntos del terreno y para la edición de la nube densa en zonas vegetadas o con presencia de cuerpos de agua. Las salidas del mapa ráster de profundidades muestran que para el modelo de terreno Pix4D, existe una tendencia a generar un determinado tejido urbano residual. Lo anterior se debe a un desempeño deficiente de la clasificación del terreno de la nube densa generada por parte del algoritmo basado en aprendizaje de máquina aplicado en la cadena procesamiento SfM con Pix4D; así como a la imposibilidad de entrenamiento previo de dicho algoritmo en la versión utilizada del programa (Becker et al., 2018). La inclusión del tejido urbano residual en el modelo de terreno de Pix4D influye en la extensión de la inundación por desplazamiento de volumen.

En consecuencia, para la estrategia ejecutada con Pix4D, las inundaciones tienden a propagarse a lo largo de las calles al igual que sucede con respecto a modelo de superficie. En contraste, el modelo de terreno obtenido con PhotoScan, en el que hay una mayor interacción del usuario en la clasificación, se observa una amplia superficie de agua. Los hallazgos mencionados concuerdan con las conclusiones de Shaad et al. (2016) y Hashemi-Beni et al. (2018), quienes concluyeron que los algoritmos de extracción del terreno totalmente automatizados, generan peores estimaciones de inundación que las obtenidos de una clasificación manual o semiautomática.

Un conocimiento profundo del área por el usuario/modelador, junto con la disponibilidad de datos de campo adicionales (perfiles y / u observaciones de profundidades de inundación) es esencial para asegurar la utilización adecuada de los algoritmos de filtrado del suelo. Adicionalmente, la inclusión de imágenes oblicuas para la reconstrucción de zonas urbanas, minimizaría los errores sistemáticos en la generación y densificación de la nube dispersa de puntos (Dai, Feng, & Hough, 2014; Mike R. James & Robson, 2014), lo cual sería beneficioso pues aumentaría la presencia de puntos en las

fachadas de los edificios, facilitando el comportamiento de los algoritmos de clasificación basados en aprendizaje de máquina (Özdemi & Remondino, 2019).

Las discrepancias entre las evaluaciones de inundaciones también pueden deberse al uso de una superficie de referencia desactualizada (p. ej., referencia LiDAR en 2008 versus levantamientos RPAS en 2016, como en nuestro caso), particularmente en zonas bajas, donde las variaciones del terreno o los cambios en el sistema hidráulico, e infraestructuras (p. ej., en canales o cerca de alcantarillas) desempeñan un papel importante en la propagación de las inundaciones. Ello sugiere una oportunidad para estudiar la evolución del terreno con levantamiento RPAS de alta resolución, es decir, a baja altura de vuelo y GSD (Langhammer et al., 2017).

Por otro lado, según Šiljeg et al. (2019) los parámetros definidos por el usuario tales como densidad de puntos, método de interpolación y tamaño de píxel, tienen una gran influencia en la precisión del MDT (Šiljeg et al., 2019). Dependiendo de la densidad de puntos, la resolución espacial óptima del modelo se altera (Polat & Uysal, 2018), siendo su resolución óptima función del área de estudio y el número de puntos clasificados (McCullagh, 1988). Basándose en lo anterior, estudios futuros podrían centrarse en encontrar una la resolución espacial óptima de modelos RPAS del terreno, así como evaluar su respuesta en cuanto a estimación del área y volumen inundado. Esto permitiría un mejor diseño de los vuelos dependiendo del nivel de detalle y escala de trabajo requerida.

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES

6.1. Sumario y conclusiones finales

Se constata el incremento de frecuencia de amenazas naturales como inundaciones extremas en un mundo cada vez más poblado. Por tanto, el conocimiento local del territorio para la planificación ante este escenario es crucial para la adaptación de las comunidades. Por tanto, la información geoespacial altimétrica, como son los MDEs, constituye una herramienta clave en el análisis de la amenaza por inundación, aunque no siempre disponible a una escala requerida de detalle.

Esta tesis tuvo como objetivo principal proponer una metodología de obtención de información altimétrica a partir del análisis de tecnologías geoespaciales emergentes, para aplicaciones en el estudio de inundaciones a escala local de detalle. Específicamente se investigó la contribución un método alternativo de georreferenciación por puntos de control derivados de información altimétrica existente para la generación de modelos a partir de fotogrametría de imágenes adquiridas por RPAS. Posteriormente se procedió al análisis de los modelos RPAS obtenidos para evaluar su potencial en la modelación espacial de inundaciones urbanas.

Según la evidencia de los resultados para el alcance del objetivo (a) se concluye que:

- El método propuesto de georreferenciación por puntos de control sintéticos (p. ej. LiDAR) contribuye a alcanzar precisiones altimétricas de los modelos derivados de fotogrametría RPAS de aproximadamente dos veces el tamaño de píxel (GSD) en las imágenes de entrada.
- Las precisiones logradas en los modelos RPAS son comprables a las del modelo LiDAR de referencia. En términos relativos, las precisiones están dentro de las reportadas en la literatura especializada que utilizan métodos probados de georreferenciación.
- Las precisiones de los modelos digitales de terreno se mejoran notablemente frente a los modelos de superficie. Esta mejora de la precisión comprable al LiDAR de referencia, se debe en gran medida a la participación activa del operario en la cadena de procesamiento SfM, específicamente en la etapa de clasificación de la nube densa de puntos.
- La relación complementaria demostrada entre datos existentes tipo LiDAR como control fotogramétrico de un vuelo RPAS, ofrece a modeladores del terreno e investigadores en geociencias, un método alternativo de

georreferenciación para la generación de modelos, en particular, cuando la determinación física de puntos de control es desafiante o inviable logísticamente en el terreno.

- Por todo lo anterior, se justifica el uso de puntos de control sintéticos en la cadena de procesamiento fotogramétrico SfM de imágenes RPAS para la generación de modelos altimétricos. Esto permite confirmar la consecución del objetivo (a) basado en la cuestión planteada de que las precisiones de los modelos generados a partir de fotogrametría con RPAS y puntos de control sintéticos (LiDAR aéreo), son comparables a las logradas por métodos tradicionales de georreferenciación.

Respecto a los resultados de la aplicación de los modelos RPAS en el análisis local de inundaciones urbanas (Objetivo b) se concluye que:

- Los resultados de las estimaciones de inundaciones demuestran el potencial de los modelos RPAS obtenidos como una herramienta geoespacial de apoyo a estudios locales de inundaciones urbanas.
- Los modelos de superficie sin previa clasificación, muestran resultados razonables para la estimación preliminar de la amenaza de inundación. Es posible crear ortomosaicos y utilizar imágenes oblicuas de zonas inundadas como referencia visual en la estimación empírica y rápida de una zona inundable.
- Los modelos de terreno generados aplicando el flujo de procesamiento fotogramétrico SfM de forma semiautomática, donde la intervención del operador es importante, producen estimaciones de inundación muchos más cercanos al modelo de referencia LiDAR que aquellos donde el procesamiento totalmente automático.
- El análisis de eventos extremos de inundación permite evaluar los modelos RPAS de alta resolución más allá de donde se cuenta con mediciones para la estimación de la precisión altimétrica (áreas abiertas o calles). Esto permite la identificación de artefactos residuales sobre el terreno permitiendo evaluaciones más generales en los modelos.
- Si bien las discrepancias son evidentes entre modelos generados por RPAS y LiDAR de referencia, estas se deben principalmente a la estrategia de clasificación y edición de la nube densa de puntos.

- Para lograr un aprovechamiento adecuado de los algoritmos de clasificación del terreno bajo una estrategia de clasificación semiautomática, es necesario un reconocimiento previo de la zona a modelar por el operario de la cadena de procesamiento SfM.
- Por lo anterior, se confirma el potencial de los modelos RPAS para la estimación espacial de inundaciones locales a escala de detalle, cuando se hayan obtenido con una participación activa del operario en la cadena de procesamiento fotogramétrico SfM. Luego se puede confirmar la consecución del objetivo (b) basado en la cuestión planteada de que los modelos altimétricos generados a partir de datos RPAS y utilizando puntos de control sintéticos, son susceptibles de ser utilizados en la estimación espacial de la amenaza de inundación.

6.2. Contribuciones y propuesta metodológica

La presente tesis contribuye al conocimiento en la gestión de amenazas naturales proporcionando un caso de estudio orientativo sobre la obtención de modelos topográficos a partir de imágenes RPAS adquiridos a gran altitud. Además, en condiciones de operación realistas que llevan al límite la tecnología para cubrir áreas considerablemente grandes respecto a las reportadas en la literatura (1 – 3 km²). El caso de estudio es representativo de muchas ciudades intermedias costeras, ubicadas próximas a áreas deltaicas o fluviales altamente urbanizadas y consecuentemente altamente vulnerables a eventos hidrometeorológicos extremos, y en un contexto de condiciones limitantes tanto presupuestarias, logísticas y de acceso a datos secundarios de partida.

El análisis de las estimaciones de inundación para el evento histórico extremo seleccionado, fue utilizado con fines de comprobación del potencial de los modelos RPAS generados y evaluación del potencial de aplicación para la modelación espacial hidrológica en S.I.G. Además, el caso de estudio describe la evaluación del comportamiento de las dos soluciones de procesamiento fotogramétrico más populares, así como su configuración para la generación de modelos de superficie y terreno. El propósito no definir una solución mejor, sino que los resultados proporcionan información útil sobre la configuración del procesamiento fotogramétrico para ser aplicado en estudios de inundaciones urbanas a escala local de detalle.

En síntesis, las contribuciones puntuales metodológicas logradas en esta tesis son las siguientes:

- Se ha desarrollado una metodología sencilla para la generación y corrección altimétrica de un modelo ráster a partir de datos LiDAR.
- Se han diseñado vuelos fotogramétricos para condiciones de operación reales y exigentes de coberturas amplias de zonas del rango de 1 – 3 km² y tamaños del píxel en el terreno (GSD) poco tratados en la literatura (10 cm/píxel).
- Se han comparado de dos de las soluciones fotogramétricas: PhotoScan y Pix4D. Los modelos del terreno producto del proceso semiautomático con PhotoScan mostraron mejores precisiones, mientras el procesamiento automático con Pix4D obtuvo modelos más precisos a nivel superficie.
- Se ha propuesto una metodología de comparación de estimaciones de inundación con índices de similitud (Bray-Curtis) para modelos RPAS y datos

hidrológicos existentes utilizando un módulo de análisis espacial hidrológico en S.I.G. (*r.lake.xy* de GRASS GIS).

- Se ha puesto en evidencia la importancia del efecto de la micro topografía en la propagación de la inundación, gracias a la sensibilidad de modelos RPAS de alta resolución aquí generados.
- Se ha aplicado el uso de estimadores robustos estadísticos (métodos no paramétricos) para la evaluación de la precisión de modelos RPAS en zonas urbanas altamente propensa a valores atípicos y artefactos residuales producto del procesamiento fotogramétrico SfM.

Propuesta metodológica para zonas inundables de topografía plana.

La presente sección se describe una propuesta metodológica para la georreferenciación de proyectos de obtención de información altimétrica a partir de imágenes adquiridas con RPAS y procesadas con tecnologías fotogramétricas SfM, así como su aplicación en estudios de inundaciones. La propuesta metodológica es de aplicación únicamente en aquellas zonas de características similares a las del caso de estudio, esto es, a zonas de topografía plana y escasa pendiente. En la Tabla 29, se sintetiza la metodología propuesta para la georreferenciación, indicando los requerimientos de precisión vertical del modelo de referencia derivado de datos LiDAR y la distribución espacial idealizada de los GCP sintéticos. Se proponen dos escenarios (A y B), correspondientes a dos alturas de vuelo. El escenario A se corresponde con un vuelo de alta altura utilizando un equipo de ala fija, lo que permitiría cubrir una amplia superficie. El escenario B, se corresponde a un vuelo de baja altura, por debajo de la altura máxima permitida por la mayoría de las normas nacionales de operación con equipos RPAS. En el escenario B se propone un mayor número de GCP con el fin de minimizar los errores sistemáticos en la calibración de la cámara (efecto cuenco).

La figura 74 describe el flujo de trabajo propuesto para la aplicación de la información altimétrica obtenida en estudios de inundaciones. En dicha figura puede observarse la integración del método propuesto de georreferenciación a partir de GCP sintéticos LiDAR como entrada de datos en la cadena de procesamiento SfM, junto con la utilización de imágenes capturadas durante la ocurrencia de un evento de inundación. Lo anterior propone dos fases: (i) una primera en la que a partir de imágenes capturadas antes de la inundación y utilizando la metodología de georreferenciación propuesta, se generan los MDE y (ii) en una segunda, mediante la adquisición de nuevas imágenes

durante o inmediatamente después del evento de inundación, se cartografiaban las zonas inundadas. Para realizar el análisis detallado de la amenaza y la adaptación local contra inundaciones se propone la utilización de técnicas S.I.G de modelado espacial, como es del caso de la herramienta *r.lake.xy* junto con los MDEs generados en la primera fase. Mientras que, para el cartografiado y seguimiento de la inundación, se propone la utilización de imágenes capturadas con multirotor.

Tabla 30. Propuesta metodológica para la georreferenciación de un vuelo fotogramétrico RPAS con puntos de control derivados de LiDAR (GCP-LiDAR).

Escenario A	Escenario B
Diseño de vuelo	
GSD	
10 cm /píxel	5 cm /píxel
Altura de vuelo*	
350 m	150 m
Plataforma	
Ala fija (para superficies entre 1 – 6 km ²)	Ala fija y/o multirotor (para superficies < 1 km ²)
Solapamiento frontal y lateral	
70 y 80 %	70 y 80 % (posibilidad de imágenes oblicuas con multirotor)
Control fotogramétrico del vuelo	
Precisión vertical modelo de referencia LiDAR	
Menor o igual a 20 cm	Menor o igual a 10 cm
Número mínimo de GCP derivados de LiDAR (GCP-LiDAR)	
13	15
Esquema de distribución ideal de GCP-LiDAR	
GCP-LiDAR = 13	GCP-LiDAR = 15

*Altura aproximada de vuelo constante sobre el terreno para una cámara de geometría similar a la usada en la presente tesis.

Figura 74. Concepto propuesto para la aplicación conjunta de la tecnología RPAS y fotogrametría SfM en la estimación espacial de la amenaza de inundación a escala de detalle.

6.2. Futuras líneas de investigación

Los resultados y conclusiones de esta investigación demuestran el cumplimiento del objetivo planteado, al proponer una metodología obtención de información altimétrica tridimensional para el análisis de la amenaza de inundación a escala local de detalle por medio de tecnologías geoespaciales, RPAS. No obstante, a lo largo del estudio se encontraron aspectos operativos y de procesamiento capaces de mejorar los modelos generados y consecuentemente sus prestaciones en el modelado espacial de inundaciones. Estos hallazgos representan una oportunidad para profundizar el desarrollo de otras líneas de investigación relacionadas con el estudio de la amenaza de inundación en entornos urbanos.

Nuevos diseños de vuelos (Integración ala fija y multirotor)

Una de las principales limitaciones para la replicación del método de georreferenciación propuesto es la operación del RPAS a alturas mayores a de la altura mínima legal (< 150 m en la mayoría de legislaciones en el mundo). Esto supone una oportunidad para validar el método propuesto de control fotogramétrico con nuevos diseños de vuelo que podría pasar por:

- Disminución de la altura de vuelo, por ende, inclusión de modelos de referencia existentes de mayor precisión como LiDAR terrestre (móvil o fijo) incluso modelos RPAS derivados de plataformas multirotor.
- Inclusión de nuevos diseños de vuelos combinados de ala fija y multirotor. Este último para la adquisición de imágenes oblicuas y nadirales en áreas de interés prioritarias, en zonas urbanas en las que se requiere mayor nivel de detalle para mejorar el desempeño de la clasificación de los artefactos sobre el terreno.

Impacto del GSD en la estimación de la inundación

La definición de parámetros de vuelo, en especial la altura y su estrecha relación con el tamaño del píxel en el terreno o GSD, abre interrogantes acerca de la altura óptima para un modelo RPAS en aplicaciones de inundaciones. Los futuros trabajos podrían centrarse en encontrar una resolución espacial óptima del modelo variando la altura de vuelo y examinado la respuesta en la modelación espacial de la inundación. Esto es la realización de un análisis de sensibilidad de la respuesta de las estimaciones de inundación frente a las distintas alturas de vuelo utilizadas para la generación de MDT.

Impacto de la calidad procesamiento inicial fotogramétrico en la estimación de la inundación.

Dentro de la cadena de procesamiento fotogramétrico SfM durante el paso inicial, la calidad de la nube de puntos dispersa tiene una gran influencia sobre la generación del modelo final. Luego la calidad en la reconstrucción del modelo podría tener un efecto importante en la estimación de la inundación. Una línea de investigación podría ser cuantificar el impacto en la reconstrucción de la nube de puntos dispersa (eliminación semiautomática de puntos anómalos). Esto es, evaluar el impacto de indicadores de calidad, como el error de reproyección (en píxeles), en la estimación del área y volumen inundado por un modelo RPAS.

Análisis multitemporal y modelización hidrodinámica 2D.

La metodología propuesta de georreferenciación presenta además la ventaja de ser aplicable para adquisiciones multitemporales de imágenes, con el fin de detectar posibles cambios entre periodos de adquisición, es decir antes y después de ocurrir un evento de inundación. Por otra parte, los MDEs generados pueden ser de utilidad para la generación de mallas de cálculo de utilización en modelos de simulación de variables físicas hidrodinámicas 2D, como la velocidad de flujo en zonas urbanas que favorecen inundaciones pluviales altamente peligrosas.

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.

REFERENCIAS

- Abdel-Wahab, M., Wenzel, K., & Fritsch, D. (2012). Efficient reconstruction of large unordered image datasets for high accuracy photogrammetric applications. *ISPRS – Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* 1-3, 1–6.
- Abdullah, Q. (2019). Harnessing Drones The Photogrammetric Way. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (May). <https://doi.org/10.14358/PERS.85.5.329>
- Abdullah, Q., Maune, D., Smith, D., & Heidemann, H. K. (2015). New Standard for New Era: Overview of the 2015 ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(3), 173–176. [https://doi.org/10.1016/S0099-1112\(15\)30334-7](https://doi.org/10.1016/S0099-1112(15)30334-7)
- Aerial Survey Base. (2019). What is GSD? Ground Sampling Distance. Retrieved September 30, 2019, from <https://www.aerial-survey-base.com/gsd-calculator/what-is-gsd/>
- Afanador Franco, F., Orozco Quintero, F. J., Gómez Mojica, J. C., & Carvajal Díaz, A. F. (2008). Digital orthophotography and LIDAR data to control and management of Tierra Bomba island littoral, Colombian Caribbean. *Boletín Científico CIOH*, 26(26), 86–103.
- Agencia Estatal de Meteorología. (2015). *Manual de Términos Meteorológicos*.
- Agisoft LLC. (2013). *Orthophoto and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.0.0*. St. Petersburg, Russia: Agisoft LLC.
- Agisoft LLC. (2016). *Agisoft PhotoScan User Manual - Professional Edition, Version 1.2*. St. Petersburg, Russia: Agisoft LLC.
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 98, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>
- Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M. A., & Carvajal, F. (2005). Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(7), 805–816. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.7.805>
- AIRBUS. (2016). *Technical Information Elevation1 Digital Surface Model*.
- Ajayi, O. G., Salubi, A. A., Angbas, A. F., & Odigure, M. G. (2017). Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 3113–3134. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1285085>
- Alcaldía de RIOHACHA - LA GUAJIRA. (2016). Nuestro Municipio. Retrieved October 1, 2019, from https://web.archive.org/web/20150924091251/http://www.riohacha-laguajira.gov.co/informacion_general.shtml
- Algarni, D. A., & El hassan, I. M. (2001). Comparison of thin plate spline, polynomial, CI—function and Shepard’s interpolation techniques with GPS-derived DEM. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(2), 155–161. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85007-8](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85007-8)
- Alho, P., Hyypä, H., & Hyypä, J. (2009). Consequence of DTM Precision for Flood Hazard Mapping: A Case Study in SW Finland. *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*, 6(1), 21–39.
- Altawy, R., & Youssef, A. M. (2016). Security, Privacy, and Safety Aspects of Civilian Drones. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 1(2), 1–25. <https://doi.org/10.1145/3001836>
- Anai, T., Kochi, N., Yamada, M., Sasaki, T., Otani, H., Sasaki, D., & Yasui, N. (2015). EXAMINATION ABOUT INFLUENCE FOR PRECISION OF 3D IMAGE MEASUREMENT FROM THE GROUND CONTROL POINT MEASUREMENT AND SURFACE MATCHING. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. (Vol. XL, pp. 21–22). <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-165-2015>
- Anai, T., Sasaki, T., Osaragi, K., Yamada, M., Otomo, F., & Otani, H. (2012). Automatic Exterior Orientation Procedure for Low-cost UAV Photogrammetry Using Video Image Tracking Technique and GPS Information. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XXXIX, pp. 469–474).
- Anderson, K., Westoby, M. J., & James, M. R. (2019). Low-budget topographic surveying comes of age: Structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences. *Progress in Physical Geography*, 43(2), 163–173. <https://doi.org/10.1177/0309133319837454>
- Apel, H., Martínez Trepát, O., Nghia Hung, N., Thi Chinh, D., Merz, B., & Viet Dung, N. (2016). Combined fluvial and pluvial urban flood hazard analysis: Concept development and application to Can Tho city, Mekong Delta, Vietnam. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 941–961. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-941-2016>
- ASPRS. (2000). Camera Calibration Final Report. Retrieved March 6, 2019, from https://www.asprs.org/a/news/archive/final_report.html
- ASPRS. (2014). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(3), A1–A26. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26>

- Ávila Brito, W., Nardini, A., & Pérez Montiel, J. (2017). *ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN PARA LAS INUNDACIONES EN RIOHACHA "MI CASA SE INUNDA."* (J. C. Bedoya & Y. Zuñiga Mendoza, Eds.) (Book). Riohacha (Colombia): Editorial Universidad de La Guajira.
- Axelsson, P. (2000). DEM Generation from Laser Scanner Data Using adaptive TIN Models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 23(B4), 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.10.005>
- Bakula, K., Stepnik, M., & Kurezyński, Z. (2016). Influence of Elevation Data Source on 2D Hydraulic Modelling. *Acta Geophysica*, 64(4), 1176–1192. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0030>
- Bangen, S., Wheaton, J., Bouwes, N., Jordan, C., Volk, C., & Ward, M. B. (2014). Crew variability in topographic surveys for monitoring wadeable streams: a case study from the Columbia River Basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(15), 2070–2086. <https://doi.org/10.1002/esp.3600>
- Barazzetti, L., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2014). TRUE-ORTHOPHOTO GENERATION FROM UAV IMAGES: IMPLEMENTATION OF A COMBINED PHOTOGRAMMETRIC AND COMPUTER VISION APPROACH. In *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. II). <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-57-2014>
- Bay, H., & Ess, A. (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110, 346–359. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>
- Beard, R. W., Kingston, D., Quigley, M., Snyder, D., Christiansen, R., Johnson, W., ... Goodrich, M. (2005). Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed-Wing UAVs. *J. Aerosp. Comput. Inf. Commun.*, 2, 92–108.
- Becek, K., Koppe, W., & Kutoğlu, Ş. H. (2016). Evaluation of vertical accuracy of the WorldDEM™ using the runway method. *Remote Sensing*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/rs8110934>
- Becker, C., Häni, N., Rosinskaya, E., D'Angelo, E., & Strecha, C. (2018). Classification of Aerial Photogrammetric 3D Point Clouds. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 84(5), 287–295. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-3-2017>
- Benassi, F., Dall'Asta, E., Diotri, F., Forlani, G., Cella, U. M. di, Roncella, R., & Santise, M. (2017). Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with gnss-supported aerial triangulation. *Remote Sensing*, 9(2), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs9020172>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.RIMNI.2012.07.004>
- Boccardo, P., Chiabrando, F., Dutto, F., Tonolo, F. G., & Lingua, A. (2015). UAV deployment exercise for mapping purposes: Evaluation of emergency response applications. *Sensors (Switzerland)*, 15(7), 15717–15737. <https://doi.org/10.3390/s150715717>
- Bolkas, D., Sichler, T. J., & Mcmarlin, W. (2019). A Case Study on the Accuracy Assessment of a Small UAS Photogrammetric Survey Using Terrestrial Laser Scanning. *Surveying and Land Information Science*, 78(1), 31–44.
- Boon, M. A., Drijfhout, A. P., & Tesfamichael, S. (2017). Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: A case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W6), 47–54. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>
- BoxPlotR. (2014). BoxPlotR: a web-tool for generation of box plots. Retrieved August 15, 2019, from <http://shiny.chemgrid.org/boxplotr/>
- Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E. J., Gardel, A., & Dussouillez, P. (2016). Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*, 261, 76–88. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2016.02.025>
- Bühler, Y., Marty, M., Egli, L., Veitinger, J., Jonas, T., Thee, P., & Ginzler, C. (2015). Snow depth mapping in high-alpine catchments using digital photogrammetry. *Cryosphere*, 9(1), 229–243. <https://doi.org/10.5194/tc-9-229-2015>
- Cai, W., Wang, G., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., Jin, F.-F., ... Guilyardi, E. (2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 132–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2492>
- Campion, M., Ranganathan, P., & Faruque, S. (2018). UAV Swarm Communication and Control Architectures: A Review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, juvs-2018-0009. <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0009>
- Casagrande, G. (2018). Small Drones and Geographic Observation. In *Small Flying Drones* (pp. 1–12). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66577-1_1
- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V. R., & Rico, M. (2006). The topographic data source of digital terrain

- models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(4), 444–456. <https://doi.org/10.1002/esp.1278>
- Castillo, C., James, M. R., Pérez, R., & Gómez, J. A. (2015). SF3M software : 3-D photo-reconstruction for non-expert. *SOIL*, 1, 583–594. <https://doi.org/10.5194/soil-1-583-2015>
- Chandler, J. (1999). Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(1), 51–63. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199901\)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199901)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H)
- Chao, H., Cao, Y., & Chen, Y. (2010). Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles : A Survey. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 8(1), 36–44. <https://doi.org/10.1007/s12555-010-0105-z>
- CHARIM. (2017a). Caribbean Handbook on Risk Management — GeoNode. Retrieved November 14, 2018, from <http://charim.net/datamanagement/32>
- CHARIM. (2017b). Caribbean Handbook on Risk Management | CHARIM. Retrieved November 17, 2018, from <http://www.charim.net/use/92>
- Chen, Z., Gao, B., & Devereux, B. (2017). State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data. *Sensors*, 17(1), 150. <https://doi.org/10.3390/s17010150>
- Choi, J., Lee, O., & Kim, S. (2016). Analysis of the effect of climate change on IDF curves using scale-invariance technique: focus on RCP 8.5. *Journal of Korea Water Resources Association*, 49(12), 995–1006. <https://doi.org/10.3741/jkwra.2016.49.12.995>
- Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental la observación de la tierra desde el espacio*. Ariel.
- Climate-data.org. (2019). Clima Riohacha: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Riohacha - Climate-Data.org. Retrieved June 28, 2019, from <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/la-guajira/riohacha-714990/#climate-graph>
- Cohen, S., Brakenridge, G. R., Kettner, A., Bates, B., Nelson, J., McDonald, R., ... Zhang, J. (2018). Estimating Floodwater Depths from Flood Inundation Maps and Topography. *Journal of the American Water Resources Association*, 54(4), 847–858. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12609>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Corbley, K. (2014). Merrick Extends Life of LiDAR Sensor by Modifying Flight Operations. Leica ALS40 Contributes to Colombian Market and History. *LiDAR Magazine*, 4(1), 6.
- Coveney, S., & Roberts, K. (2017). Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for environmental applications: data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 3159–3180. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1292074>
- Dai, F., Feng, Y., & Hough, R. (2014). Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications. *Visualization in Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/2213-7459-2-2>
- DANE. (2019). Proyecciones de población. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Retrieved June 23, 2019, from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- de Oliveira, A. K. B., Rezende, O. M., de Sousa, M. M., Nardini, A., & Miguez, M. G. (2019). An alternative flood model calibration strategy for urban watersheds: case study of Riohacha, Colombia. *Water Science and Technology*, 79(11), 2095–2105. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.211>
- Delgado-Vera, C., Aguirre-Munizaga, M., Jiménez-Icaza, M., Manobanda-Herrera, N., & Rodríguez-Méndez, A. (2017). A Photogrammetry Software as a Tool for Precision Agriculture: A Case Study (pp. 282–295). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67283-0_21
- DeWitt, J. D., Warner, T. A., Chirico, P. G., & Bergstresser, S. E. (2017). Creating high-resolution bare-earth digital elevation models (DEMs) from stereo imagery in an area of densely vegetated deciduous forest using combinations of procedures designed for lidar point cloud filtering. *GIScience & Remote Sensing*, 54(4), 552–572. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1295514>
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L., & Llorente-Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L., & Llorente-Isidro, M. (2009). *A Handbook on Flood Hazard Mapping Methodologies A Handbook on Flood Hazard Mapping*.
- DNP. (2018). *Estrategia para la atención de la migración desde Venezuela | Documento CONPES. Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES). Departamento Nacional de Planeación -DNP*.
- Domínguez, M., & Belda, M. (2003). *Topografía y Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

- Draeyer, B., & Strecha, C. (2014). *Pix4D White paper-How accurate are UAV surveying methods*. Lausanne, Switzerland: Pix4D White Paper.
- DroneDeploy. (2017). DroneDeploy's 2017 Drone Buyer's Guide. Retrieved from <https://www.dronedeploy.com/resources/ebooks/2017-drone-buyers-guide/#form>
- Duncan, B. A., & Murphy, R. R. (2015). Comparison of Flight Paths from Fixed-Wing and Rotorcraft Small Unmanned Aerial Systems at SR530 Mudslide Washington State. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 3416–3421. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139671>
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV Photogrammetry*. University of Technology Dresden.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellán, A. (2016). Image-based surface reconstruction in geomorphometry-merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Fawcett, D. (2019). Two decades of digital photogrammetry: Revisiting Chandler's 1999 paper on "Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research" – a synthesis. <https://doi.org/10.1177/0309133319832863>
- Feng, Q., Liu, J., & Gong, J. (2015). Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier-A case of yuyao, China. *Water (Switzerland)*, 7(4), 1437–1455. <https://doi.org/10.3390/w7041437>
- Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., & Dahe, Q. (Eds.). (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge). *Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- FINDETER. (2017). ESTUDIOS BASE PARA LA CIUDAD DE RIOHACHA, COLOMBIA. ESTUDIO DE CRECIMIENTO URBANO. Financiera de Desarrollo Territorial S.A.
- FINDETER SA. (2019). *Plan de Acción / Riohacha sostenible 2035, escenario de convergencia. Ciudades Sostenibles y Competitivas*.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421–430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Fraser, C. S., & Stamatopoulos, C. (2014). AUTOMATED TARGET-FREE CAMERA CALIBRATION. In *ASPRS Annual Conference*.
- Fundación CREACUA. (2014). PROYECTO ADAPTACIÓN URBANA FRENTE A INUNDACIONES CON EL SOPORTE DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA Y DEL SOFTWARE MODCEL EN RIOHACHA - LA GUAJIRA. Retrieved June 29, 2019, from <https://modcelrhcdatos.wixsite.com/modcel-riohacha/qu-es-el-proyecto>
- Gašparović, M., Seletković, A., Berta, A., & Balenović, I. (2017). The Evaluation of Photogrammetry-Based DSM from Low-Cost UAV by LiDAR-Based DSM. *South-East European Forestry*, 8(2), 117–125. <https://doi.org/10.15177/see-for.17-16>
- Gebrehiwot, A., Hashemi-Beni, L., Thompson, G., Kordjamshidi, P., & Langan, T. E. (2019). Deep convolutional neural network for flood extent mapping using unmanned aerial vehicles data. *Sensors (Switzerland)*, 19(7). <https://doi.org/10.3390/s19071486>
- Gilles, D., Young, N., Schroeder, H., Piotrowski, J., Chang, Y.-J., Gilles, D., ... Chang, Y.-J. (2012). Inundation Mapping Initiatives of the Iowa Flood Center: Statewide Coverage and Detailed Urban Flooding Analysis. *Water*, 4(1), 85–106. <https://doi.org/10.3390/w4010085>
- Gindraux, S., Boesch, R., & Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from Unmanned Aerial Vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*, 9(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs9020186>
- Giordan, D., Hayakawa, Y., Nex, F., Remondino, F., & Tarolli, P. (2018). Review article: the use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(18), 1079–1096.
- Giordan, D., Manconi, A., Remondino, F., & Nex, F. (2017). Use of unmanned aerial vehicles in monitoring application and management of natural hazards. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 1–4. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1315619>
- Gneeniss, a. S., Mills, J. P., & Miller, P. E. (2013). Reference Lidar Surfaces for Enhanced Aerial Triangulation and Camera Calibration. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W1(May), 111–116. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W1-111-2013>
- Goldbergs, G., Maier, S. W., Levick, S. R., & Edwards, A. (2018). Efficiency of individual tree detection approaches based on light-weight and low-cost UAS imagery in Australian Savannas. *Remote Sensing*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/rs10020161>

- Gomes Miguez, M., Peres Battemarco, B., Martins De Sousa, M., Moura Rezende, O., Pires Veról, A., Gusmaroli, G., ... Gusmaroli, G. (2017). Urban Flood Simulation Using MODCEL—An Alternative Quasi-2D Conceptual Model. *Water*, 9(6), 445. <https://doi.org/10.3390/w9060445>
- Gonzalez-Aguilera, D., & Rodriguez-Gonzalvez, P. (2017). Drones—An Open Access Journal. *Drones*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.3390/drones1010001>
- Gonzalez-Aguilera, D., López-Fernández, L., Rodriguez-Gonzalvez, P., Hernandez-Lopez, D., Guerrero, D., Remondino, F., & Gaiani, M. (2018). GRAPHOS – OPEN-SOURCE SOFTWARE FOR PHOTOGRAMMETRIC APPLICATIONS. *The Photogrammetric Record*, 33(March), 11–29. <https://doi.org/10.1111/phor.12231>
- Grammatikopoulos, L., Kalisperakis, I., Petsa, E., & Stentoumis, C. (2015). 3D city models completion by fusing lidar and image data. In F. Remondino & M. R. Shortis (Eds.) (Vol. 9528, p. 952800). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2184722>
- Granshaw, S. I. (2016). Photogrammetric Terminology: Third Edition. *Photogrammetric Record*, 31(154), 210–252. <https://doi.org/10.1111/phor.12146>
- GRASS GIS. (2014). Screenshots of raster data analysis. Retrieved September 2, 2019, from <https://grass.osgeo.org/screenshots/raster/>
- Gruen, A., Huang, X., Qin, R., Du, T., Fang, W., Boavida, J., & Oliveira, A. (2013). Joint Processing of Uav Imagery and Terrestrial Mobile Mapping System Data for Very High Resolution City Modeling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2(September), 4–6.
- Guerrero, D., Remondino, F., Menna, F., Nocerino, E., Toschi, I., Ballabeni, A., ... Orientation, I. (2016). DEVELOPMENT OF AN ALL-PURPOSE FREE PHOTOGRAMMETRIC TOOL. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS) Congress* (Vol. XLI, pp. 12–19). <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B6-31-2016>
- Guzmán Zabala, J. F., Paternina, J. M., & Rodríguez Cárdenas, J. A. (2018). Estudio comparativo de Aplicaciones Móviles (APP), en el error de medición con Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA). *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 78–88. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.603>
- Habib, A. F. (2013). Advanced Photogrammetric and Ranging Techniques. Retrieved from https://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/akam_531_outline_release-compatibility-mode.pdf
- Hamilton, S. (2018). More than pretty pictures: Drones , bison kills , and considerations of cultural landscapes. *Archaeological Survey of Alberta*, 38, 53–91.
- Harwin, S., Lucieer, A., & Osborn, J. (2015). The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sensing*, 7(9), 11933–11953. <https://doi.org/10.3390/rs70911933>
- Hasegawa, H., Matsuo, K., Koarai, M., Watanabe, N., & Masaharu, H. (2000). DEM Accuracy and the Base to Height (B/H) Ratio of Stereo Images. *ISPRS Archives. XIXth ISPRS Congress Technical Commission IV. Vol. XXXIII-B4, XXXIII(B4)*, 356–359.
- Hashemi-Beni, L., Jones, J., Thompson, G., Johnson, C., & Gebrehiwot, A. (2018). Challenges and opportunities for UAV-based digital elevation model generation for flood-risk management: A case of princeville, north carolina. *Sensors (Switzerland)*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/s18113843>
- Hassanalain, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91(May), 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
- Heidemann, H. K. (2018). *Lidar base specification (ver. 1.3, February 2018): U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 11, chap. B4*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/tm11b4>
- Heritage, G. L., Milan, D. J., Large, A. R. G., & Fuller, I. C. (2009). Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology*, 112(3–4), 334–344. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2009.06.024>
- Hernandez-Lopez, D., Felipe-Garcia, B., Gonzalez-Aguilera, D., & Arias-Perez, B. (2013). An Automatic Approach to UAV Flight Planning and Control for Photogrammetric Applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(1), 87–98. <https://doi.org/10.14358/pers.79.1.87>
- Herold, S. (2012). A Review of Geospatial Information Technology for Natural Disaster Management in Developing Countries. *International Journal of Applied Geospatial Research*, 3(June), 24–62. <https://doi.org/10.4018/jagr.2012040103>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- Hodgson, M., & Bresnahan, P. (2004). Accuracy of Airborne LIDAR Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget.”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(3), 331.

- Höhle, J., & Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003>
- Hong, Y., Bonhomme, C., Soheilian, B., Chebbo, G., Hong, Y., Bonhomme, C., ... Chebbo, G. (2017). Effects of Using Different Sources of Remote Sensing and Geographic Information System Data on Urban Stormwater 2D–1D Modeling. *Applied Sciences*, 7(9), 904. <https://doi.org/10.3390/app7090904>
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1–4), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00121-X)
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., & Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39(September 2011), 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>
- Huang, R., Zheng, S., Hu, K., Huang, R., Zheng, S., & Hu, K. (2018). Registration of Aerial Optical Images with LiDAR Data Using the Closest Point Principle and Collinearity Equations. *Sensors*, 18(6), 1770. <https://doi.org/10.3390/s18061770>
- Hugenholtz, Brown, O., Walker, J., Barchyn, T., Nesbit, P., Kucharczyk, M., & Myshak, S. (2016). Spatial accuracy of UAV-derived orthoimagery and topography: Comparing photogrammetric models processed with direct geo-referencing and ground control points. *Geomatica*, 70(1), 21–30. <https://doi.org/10.5623/cig2016-102>
- Hugenholtz, Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B. J., LeClair, A., ... Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.023>
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N. G., ... Mason, D. C. (2008). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 161(1), 13–30. <https://doi.org/10.1680/wama.2008.161.1.13>
- ICAO International Civil Aviation Organization. (2016). *REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEM (RPAS) CONCEPT OF OPERATIONS (CONOPS) FOR INTERNATIONAL IFR OPERATIONS*.
- IDEAM. (2015a). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011–2100 Herramientas Científica para los Tomadores de Decisione- Enfoque Nacional - Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- IDEAM. (2015b). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011–2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- IDEAM. (2019). CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS. Retrieved June 23, 2019, from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- IGAC. (2010). *Manual De Usuario Magna Sirgas Pro 3. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Colombia)*.
- Immerzeel, W. W., Kraaijenbrink, P. D. A., Shea, J. M., Shrestha, A. B., Pellicciotti, F., Bierkens, M. F. P., & De Jong, S. M. (2014). High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*, 150, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.025>
- Izumida, A., Uchiyama, S., & Sugai, T. (2017). Application of UAV-SfM photogrammetry and aerial LiDAR to a disastrous flood: multitemporal topographic measurement of a newly formed crevasse splay of the Kinu River, central Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, (2013), 1–22. <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-42>
- Jamali, B., Löwe, R., Bach, P. M., Urich, C., Arnbjerg-Nielsen, K., & Deletic, A. (2018). A rapid urban flood inundation and damage assessment model. *Journal of Hydrology*, 564(July), 1085–1098. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.064>
- James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., ... Lane, S. N. (2019). Guidelines on the use of Structure from Motion Photogrammetry in Geomorphic Research. *Earth Surface Processes and Landforms*, esp.4637. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- James, M. R., & Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1413–1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>
- James, M. R., Robson, S., D'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>

- James, M. R., Robson, S., & Smith, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769–1788. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
- James, T. D., Murray, T., Barrand, N. E., & Barr, S. L. (2006). Extracting photogrammetric ground control from lidar DEMs for change detection. *The Photogrammetric Record*, 21(116), 312–328. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00397.x>
- Jaud, M., Le Dantec, N., Delacourt, C., Grandjean, P., Passot, S., & Allemand, P. (2018). Suggestions to Limit Geometric Distortions in the Reconstruction of Linear Coastal Landforms by SfM Photogrammetry with PhotoScan® and MicMac® for UAV Surveys with Restricted GCPs Pattern. *Drones*, 3(1), 2. <https://doi.org/10.3390/drones3010002>
- Jaud, M., Passot, S., Bivic, R. Le, Delacourt, C., Grandjean, P., & Dantec, N. Le. (2016). Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan® and MicMac® in Sub-Optimal Survey Conditions. *Remote Sensing Technical*, 8, 465. <https://doi.org/10.3390/rs8060465>
- Jetten, V., Alkema, D. I., Van Westen, C. J., & Brussel, M. (2014). Development of the Caribbean Handbook on Disaster Risk Information Management. *Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards*, (November). <https://doi.org/10.13140/2.1.2489.7601>
- Jeunnette, M. N., & Hart, D. P. (2016). Remote sensing for developing world agriculture: opportunities and areas for technical development. In *Proceedings Volume 9998, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII*, 26–29. <https://doi.org/10.1117/12.2241321>
- K, J. M., Nna, M. M., S, T., & Tokłosa, W. S. (2015). Infrared building inspection with unmanned aerial vehicles, 3(3), 32–48. <https://doi.org/10.5604/05096669.1194965>
- Konecny, G. (2003). *Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems*. Taylor & Francis.
- Krupka M, Pender, G., Wallis S, Pb, S., & Mulet-Marti J. (2007). A RAPID FLOOD INUNDATION MODEL. In *Proceedings of the congress-international association for hydraulic research*. (p. Vol. 32, No. 1, 28).
- Kucharczyk, M., & Hugenholtz. (2019). Pre-disaster mapping with drones: an urban case study in Victoria, British Columbia, Canada. *Hazards Earth Syst. Sci*, 19, 2039–2051. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2039-2019>
- Kundzewicz. (2003). Extreme precipitation and floods in the changing world. *Proc. of the Symposium Water Resources Systems - Hydrological Risk, Management and Development*. IAHS Publ. No. 281, (281), 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.01.074>
- Kundzewicz, Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Kundzewicz, & Schellnhuber, H. J. (2004). Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31(1), 111–128. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000020257.09228.7b>
- Laks, I., Sojka, M., Walczak, Z., & Wróżyński, R. (2017). Possibilities of Using Low Quality Digital Elevation Models of Floodplains in Hydraulic Numerical Models. *Water*, 9(4), 283. <https://doi.org/10.3390/w9040283>
- Lane, S. N., James, T. D., & Crowell, M. D. (2000). Application of Digital Photogrammetry to Complex Topography for Geomorphological Research. *The Photogrammetric Record*, 16(95), 793–821. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00152>
- Langhammer, J., Bernsteinová, J., & Mirijovský, J. (2017). Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring. *Water*, 9(11), 861. <https://doi.org/10.3390/w9110861>
- Lee, J.-M., Park, J.-Y., & Choi, J.-Y. (2013). Evaluation of Sub-aerial Topographic Surveying Techniques Using Total Station and RTK-GPS for Applications in Macrotidal Sand Beach Environment. *Journal of Coastal Research*, 65, 535–540. <https://doi.org/10.2112/SI65-091.1>
- Leitão, & de Sousa, L. M. (2018). Towards the optimal fusion of high-resolution Digital Elevation Models for detailed urban flood assessment. *Journal of Hydrology*, 561(December 2017), 651–661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.043>
- Leitão, Vitry, M. M. De, Scheidegger, A., & Rieckermann, J. (2016). Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20(4), 1637–1653. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1637-2016>
- Li, J., & Wong, D. W. S. (2010). Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(3), 251–261. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2009.11.002>

- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., & Chandra, S. (2007). LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *GeoInformatica*, 11(1), 37–53. <https://doi.org/10.1007/s10707-006-0005-9>
- López-Cuervo Estévez, S. (1980). *Fotogrametría*. Madrid.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, 60(2), 91–110.
- Lumban-Gaol, Y. A., Murtiyoso, A., & Nugroho, B. H. (2018). INVESTIGATIONS ON THE BUNDLE ADJUSTMENT RESULTS FROM SFM-BASED SOFTWARE FOR MAPPING PURPOSES. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLII(June 2018), 4–7.
- Magtalas, M. S. L. Y., Aves, J. C. L., & Blanco, A. C. (2016). GEOREFERENCING UAS DERIVATIVES THROUGH POINT CLOUD REGISTRATION with ARCHIVED LIDAR DATASETS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W1), 195–199. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-195-2016>
- Malinowski, R., Groom, G. B., Heckrath, G., & Schwanghart, W. (2017). Do Remote Sensing Mapping Practices Adequately Address Localized Flooding? A Critical Overview. *Springer Science Reviews*, 5(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40362-017-0043-8>
- Manfré, L. A., Hirata, E., Silva, J. B., Shinohara, E. J., Giannotti, M. A., Larocca, A. P. C., & Quintanilha, J. A. (2012). An Analysis of geospatial technologies for risk and natural disaster management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(2), 166–185. <https://doi.org/10.3390/ijgi1020166>
- Manfreda, S., Herban, S., Arranz Justel, J., Perks, M., Mullerova, J., Dvorak, P., & Vuono, P. (2019). Assessing the Accuracy of Digital Surface Models Derived from Optical Imagery Acquired with Unmanned Aerial Systems. *Drones*, 3(1), 15. <https://doi.org/10.3390/drones3010015>
- Manfreda, S., McCabe, M. F., Miller, P. E., Lucas, R., Madrigal, V. P., Mallinis, G., ... Toth, B. (2018). On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote Sensing*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/rs10040641>
- Manfreda, S., & Samela, C. (2019). A DEM-based Method for a Rapid Estimation of Flood Inundation Depth. *Journal of Flood Risk Management*, (April). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12541>
- Masini, N., Coluzzi, R., & Lasaponar, R. (2011). On the Airborne Lidar Contribution in Archaeology: from Site Identification to Landscape Investigation. *Laser Scanning, Theory and Applications*. <https://doi.org/10.5772/14655>
- McCabe, M. R., Alsdorf, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., ... Wood, E. F. (2017). The Future of Earth Observation in Hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3879–3914.
- McCullagh, M. J. (1988). TERRAIN AND SURFACE MODELLING SYSTEMS: THEORY AND PRACTICE. *The Photogrammetric Record*, 12(72), 747–779. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1988.tb00627.x>
- McGrath, H., Bourgon, J. F., Proulx-Bourque, J. S., Nastev, M., & Abo El Ezz, A. (2018). A comparison of simplified conceptual models for rapid web-based flood inundation mapping. *Natural Hazards*, 93(2), 905–920. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3331-y>
- McGrath, H., Proulx-Bourque, J.-S., Bourgon, J.-F., Nastev, M., & El Ezz, A. A. (2018). A Comparison of Rapid DTM Based Approaches for on-Demand Flood Inundation Mapping. In *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 8397–8400). <https://doi.org/10.1109/igarss.2018.8517772>
- Measham, T. G., Preston, B. L., Smith, T. F., Brooke, C., Gorddard, R., Withycombe, G., & Morrison, C. (2011). Adapting to climate change through local municipal planning: barriers and challenges. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(8), 889–909. <https://doi.org/10.1007/s11027-011-9301-2>
- Mertz et al. (2009). Adaptation to Climate Change in Developing Countries. *Environmental Management*, (February 2009), 743–752. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9259-3>
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., & Edleman, S. (2008). Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608–620. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:7\(608\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(608))
- Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, M. (2007a). Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. In *Flood risk management in Europe* (pp. 231–251). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3>
- Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, M. (2007b). FLOOD RISK MAPPING AT THE LOCAL SCALE: CONCEPTS AND CHALLENGES. In *Flood risk management in Europe* (p. 231–251). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3>
- Merz, B., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., ... Nied, M. (2014). Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management. *Natural Hazards and*

- Earth System Sciences*, 14(7), 1921–1942. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
- Mesas-Carrascosa, F. J., Clavero Rumbao, I., Torres-Sánchez, J., García-Ferrer, A., Peña, J. M., & López Granados, F. (2017). Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2161–2176. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1249311>
- MESSNER, F., & MEYER, V. (2007). FLOOD DAMAGE, VULNERABILITY AND RISK PERCEPTION – CHALLENGES FOR FLOOD DAMAGE RESEARCH. In *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures* (pp. 149–167). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4598-1_13
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Geomorphological Techniques*, 2, 1–12.
- Miguez, M. G., Mascarenhas, F. C. B., Canedo de Magalhães, L. P., & D’Alterio, C. F. V. (2009). Planning and Design of Urban Flood Control Measures: Assessing Effects Combination. *Journal of Urban Planning and Development*, 135(3), 100–109. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000012)
- Miller, C. L. (1957). The Spatial Model Concept of Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 23, 31–35.
- Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., & Delworth, T. L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415(6871), 514–517. <https://doi.org/10.1038/415514a>
- Mitasova, H., & Neteler, M. (2004). GRASS as Open Source Free Software GIS: Accomplishments and Perspectives. *Transactions in GIS*, 8(2), 145–154. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2004.00172.x>
- Mitishita, E., Habib, A., Centeno, J., Machado, A., Lay, J., & Wong, C. (2008). Photogrammetric and Lidar Data Integration Using the Centroid of Rectangular Roof as a Control Point. *The Photogrammetric Record*, 23(March), 19–35.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hidrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(September 1990), 3–30.
- Murhy, R. (2019). *USE OF SMALL UNMANNED AERIAL SYSTEMS FOR EMERGENCY MANAGEMENT OF FLOODING*.
- Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Börlin, N., Vandermeersch, J., & Freville, T. (2018). Open Source and Independent Methods for Bundle Adjustment Assessment in Close-Range. *Drones*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.3390/drones2010003>
- Musa, Z. N., Popescu, I., & Mynett, A. (2015). A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9), 3755–3769. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3755-2015>
- Naciones Unidas. (2016). Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles | PNUD. Retrieved September 11, 2019, from <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>
- Nardi, F., Tramutoli, V., Refice, A., Manfreda, S., & Samela, C. (2018). Advances in Large-Scale Flood Monitoring and Detection. *Hydrology*, 5(3), 49. <https://doi.org/10.3390/hydrology5030049>
- Nardini, A., Cardenas Mercado, L., & Pérez Montiel, J. (2018). MODCEL vs. IBER: a comparison of flooding models in Riohacha, a coastal town of La Guajira, Colombia. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(66), 3253–3266. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.87336>
- Nardini, A., & Miguez, M. G. (2016). An integrated plan to sustainably enable the City of Riohacha (Colombia) to cope with increasing urban flooding, while improving its environmental setting. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3), 198. <https://doi.org/10.3390/su8030198>
- Nartiss, M. (2015). r.lake.xy module. Retrieved July 9, 2018, from <https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/r.lake.html>
- Nasir, S., Iqbal, I. A., Ali, Z., & Shahzad, A. (2015). Accuracy assessment of digital elevation model generated from pleiades tri stereo-pair. In *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 193–197). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAST.2015.7208340>
- Nelson, A., Reuter, H. I., & Gessler, P. (2009). Chapter 3 DEM Production Methods and Sources. *Developments in Soil Science*, 33, 65–85. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00003-2)
- Nesbit, P. R., & Hugenholtz. (2019). Enhancing UAV – SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. *Remote Sensing*, 11(239), 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs11030239>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Nguyen, P., Sorooshian, S., Thorstensen, A., Tran, H., Huynh, P., Pham, T., ... Braithwaite, D. (2017). Exploring trends through “rainsphere”: Research data transformed into public knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(4), 653–658. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0036.1>

- Niño Soto, A., & Luque Henríquez, A. (2017). Análisis de patrones territoriales que determinan el urbanismo divergente: símbolos espaciales en el Distrito especial, turístico y cultural de Riohacha. In *3er. Coloquio Internacional Pensar Contemporáneo de Doctorados en Estudios Territoriales y Afines*. Manizales (Colombia): Universidad de Caldas.
- NOAA. (2012). *Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center.
- Oky Dicky Ardiansyah, P., & Yokoyama, R. (2002). DEM generation method from contour lines based on the steepest slope segment chain and a monotone interpolation function. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(1–2), 86–101. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00117-X)
- Ollero Ojeda, A. (2014). *Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores*. Zaragoza: Contrato de río del Matarraña, ECODES.
- Olson, K. G., & Rouse, L. M. (2016). A Beginner 's Guide to Mesoscale Survey with Quadrotor-UAV Systems. *Advances in Archaeological Practice*, 6(4), 357–371. <https://doi.org/10.1017/aap.2018.26>
- Oniga, V., Breaban, A., & Statescu, F. (2018). Determining the optimum number of ground control points for obtaining high precision results based on UAS images. *Proceedings*, 2(April), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05165>
- Oniga, V., & Diac, M. (2013). Metric and non-metric cameras calibration for the improvement of real-time monitoring process results. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(4), 719–726. <https://doi.org/10.30638/eemj.2013.088>
- Open SteetMap Colombia. (2016). Mapatón por La Guajira - OpenStreetMap Colombia. Retrieved February 5, 2019, from <https://openstreetmapcolombia.github.io/2016/03/23/reporte/>
- Osti, R., Tanaka, S., & Tokioka, T. (2008). Flood hazard mapping in developing countries: Problems and prospects. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 17(1), 104–113. <https://doi.org/10.1108/09653560810855919>
- Özdemir, E., & Remondino, F. (2019). Classification of aerial point clouds with deep learning. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XLII, pp. 10–14). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-103-2019>
- Pabón-Caicedo, J. D., & Alarcón-Hincapié, J. C. (2016). THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON ARID AND SEMI-ARID AREAS OF COLOMBIA. *ИнтерКарто/ИнтерГИС*, 22(1)(April), 56–62. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2016-1-22-56-62>
- Pacheco Prado, D. (2017). Drone in urban spaces: Study case in parks, gardens and built heritage of Cuenca. *Estoa*, 6(11), 159–168. <https://doi.org/10.18537/est.v006.n011.a12>
- Padró, J.-C., Carabassa, V., Balagué, J., Brotons, L., Alcañiz, J. M., & Pons, X. (2019). Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery. *Science of The Total Environment*, 657, 1602–1614. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.156>
- Padró, J., Muñoz, F., Planas, J., & Pons, X. (2019). Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 75(November 2018), 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.018>
- Park, J., Kim, P., Cho, Y. K., & Kang, J. (2019). Framework for automated registration of UAV and UGV point clouds using local features in images. *Automation in Construction*, 98, 175–182. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2018.11.024>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(2), 439–473.
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2018). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.10.009>
- Pepe, M., Fregonese, L., & Scaioni, M. (2018). Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 412–435. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444945>
- Peralta-Carreta, C., Solórzano, J. V., & Fernández-Montes de Oca, A. Gallardo-Cruz, J. A. (2016). Sistemas aéreos pilotados de forma remota y clasificación orientada a objetos: un acercamiento al análisis submétrico de una zona periurbana. *Ecosistemas*, 25(1), 90–93. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-1.13>
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos: el Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha Colombia. *Información Tecnológica*, 29(4), 143–156.
- Pérez, J. I., Nardini, A., & Zuñiga, Y. P. (2018). Identificación Multiatributo de Tipologías de Viviendas Vulnerables a Inundaciones en Riohacha, La Guajira-Colombia. *Información Tecnológica*, 29(5),

- 187–202. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000500187>
- Pérez, J. L., Mozas, A. T., López, A., Aguilar, F. J., Delgado, J., Fernández, I., & Aguilar, M. A. (2012). Efficient methods to convert LiDAR-derived ellipsoid heights to orthometric heights. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18(1), 573–578. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.019>
- Persad, R. A., Armenakis, C., Hopkinson, C., & Brisco, B. (2017). Automatic registration of 3-D point clouds from UAS and airborne LiDAR platforms. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 5(4), 159–177.
- Pix4D SA. (2017). *Pix4Dmapper 4.1 USER MANUAL*. Lausanne, Switzerland: Pix4D SA.
- Polat, N., & Uysal, M. (2018). An Experimental Analysis of Digital Elevation Models Generated with Lidar Data and UAV Photogrammetry. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(7), 1135–1142. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0760-8>
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. (Universidad de Extremadura. Servicio de Publicaciones, Ed.).
- Remondino, F., & Golkar, A. (2019). AERIAL POINT CLOUD CLASSIFICATION WITH DEEP LEARNING AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XLII, pp. 12–14).
- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., & Menna, F. (2017). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W5), 591–599. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>
- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), 144–166. <https://doi.org/10.1111/phor.12063>
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... Rafaj, P. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Ricciulli-Marin, D., Arismendi, C., & Romero, E. (2018). La pobreza en Riohacha: diagnóstico, análisis y propuestas. *Banco de La Republica de Colombia. Documento de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*, No. 275.
- Rinaldi, P., Larrabide, I., & D'Amato, J. P. (2019). Drone Based DSM Reconstruction for Flood Simulations in Small Areas: A Pilot Study. In Á. Rocha, H. Adeli, L. Reis, & S. Costanzo (Eds.), *New Knowledge in Information Systems and Technologies. WorldCIST'19 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 930 (pp. 758–764). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16181-1_71
- Ríos, D. M. (2010). Urbanización de áreas inundables, mediación técnica y riesgo de desastre: Una mirada crítica sobre sus relaciones. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43(47), 27–43. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022010000300002>
- Romanos, P., Lovatto, M., & Bibiana, R. (2018). Criterios y recomendaciones para selección de software aplicativos para drones. In *Congreso Argentino de AgroInformática* (pp. 49–62).
- Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M., Mazzone, F., & Capra, A. (2017). Combining nadir and oblique uav imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 211–221. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1313097>
- Roze, A., Zufferey, J.-C., Beyeler, A., & McClellan, A. (2014). *eBee RTK Accuracy Assessment. White Paper*.
- Ruzgiene, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskiene, E., & Aksamitauskas, V. Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 619–627. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.018>
- San, B. T., & Süzen, M. L. (2005). Digital elevation model (DEM) generation and accuracy assessment from ASTER stereo data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(22), 5013–5027. <https://doi.org/10.1080/01431160500177620>
- Sánchez Rodríguez, L. (2003). *Determinación de la superficie vertical de referencia para Colombia*. Technische Universität Dresden.
- Sanders, B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1831–1843. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.005>
- Sanz-ablanedo, E., & Chandler, J. H. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>
- Sari, H., & Osman, O. (2019). DETERMINING THE SPATIAL EFFECTS OF QUARRIES USING A

- DRONE: THE CASE OF THE SULEYMANPASA-TEKIRDAG QUARRIES. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(1), 53–61.
- Schenk, T. (2005). Introduction to Photogrammetry. Columbus.
- Schumann, G. J.-P., & Bates, P. D. (2019). The need for a high-accuracy, open-access global DEM. *Frontiers in Earth Science*, 7(December), 1–4. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00033>
- Schumann, G. J.-P., Muhlhausen, J., Andreadis, K. M., Schumann, G. J.-P., Muhlhausen, J., & Andreadis, K. M. (2019). Rapid Mapping of Small-Scale River-Floodplain Environments Using UAV SfM Supports Classical Theory. *Remote Sensing*, 11(8), 982. <https://doi.org/10.3390/rs11080982>
- Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M. E. J., Black, A., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2008). Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(3), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.09.004>
- Scorzini, A. R., Radice, A., & Molinari, D. (2018). A new tool to estimate inundation depths by spatial interpolation (RAPIDE): Design, application and impact on quantitative assessment of flood damages. *Water (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/w10121805>
- Secretaría de Planeación - Distrito de Riohacha. (2018). *Rehabilitación de redes de tuberías de alcantarillado “Barrio Arriba” del municipio de Riohacha (Colombia)*.
- Sefercik, U. G., Karakis, S., Bayik, C., Alkan, M., & Yastikli, N. (2014). Contribution of normalized DSM to automatic building extraction from HR mono optical satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1), 575–591. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20144732>
- Şerban, G., Rus, I., Vele, D., Breţcan, P., Alexe, M., & Petrea, D. (2016). Flood-prone area delimitation using UAV technology, in the areas hard-to-reach for classic aircrafts: case study in the north-east of Apuseni Mountains, Transylvania. *Natural Hazards*, 82(3), 1817–1832. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2266-4>
- Serifoglu Yilmaz, C., Yilmaz, V., & Güngör, O. (2018). Investigating the performances of commercial and non-commercial software for ground filtering of UAV-based point clouds. *International Journal of Remote Sensing*, 00(00), 1–27. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420942>
- SESAR. (2018). Providing Operations of Drones with Initial Unmanned Aircraft System Traffic Management (PODIUM). Retrieved May 31, 2019, from <https://vimeo.com/259880175>
- Shaad, K., Ninsalam, Y., Padawangi, R., & Burlando, P. (2016). Towards high resolution and cost-effective terrain mapping for urban hydrodynamic modelling in densely settled river-corridors. *Sustainable Cities and Society*, 20, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.005>
- Shan, J., & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning : principles and processing*. CRC Press.
- Sherwood, C. R., Warrick, J. A., Hill, A. D., Ritchie, A. C., Andrews, B. D., & Plant, N. G. (2018). Rapid, Remote Assessment of Hurricane Matthew Impacts Using Four-Dimensional Structure-from-Motion Photogrammetry. *Journal of Coastal Research*, 34(6), 1303. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00016.1>
- Šiljeg, A., Barada, M., Marić, I., & Roland, V. (2019). The effect of user-defined parameters on DTM accuracy—development of a hybrid model. *Applied Geomatics*, 11(1), 81–96. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0243-1>
- Simpkins, G. (2017). Hydrology: Increasing river flood risk. *Nature Climate Change* 2017 7:3.
- Singh, K. K., & Frazier, A. E. (2018). A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5078–5098. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420941>
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 247–275.
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2015). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 247–275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- Smith, M. W., & Vericat, D. (2015). From experimental plots to experimental landscapes: Topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1656–1671. <https://doi.org/10.1002/esp.3747>
- Sona, G., Pinto, L., & Pagliari, D. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images, 97–107. <https://doi.org/10.1007/s12145-013-0142-2>
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J. L., Romero, F., & Alcayaga, H. (2009). Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal*, 54(6), 1053–1067. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.6.1053>

- Stereńczak, K., Ciesielski, M., Balazy, R., & Zawila-Niedźwiecki, T. (2016). Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LIDAR data in dense mountain forests. *European Journal of Remote Sensing*, 49(1), 599–621. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20164932>
- Stöcker, C., Bennett, R., Nex, F., Gerke, M., & Zevenbergen, J. (2017). Review of the current state of UAV regulations. *Remote Sensing*, 9(5), 33–35. <https://doi.org/10.3390/rs9050459>
- Stöcker, C., Ho, S., Nkerabigwi, P., Schmidt, C., Koeva, M., Bennett, R., & Zevenbergen, J. (2019). Unmanned Aerial System imagery, land data and user needs: A socio-technical assessment in Rwanda. *Remote Sensing*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/rs11091035>
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., & Gerke, M. (2019). Uav-based cadastral mapping: An assessment of the impact of flight parameters and ground truth measurements on the absolute accuracy of derived orthoimages. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2/W13), 613–617. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-613-2019>
- Sweeney, C. (2016). Structure from Motion (SfM) — Theia Vision Library. Retrieved November 29, 2018, from http://theia-sfm.org/sfm.html#_CPPv24View
- Taud, H., Parrot, J.-F., & Alvarez, R. (1999). DEM generation by contour line dilation. *Computers & Geosciences*, 25(7), 775–783. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00019-9)
- Teknomo, K. (2015). Similarity measurement. Retrieved June 24, 2018, from <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/Similarity/BrayCurtisDistance.html>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- Teng, J., Vaze, J., Dutta, D., & Marvanek, S. (2015). Rapid Inundation Modelling in Large Floodplains Using LiDAR DEM. *Water Resources Management*, 29(8), 2619–2636. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0960-8>
- Thieken, A., & Merz, B. (2006). Methods for flood risk assessment: concepts and challenges. *International Workshop on Flash Floods in Urban Areas*, (May 2016).
- Tonkin, T. N., & Midgley, N. G. (2016). Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(9), 16–19. <https://doi.org/10.3390/rs8090786>
- Toschi, I., & Remondino, F. (2018). Geomatics Mapping of Natural Hazards : Overview and Experiences, *XLII*(March), 18–21. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-505-2018>
- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>
- Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Nino. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–2778. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)
- Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., & Fitzgibbon, A. W. (2000). Bundle Adjustment — A Modern Synthesis. In *Vision Algorithms: Theory and Practice* (pp. 298–372). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21
- Tsakiris, G. (2014). Flood risk assessment: Concepts, modelling, applications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(5), 1361–1369. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1361-2014>
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing*, (December). <https://doi.org/10.3390/rs4051392>
- Ullman, S. (1979). The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character. Royal Society (Great Britain)*, 203(1153), 405–426. <https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006>
- United Nations. (2015). World Population Prospects - Population Division. Retrieved November 8, 2018, from <https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/>
- Universidad Politécnica de Madrid. (2015). *NUEVAS TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL DE SOPORTE A LA MODELIZACIÓN DE PROCESOS DE INUNDACIÓN. APLICACIÓN AL DISTRITO DE LA GUAJIRA (COLOMBIA). Proyecto AL15-PID-29.*
- Universidad Politécnica de Madrid. (2016). *TECNOLOGÍAS RPAS APLICADAS A LA ADQUISICIÓN DE MDT Y MDS REQUERIDOS EN LA MODELIZACIÓN DE PROCESOS DE INUNDACIÓN. APLICACIÓN AL DISTRITO DE LA GUAJIRA (COLOMBIA). Proyecto COOP-XVI-13.* Madrid.
- USGS, U. S. G. S. (2017). *National Unmanned Aircraft Systems (UAS) Project Office.*
- Vargas, G. (2016). Efectos del cambio climático en el Caribe colombiano. In Universidad Externado de Colombia (Ed.), *Cambio climático. lecciones de y para ciudades de américa latina* (p. 74).
- Vargas, G., Hernández, Y., & Pabón, J. D. (2018). La Niña Event 2010 – 2011 : Hydroclimatic Effects and Socioeconomic Impacts in Colombia. In *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk*

- Reduction* (pp. 217–232). Springer, Cham.
- Vasi, D., Bulatovi, T., Suši, V., & And Markovi, Z. (2014). Terrain Mapping by Applying Unmanned Aerial Vehicle and Lidar System for the Purpose of Designing in Serbia. In *6th International Conference on Engineering Surveying (INGEO 2014)*. (p. 217). Prague, Czech republic.
- Vengoechea, A., Rojano, R., & Arregoces, H. (2018). Dispersión y Concentración de Aerosoles Marinos PM 10 en una Ciudad Costera del Caribe Dispersion and Concentration of PM 10 Particles in a Caribbean Coastal City. *Información Tecnológica*, 26(6), 123–130. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000600123>
- Visockiene, J. S., Brucas, D., & Ragauskas, U. (2014). Comparison of UAV images processing softwares. *Journal of Measurements in Engineering*, 2(2), 111–121.
- Wang, S., Ren, Z., Wu, C., Lei, Q., Gong, W., Ou, Q., ... Li, C. (2019). DEM generation from Worldview-2 stereo imagery and vertical accuracy assessment for its application in active tectonics. *Geomorphology*, 336, 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.016>
- Wechsler, S. P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), 1481–1500. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>
- Wedajo, G. K. (2017). LiDAR DEM Data for Flood Mapping and Assessment; Opportunities and Challenges: A Review. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 6(4), 2015–2018. <https://doi.org/10.4172/2469-4134.100021>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179(June 2018), 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wild, G., Murray, J., Baxter, G., Wild, G., Murray, J., & Baxter, G. (2016). Exploring Civil Drone Accidents and Incidents to Help Prevent Potential Air Disasters. *Aerospace*, 3(3), 22. <https://doi.org/10.3390/aerospace3030022>
- Wiseman, D., & van der Sluijs, J. (2019). Alternative Methods for Developing and Assessing the Accuracy of UAV-Derived DEMs. In *Geospatial Intelligence: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 1175–1196). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8365-3.ch011>
- Xiaoye Liu. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31–49. <https://doi.org/10.1177/0309133308089496>
- Yalcin, E. (2018). Two-dimensional hydrodynamic modelling for urban flood risk assessment using unmanned aerial vehicle imagery: A case study of Kirsehir, Turkey. *Journal of Flood Risk Management*, (November 2018). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12499>
- Yan, K. (2015). *Low-cost Space-borne Data for Inundation Modelling*: ETH ZURICH.
- Yan, K., Di Baldassarre, G., Solomatine, D. P., & Schumann, G. J.-P. (2015). A review of low-cost space-borne data for flood modelling: topography, flood extent and water level. *Hydrological Processes*, 29(15), 3368–3387. <https://doi.org/10.1002/hyp.10449>
- Yao, H., Qin, R., & Chen, X. (2019). Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications - A review. *Remote Sensing*, 11(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs11121443>
- Yilmaz, V., Konakoglu, B., Serifoglu, C., Gungor, O., & Gökalp, E. (2018). Image classification-based ground filtering of point clouds extracted from UAV-based aerial photos. *Geocarto International*, 33(3), 310–320. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1250825>
- Yurtseven, H. (2019). Comparison of GNSS-, TLS- and Different Altitude UAV-Generated Datasets on The Basis of Spatial Differences. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 175. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040175>
- Zazo, S., Rodríguez-González, P., Molina, J. L., González-Aguilera, D., Agudelo-Ruiz, C. A., & Hernández-López, D. (2018). Flood hazard assessment supported by reduced cost aerial precision photogrammetry. *Remote Sensing*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/rs10101566>
- Zečević, Ž., Popović, T., Member, S., & Krstajić, B. (2017). Cloud Based Solution for Automatic Image Mosaicking and Georeferencing. In *22nd International Scientific-Professional Conference Information Technology 2017* (pp. 177–180).
- Zhang, J., & Lin, X. (2017). Advances in fusion of optical imagery and LiDAR point cloud applied to photogrammetry and remote sensing. *International Journal of Image and Data Fusion*, 8(1), 1–31. <https://doi.org/10.1080/19479832.2016.1160960>
- Zona Cero (en prensa). (2019). Más de 20 barrios inundados en Riohacha por las lluvias de las últimas horas | Zona Cero. Retrieved October 9, 2019, from <http://zonacero.com/generales/mas-de-20-barrios-inundados-en-riohacha-por-las-lluvias-de-las-ultimas-horas-128449>

ANEXOS

Anexo A1. Fundamentos de fotogrametría con RPAS.

A1.1. Fotogrametría: Conceptos generales

La fotogrametría es una técnica de captura de información precisa de superficies u objetos a distancia que se concentra en la interpretación cuantitativa de imágenes por sensores pasivos, complementaria a técnicas cualitativas como la teledetección (Chuvieco Salinero, 2008). Etimológicamente fotogrametría viene del griego *φως, φωτός* "photos" que significa luz, *γράμμα* "gramma" que significa dibujo o escritura, y *μέτρον* "metron", que significa medir. Lo que significa "medir sobre lo escrito por la luz", o realizar mediciones a partir de imágenes. El objeto de la fotogrametría es la transformación del espacio proyectivo cónico que constituye el fotograma (imagen en perspectiva adquirida) a un espacio de planos acotados de proyección ortogonal o vista en planta (López-Cuervo Estévez, 1980). Al conjunto de operaciones necesarias para llevar dicha transformación es conocido como restitución fotogrametría (Domínguez & Belda, 2003). Por medio de la aplicación de principios de estereoscopia, equivalente a la visión binocular del ojo humano, es posible obtener una noción precisa de la profundidad y las dimensiones de los elementos en relieve cuando se utilizan como mínimo dos imágenes consecutivas y superpuestas de una misma zona obtenidas a partir de cámaras calibradas (Miller, 1957). Así, la fotogrametría como parte de la teledetección, tiene la finalidad de producir productos 3D a partir de imágenes 2D (Toth & Józków, 2016). Los productos fotogramétricos incluyen información altimétrica como curvas de nivel y modelos digitales aplicables en sistemas de información geográfica S.I.G (Konecny, 2003).

Según Konecny (2003) son 4 etapas diferenciadas en la historia de la fotogrametría y su desarrollo: **a) Metrofotografía** (1850 – 1900): iniciada con la invención de la fotografía por Niepce y Daguerre en 1839 en Francia, y en la que aparece el término Metrofotografía, ideado por el coronel francés Laussedat hacia 1851; a quien se considera el fundador de la Fotogrametría. **b) Fotogrametría analógica** (1900 – 1960): etapa que arranca con dos desarrollos cruciales, la estereoscopia, que da origen a la estereofotogrametría y la aviación como plataforma para la adquisición de imágenes con los sensores (cámaras). **c) Fotogrametría analítica** (1960 – ¿2000?): etapa marcada por la aparición de ordenadores que facilitaban el cálculo y el restituidor analítico. Por último, **d) Fotogrametría digital** (1980 –): etapa iniciada por la carrera aeroespacial de satélites de origen ruso (Sputnik) y estadounidense (Landsat), y la aparición de imágenes de digitales de alta resolución de plataformas satelitales y aerotransportadas. En esta etapa

aparecen las estaciones fotogramétricas digitales y se desarrollan técnicas automáticas de correlación de puntos comunes entre imágenes (Bay & Ess, 2008; Lowe, 2004)

Respecto al punto de toma de las imágenes, la fotogrametría se suele dividir en: (i) Fotogrametría **de objeto cercano** (terrestre), en la que las imágenes son tomadas desde el suelo y en la que el eje óptico de la toma es horizontal, paralelo al terreno. El punto de vista permanece fijo durante la toma de imágenes, (Micheletti, Chandler, & Lane, 2015), esta fue una de las primeras aplicaciones desarrolladas en fotogrametría, actualmente es muy usada en arquitectura, gestión del patrimonio, arqueología y zoología. (ii) **Fotogrametría aérea**, en la que el eje óptico, en la mayoría de los casos, tiene una orientación perpendicular al terreno. Suelen utilizarse imágenes adquiridas desde una cámara colocada en una aeronave. El punto de vista está en movimiento y es desconocida su ubicación siendo más complicado la generación de modelos. Este tipo de fotogrametría es la utilizada para la producción cartográfica a escala regional o nacional. Cuando la plataforma que alberga el sensor orbita alrededor de la tierra se denomina **Fotogrametría espacial**, la cual utiliza imágenes tomadas desde satélites.

Según el procedimiento para resolver los problemas metodológicos planteados, la fotogrametría se suele dividir en: (i) **Fotogrametría analógica** que resuelve los principios de restitución por elementos ópticos y mecánicos, empleando fotografía analógica requiriendo un operador para explotar la información. (ii) **Fotogrametría analítica** en el que coexisten el restituidor analógico convencional, el operador y la información se genera de forma digital, por medio de equipos similares a los de dibujo asistido por computador. Y por último (iii) la **Fotogrametría digital**, la más reciente y en continuo desarrollo en el cual se prescinde del restituidor fotogramétrico por el ordenador utilizando programas especializados de procesamiento de imágenes digitales. Las imágenes son importadas al programa de fotogrametría, requiriendo que el operador que identifica los puntos comunes entre imágenes o bien que este proceso se realice de forma automatizada (correlación de píxeles). En los últimos años el trabajo requerido del operador fotogramétrico se ha visto notablemente reducido ya que los desarrollos tecnológicos en materia de reconocimientos de imágenes e inteligencia artificial, han permitido automatizar todo el proceso fotogramétrico. En la actualidad esta disciplina se encuentra fuertemente influenciada por desarrollos tecnológicos de otras disciplinas tales como la aviación, las tecnologías aeroespaciales, sensores, la Visión Artificial.

En la figura 1 se representa esquemáticamente el proceso para la obtención de la posición proyectada de un punto B y su altura A_b a partir de posiciones B_1 y B_2 del punto en dos fotogramas sucesivos.

Figura Anexo 1. Operación de restitución (Fuente: Domínguez and Belda 2003)

Conociendo mediante triangulación aérea la altura de vuelo A_x , geometría interna de la cámara y posición de cada fotograma, se puede obtener geométricamente la posición del punto B, que marca tanto la altura A_b respecto de la línea de referencia del fotograma como la posición B_p proyección ortogonal del punto B sobre cada uno de los fotogramas. En resumen, si se tiene un objeto o una superficie difícil de medir directamente pero que puede ser fotografiado, es posible reconstruir su modelo estereoscópico, lográndose posteriormente efectuar mediciones sobre este de forma precisa (Miller, 1957).

El principio fotogramétrico básico se basa en la condición de colinealidad. El procesamiento fotogramétrico analítico clásico se dan varios pasos (Quirós, 2014): i) se efectúa la transformación del sistema de coordenadas píxel, de la imagen adquirida o escaneada, a sistema de coordenadas cartesiano expresado en milímetros. Datos conocidos como el punto principal (central) en la imagen y distancia focal de la cámara es crucial para dicha transformación, este proceso se denomina Orientación Interna. ii) Se identifican puntos homólogos en cada imagen para reconstruir los haces que permiten generar un modelo estereoscópico, este proceso es conocido como Orientación relativa (condición de coplanariedad). iii) El proceso de escalar y trasladar el modelo a su verdadera posición en el espacio con la ayuda puntos de apoyo medidos (georreferenciación) en el terreno en un determinado sistema de coordenadas, el cual se denomina Orientación Absoluta. El conocimiento de las coordenadas de puntos identificados en las imágenes, así como las direcciones del eje de la cámara fotogrametría,

resuelven el problema de la restitución. Un paso alternativo, la Orientación Exterior, ocurre cuando la orientación relativa y absoluta se hace en un solo paso, obteniéndose directamente la transformación de coordenadas de píxeles en imagen al sistema de coordenadas en el terreno mediante la condición de colinealidad. La fotogrametría SfM con RPAS aplica la condición de colinealidad para el cálculo de las orientaciones interna y externa de las cámaras.

A1.2. Diseño de vuelos fotogramétrico con RPAS

El objetivo de la planificación del vuelo fotogramétrico con RPAS es asegurar la cobertura del área a ser cartografiada a una resolución deseada para proveer productos geoespaciales planimétricos y altimétricos. Es necesario el diseño de un esquema que representa el espaciado entre las imágenes sucesivas, la ubicación de las líneas de vuelo y el inicio y final de la misión de forma automatizada (Hernandez-Lopez, Felipe-Garcia, Gonzalez-Aguilera, & Arias-Perez, 2013). La misión (vuelo y adquisición de datos) normalmente se planifica en gabinete con un programa dedicado, conocimiento del área de interés, de nivel de detalle o de escala requerida, y conocimiento de la cámara digital utilizada. Según la *International Civil Aviation Organization* ICAO (2016), un RPAS es un conjunto de elementos o sistema configurable, compuesto por una plataforma aérea pilotada a distancia, estación de piloto remoto, enlaces de comando y control para la operación (figura 2), en nuestro caso, un vuelo fotogramétrico.

Figura Anexo 2. Tipos de plataformas RPAS (Ala fija y Multirotor y sistemas de componentes de posicionamiento satelital y sensores inerciales. Fuente: Elaboración propia.

Los RPAS cuentan con sensores y microprocesadores que facilitan la ejecución asistida por el sistema de piloto automático que controla la misión estipulada por el piloto. Para levantamientos fotogramétricos, la gran mayoría de equipos cuentan con unidades de posicionamiento satelital GPS/GNSS de precisión métrica y sistemas inerciales necesarios para la georreferenciación directa de imágenes y registro de los ángulos de la cámara en los tres ejes (alabeo ω , cabeceo ϕ , y guiñada κ) al momento de la toma. Es decir, permiten conocer la posición de la aeronave y de la imagen durante la ejecución al mismo tiempo que su ubicación respecto a la estación de control desde donde se realiza el seguimiento de la plataforma. Los geodatos de las imágenes digitales (posición cámara y ángulos de la imagen) son almacenados junto con las imágenes, bajo el formato de

archivo intercambiable *.exif, para posteriormente ser usados como referencia inicial en la estimación de los parámetros internos y posición de las imágenes en el procesamiento fotogramétrico.

Al igual que el enfoque fotogramétrico aéreo clásico, para la generación de ortoimágenes y modelos altimétricos a partir de un vuelo RPAS, se deben determinar parámetros básicos del diseño: i) Altura de vuelo y tamaño de píxel, ii) % de recubrimientos entre imágenes y iii) tiempo de vuelo.

i) Altura de vuelo y tamaño del píxel en terreno (GSD): Para determinar los parámetros técnicos del vuelo, es necesario conocer el objetivo del estudio que motiva el levantamiento RPAS, aplicación de los productos, superficie a cubrir, tipo de plataforma y el nivel de detalle requerido, lo cual afecta a la altura de vuelo en función de las características del sensor disponible. Esto define la mínima unidad cartografiada en el terreno o el tamaño del píxel de la imagen *Ground Sample Distance* (GSD). Para un cubrimiento mayor de área se recurre a plataformas tipo ala fija, mientras plataformas multirrotor son usualmente empleadas para pequeñas superficies (Boon, Drijfhout, & Tesfamichael, 2017). Si se demanda una elevada precisión deberemos ir a plataformas multirrotor, ya que las de tipo ala fija al tener que operar a velocidades o alturas más altas, las precisiones son menores si se compara con los productos altimétricos derivados de un multirrotor (Nex & Remondino, 2014).

Por lo anterior, en condiciones reales de operación y bajo restricciones presupuestarias, es necesario encontrar un equilibrio entre nivel de detalle y el área a cubrir, siendo necesario aumentar el GSD para cubrir un área requerida. Una vez definidos los requerimientos del vuelo, se procede al cálculo de los parámetros de la misión del vuelo RPAS, es decir, diseñar un plan específico de vuelo para las necesidades requeridas, principalmente la altura de vuelo bajo dos alternativas:

Alternativa 1: Fijar la altura sobre el terreno y calcular el GSD a obtener.

Alternativa 2: Fijar el valor de GSD que se desea y determinar la altura sobre el terreno.

En ambos escenarios tenemos que tener en cuenta la relación entre el tamaño de píxel en el sensor, la focal, la altura de vuelo y el GSD. Esta relación queda definida en la figura 3a. Los datos de tamaño del sensor y de la imagen, así como la distancia focal, son básicos para los cálculos necesarios en la planificación del vuelo. En la figura 3b se presentan la relación existente entre el tamaño del sensor y la imagen.

Figura Anexo 3. (a) Relación entre el tamaño del píxel, distancia focal, altura de vuelo y GSD. (b) Relación entre el tamaño de un sensor de cámara digital con el tamaño de la imagen.

Para la figura 3a, puede observarse que la relación existente entre los parámetros dentro del espacio de la cámara (tamaño del píxel Tp en el sensor y distancia focal f) y los existentes entre los del espacio al objeto (GSD y altura de vuelo H), son iguales que los que existen entre triángulos semejantes. Por consiguiente, el GSD se calcula de acuerdo con la ecuación A1:

$$GSD = \frac{Tp * H}{f} \quad \text{Ec. A1}$$

El tamaño del píxel Tp (figura 3b), se obtiene al comparar el tamaño del sensor (en unidades métricas) con el tamaño de la imagen (en píxeles), como se puede ver en la ecuación A2.

$$Tp = \frac{As}{Ai} = \frac{Hs}{Hi} \quad \text{Ec. A2}$$

Donde As es el ancho del sensor, Ai el ancho de la imagen, Hs es la altura del sensor y Hi la altura de la imagen.

ii) Solapamientos entre imágenes: Adicionalmente a la altura del vuelo y GSD, el % de solapamiento frontal como longitudinal es un parámetro prioritario de diseño para la generación del par estereoscópico que dará origen al modelo 3D. El objetivo de fijar los solapamientos es garantizar que la geometría de los haces de rayos sea adecuada para poder determinar con precisión las coordenadas de los puntos hallados automáticamente entre imágenes. Por ello, el solapamiento debe ser optimo, ya que una geometría incorrecta del diseño de vuelo puede llevar errores elevados en altimetría, es decir, elevados % de solapamientos como se muestra en la figura 4b (Hasegawa, Matsuo, Koarai, Watanabe, & Masaharu, 2000; USGS, 2017). Para fotogrametría con RPAS se sugiere solapamientos laterales entre el 60 % y máximo 80 % para una correcta

reconstrucción tridimensional en los modelos (Nex & Remondino, 2014; Pepe, Fregonese, & Scaioni, 2018).

Figura Anexo 4. Solapamientos entre imágenes y su relación con la altura de vuelo. (a) Solapamientos frontales y longitudinales en un vuelo RPAS fotogramétrico de rejilla simple. (b) Ratio entre Altura (H)/FotoBase y su impacto en el error en Z: El ratio B' (derecha) para un menor error en Z debe estar entre 1: 2.3 y 1: 5.2. La proporción 1: 7.2 equivale a un solapamiento lateral del 90% que supone altos errores (Izquierda).

Usualmente un vuelo RPAS fotogramétrico sigue el típico vuelo en rejilla como mostrado en la figura 4a, sin embargo, para los levantamientos en los que se requiere tomar información de fachadas y construcciones de forma más detallada, se efectúa la toma de imágenes oblicuas para la modelación 3D de edificios o patrimonio. El tipo y diseño de vuelo tiene un impacto notable en los resultados, mejorando el procesamiento y precisiones en los productos añadiendo vuelos combinados en formato de rejilla doble e imágenes oblicuas (Mike R. James & Robson, 2014; Manfreda et al., 2019; Nesbit & Hugenholtz, 2019).

iii) Tiempo de vuelo: Fijada la velocidad de crucero en el RPAS, se obtiene una estimación del tiempo de vuelo para el área a cubrir. En el caso de no contar con suficiente energía suministrada por la batería de la plataforma para cubrir toda la superficie de interés, es necesario ejecutar la misión en varios vuelos. Una limitante importante de los RPAS es el tiempo de vuelo de la aeronave, principalmente condicionado por factores internos como la capacidad de los baterías y externos como la velocidad del viento (Boon et al., 2017; Manfreda et al., 2018). Las misiones para modelos detallados y precisos requieren generalmente de altos solapamientos y vuelos de baja altitud, por lo general con un número alto de vuelos, requiriendo el uso extra de baterías. Los vuelos rápidos para levantamientos de gestión de emergencias requieren que se registren amplias áreas en pocos minutos a resoluciones más bajas o GSD altos (Boccardo et al., 2015; Nex &

Remondino, 2014; Toschi & Remondino, 2018), normalmente, requiriéndose muy pocos vuelos. Todos los parámetros básicos de vuelo (GSD, altura de vuelo y % de solapamientos) se calculan y ajustan en gabinete según el objetivo del levantamiento fotogramétrico. Posteriormente en campo, la planificación del vuelo es cargado en la plataforma, enlazando la información con los sistemas de navegación y sensores mediante Tableta PC u ordenador. En el Anexo 2 se describen detalladamente los parámetros de diseño de los vuelos fotogramétricos.

A1.3. Plataformas RPAS, cámaras y sistema autopiloto

La planificación del vuelo fotogramétrico RPAS requiere conocer: i) el tipo de plataforma a utilizar e instrumentación, en este caso, ii) características de la cámara digital y iii), un sistema autopiloto.

i) Tipo de plataforma: Como se observa en la figura 5 son dos los tipos de plataforma RPAS: las plataformas tipo multirotor y las plataformas tipo ala fija.

Figura Anexo 5. Componentes típicos de un RPAS comercial: (a) Multirotor y (b) Ala fija. (Fuentes: Adaptado de DroneDeploy 2017)

Las plataformas tipo multirotor (figura 5a) son los más utilizados para crear mapas y modelos en aplicaciones fotogramétricas cuando es requerido un alto nivel de detalle (Boon et al., 2017; Colomina & Molina, 2014; Olson & Rouse, 2016). Se componen de un cuerpo central y de múltiples rotores con hélices permitiendo la sustentación y control. Suelen ser cuadricópteros, pero pueden tener hasta seis u ocho rotores (hexacoptero y octocoptero). Una vez en el aire, las hélices controlan el movimiento de la aeronave variando la velocidad relativa de cada rotor. Las plataformas tipo ala fija (figura 5b) están diseñadas como las aeronaves tripuladas convencionales (Beard et al., 2005; Boon et al., 2017). La aeronave consiste en una superficie de ala rígida de perfil determinado haciendo posible el vuelo al generar sustentación debido a la velocidad de desplazamiento. Por lo general están constituidas por un cuerpo central que tiene dos alas y una sola hélice. Una vez en el aire, las dos alas generan una elevación que compensa su peso, lo que permite que la aeronave permanezca en vuelo (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

En la figura 6 se muestran varios modelos RPAS de ala fija y multirotor comerciales empleados actualmente en el campo de la topografía para levantamientos fotogramétricos (Casagrande, 2018; DroneDeploy, 2017).

Figura Anexo 6. Algunas de las principales plataformas RPAS comerciales más populares a la fecha (año 2019). En la Tabla Anexo 1 se describen los nombres de las plataformas RPAS.. Las fuentes de las fotografías se encuentran en la Tabla Anexo 2.

Las plataformas RPAS comerciales para fines fotogramétricos se clasifican en términos de su peso máximo al despegue. Plataformas *Mini* y *Micro*, es decir, aquellas menores de 2 kg de peso (Hassanalian & Abdelkefi, 2017), se encuentran dentro del límite legal de operación en la mayoría de normativas en el mundo (Stöcker et al. 2017).

Tabla Anexo 1. Detalle de las plataformas RPAS descritas gráficamente en la Figura 6.

Modelo RPAS	Información técnica ampliada (Fuente: Página web del fabricante)
Multirrotor	
(a) DJI Phantom 3 Advanced	https://www.dji.com/es/phantom-3-adv/info
(b) DJI Phantom 4 RTK	https://www.dji.com/phantom-4-rtk
(c) DJI Inspire 1	https://www.dji.com/es/inspire-1
(d) DJI M200/2010	https://www.dji.com/es/matrice-200-series
(e) DJI Matrice 100 (sin sensor)	https://www.dji.com/es/matrice100
(f) Leica Aibot X6 (descontinuado)	https://www.instop.es/aibotix/airbotx6.php
(g) Mikrokopter® Hexa	http://www.mikrokopter.de/en/easyKopter_en
(h) Intel Falcon 8	https://www.intel.com/content/www/us/en/products/drones/falcon-8.html
Ala Fija	
(i) Delair UX11	https://delair.aero/professional-drones-2/professional-mapping-drone-delair-ux11-2/
(j) SenseFly Ebee Classic	https://www.sensefly.com/drone/ebec-mapping-drone
(k) SenseFly eBee X	https://www.sensefly.com/drone/ebec-x
(l) Intel Sirius	https://www.intel.com/content/www/us/en/products/drones/sirius-pro.html

Las ventajas que ofrece un determinado tipo de plataforma y su instrumentación, dependen de las especificaciones del producto fotogramétrico requerido, así como como GSD, extensión, resolución espacial y precisión requerida. Las ventajas o desventajas y desventajas que los hacen más adecuados dependiendo la aplicación del producto geoespacial derivado (Duncan & Murphy, 2015). La Tabla Anexo 2 es un resumen de ventajas y desventajas de las plataformas RPAS visto desde la perspectiva de explotación comercial.

Tabla Anexo 2. Resumen de ventajas y desventajas para tipos ala fija y multirrotor. (Fuente: DroneDeploy 2017)

Característica del RPAS	Multirrotor *	Ala Fija *
Maniobrabilidad	✓	X
Precio	✓	X
Tamaño/Portabilidad	✓	X
Facilidad de Uso	✓	X
Alcance	X	✓
Estabilidad	X	✓
Capacidad de carga	✓	X
Recuperación segura ante baja batería	X	✓
Área requerida para Aterrizaje/Despegue	✓	X
Eficiencia para vuelos en rejilla y con suficiente recubrimiento	✓	X

* Ventaja ✓. Desventaja X.

ii) Cámaras y sensores empleados en RPAS: La cámara como instrumentación de un RPAS para fines fotogramétricos es el componente más importante del sistema. La figura 7 muestra cámaras RGB propias o independientes del equipo RPAS comercialmente más difundidas.

La cámara contiene el sensor digital para la captura de radiación con diferentes longitudes de onda a través del espectro electromagnético. Los sensores que registran el espectro visible (RGB) son los de uso más común. También se suelen hacer registros en el espectro infrarrojo cercano (NIR), especialmente útiles para el estudio de la vegetación y en el espectro térmico en el infrarrojo lejano, especialmente utilizados para la inspección de edificaciones (K, Nna, S, & Tokłosa, 2015; Peralta-Carreta, Solórzano, & Fernández-Montes de Oca, A. Gallardo-Cruz, 2016). Las imágenes derivadas de sensores RGB de bajo costo como instrumentos métricos de captura de imágenes RPAS, son los más utilizados en misiones fotogramétricas para fines cartográficos y de apoyo a S.I.G. por usuarios civiles (Barazzetti et al., 2014; Coveney & Roberts, 2017; Singh & Frazier, 2018). Este tipo de imagen visible se produce utilizando el sensor de la cámara digital incorporada en la mayoría de los drones disponibles en el mercado hoy día (Toth &

Józków, 2016). También existen cámaras independientes del RPAS utilizado, existiendo la posibilidad de utilizar cámaras de bajo costo o sensores especializados siempre que no se sobrepase la capacidad de máxima de carga de la plataforma.

Figura Anexo 7. Algunas cámaras/sensores RGB empleados en fotogrametría con RPAS. Cámaras propias del RPAS: (a) DJI Phantom 3 Advanced, (b) DJI Phantom 4 Pro; Cámaras propias intercambiables: (c) DJI ZENMUSE X7, (d) DJI ZENMUSE X5; Cámaras independientes del RPAS (e) Sony Alpha 7rII, (f) Canon IXUS 125 HS, (g) Canon S110 RGB/RE/NIR, (h) SenseFly S.O.D.A.

Las cámaras compactas montadas en RPAS pueden generar distorsiones importantes de las lentes con el correr del tiempo por factores como temperatura/presión, vibraciones y otros aspectos que introducen errores sistemáticos en comparación con las cámaras métricas. Estos errores han de ser minimizados mediante un proceso de calibración externo o interno de las cámaras (Mike R. James & Robson, 2014; Oniga & Diac, 2013). En contraste, las cámaras métricas de elevando costo colocadas en aeronaves tripuladas, están sujetas a menores variaciones en las distorsiones del sensor y lentes, cuentan con certificados de calibración y, por tanto, son mucho más precisas para aplicaciones fotogramétricas (Toschi & Remondino, 2018). En la Tabla Anexo 3 se presenta una comparativa entre cámaras métricas y no métricas.

La calidad de la imagen digital depende del tamaño píxel y dimensiones del sensor, de la calidad constructiva de la cámara y de las condiciones de luminosidad. Por tanto, todos estos aspectos inciden en la calidad de los productos fotogramétricos derivados de las imágenes adquiridas (USGS, 2017). La distancia focal de la cámara debe permanecer fija durante todas las tomas. Tiene que ser de un tamaño tal que proporcione un ángulo amplio de la escena en modo retrato, siendo esta captura la más común en RPAS cuya dirección de vuelo se da paralela al eje corto de la imagen (figura 4a). En contraste, en vuelos tripulados con cámaras métricas la captura suele realizarse en modo paisajístico y la dirección de vuelo se da paralela al eje más largo de la imagen.

Tabla Anexo 3. Ventajas y Desventajas de las cámaras métricas y no métricas en fotogrametría (Habib, 2013)

Cámaras métricas	Cámaras no métricas
Calibración en Laboratorio precisa ✓*	Bajo costo ✓
Formato de imagen amplio ✓	Facilidad de integración con otros sistemas (LiDAR) ✓
Menor distorsión en lentes ✓	Conveniente para cubrir áreas pequeñas y RPAS ✓
Estabilidad de los parámetros internos de la cámara ✓	Deben ser calibradas por el usuario final ✗**
Calidad geométrica de la imagen significativamente alto ✓	Calidad geométrica de la imagen y lentes inferiores ✗
Alto costo de adquisición inicial ✗	Estabilidad de los parámetros internos de la cámara no garantizados ✗
No fácil de integrar con otros sistemas (LiDAR) ✗	Limitado tamaño del sensor ✗

* Ventaja ✓. ** Desventaja ✗

iii) Sistema autopiloto: Finalmente, el sistema de navegación, generalmente llamado piloto automático o autopiloto (Chao, Cao, & Chen, 2010), se compone del soporte físico (p. ej., <http://pixhawk.org/>) y el programa dedicado requerido para la ejecución del vuelo, permitiendo realizar las misiones de acuerdo al diseño y comunicación con la estación de control (Hernandez-Lopez et al., 2013).

Durante el vuelo, la plataforma RPAS envía la telemetría de datos en tiempo real a la estación de control en tierra mediante un protocolo de comunicación denominado MAVlink (Campion, Ranganathan, & Faruque, 2018). Adicionalmente, durante la adquisición de imágenes el autopiloto registra y almacena de forma continua la información de los parámetros de vuelo. El autopiloto se encarga del geoetiquetado de cada imagen adquirida almacenándolo en formato *.exif. Este geoetiquetado compuesto de la posición y la orientación de cada imagen, es crucial para el posterior procesamiento con el método fotogramétrico SfM. Los parámetros de vuelo comunes para el monitoreo del RPAS son comúnmente la posición, la velocidad, la altitud/distancia, los observables GNSS, el estado de la batería, la velocidad aeronave, el número de fotos adquiridas entre

otros. Durante toda la misión de vuelo, el piloto RPAS debe hacer seguimiento de los parámetros de vuelo, principalmente los niveles de batería, asegurándose del cumplimiento de la trayectoria del vuelo fotogramétrico. En cualquier momento, el piloto puede decidir retornar al punto de lanzamiento el RPAS si considera que existe un riesgo para otros usuarios del espacio aéreo, abortando la misión y activando el retorno automático de la plataforma. En la figura 8 se muestra la salida gráfica de cuatro programas para el diseño y operación de vuelos RPAS más empleados en el mercado e industria RPAS.

Figura Anexo 8. Programa para el diseño y operación de vuelos RPAS más empleados en el mercado: (a) PiX4D Capture, (b) DroneDeploy, (c) Universal Ground Control Station UGCS y (d) SenseFly eMotion.

Una vez diseñado el plan de vuelo, es necesario un análisis de la consistencia del mismo con la topografía del área, pronósticos locales climatológicos, estimación del riesgo de riesgos y cumplimiento de regulaciones aéreas locales. El operador y el piloto tienen que tener conocimiento de los posibles riesgos y prever las posibles actuaciones a realizar en caso de que exista algún problema. Además, los aspectos normativos condicionan en muchos casos la planificación y ejecución del vuelo, haciendo imposible la ejecución de un vuelo RPAS, por ejemplo, en zonas altamente pobladas y próxima a aeropuertos o aeródromos donde la normativa local es sumamente estricta (Claudia Stöcker et al., 2017). Los RPAS tienen aspectos adicionales que requieren mayor consideración, incluido el nivel de habilidad del piloto, las características de la plataforma y las condiciones ambientales del vuelo, ello puede afectar a las características de los datos y al procesamiento de imágenes (Manfreda et al., 2018).

A1.4. Cadena de procesamiento fotogramétrico SfM y oferta programas.

Es creciente la oferta de algoritmos para la reconstrucción 3D en programas SfM comerciales y de código abierto. Estas aplicaciones integran las técnicas SfM y el Ajuste de Haces en una cadena de procesamiento con interfases gráficas (figura 9).

Figura Anexo 9. Salida grafica de una cadena de procesamiento de un proyecto fotogramétrico SfM (Ejemplo Pix4D): (a) Punto de enlace homólogo detectado automáticamente en una secuencia de imágenes (cruz verde). (b) Visualización de la posición y orientación de las imágenes, se observan la nube dispersa de puntos calculados en el terreno mediante SfM, y los haces(magenta) del bloque de imágenes al punto de enlace. Adicionalmente se observa la nube ajustada a un GCP. (c) Vista de la nube densa de puntos generada por algoritmos de correlación de vista múltiple MVS.

Los códigos de fotogrametría SfM basados en técnicas de Visión Artificial trabajan en su mayoría siguiendo el flujo de trabajo para el procesamiento SfM que se presenta en la figura 9. Los pasos de la cadena de procesamiento fotogramétrico SfM son:

Paso 1. Procesamiento inicial

- 1.1. Detección de puntos de enlace (homólogos) en la textura de superficial del objeto.
- 1.2. Emparejamiento o “Matching” de los puntos de enlace en diferentes imágenes
- 1.3. Orientación relativa de las cámaras dentro de una escena.

Paso 2. Procesamiento inicial

- 2.1. Ajuste de Haces del bloque de imágenes: autocalibrado de los parámetros internos de la cámara (geometría: Focal, Punto Principal) y orientación relativa (nube de puntos dispersa de puntos de enlace).

2.2. Georeferenciación (orientación externa): Determinado los puntos de control en terreno o agregando información acerca de la escala, es decir, resolver la orientación absoluta por medio del ajuste de los parámetros de orientación interna y externa basados en puntos de control. Con los parámetros internos y externos (etapas 4 y 5) son ingresados al programa de fotogramétrico SfM para la reoptimización de las imágenes RPAS.

Paso 3. Densificación nube de puntos.

Generación de la nube densa de puntos basados en técnicas de emparejamiento de imágenes como los métodos de correlación de vista múltiple MVS *multi-view stereo matching* (Fabio Remondino et al., 2014).

Paso 4. Generación de productos.

4.1. Clasificación de la nube densa de puntos por métodos semiautomáticos o automatizados (Serifoglu Yilmaz, Yilmaz, & Güngör, 2018).

4.1. Interpolación de la nube densa de puntos tridimensional (Heritage et al., 2009)

4.3. Generación de productos MDS y MDT (rasterización de modelos 3D) y ortomosaicos de la escena de vuelo.

El producto básico del proceso fotogramétrico SfM es un modelo tridimensional reconstruido basado en una nube de puntos generada a partir de características identificadas (puntos de enlace) en una serie de imágenes adquiridas por plataformas RPAS. Los programas citados contienen la capacidad de, a partir de la nube densa de puntos clasificada o sin clasificar, derivar productos de elevación vectorial (TIN), así como de la generación de productos ráster, como son los modelos de superficie o modelos del terreno. Las herramientas de detección automática del terreno en la nube son una ventaja, pero requieren de tiempo y esfuerzo no despreciable en ajustar los parámetros de filtrado del terreno a las condiciones locales (Becker et al. 2018; Yilmaz et al., 2018).

La cadena de procesamiento fotogramétrico SfM ofrece una ventaja extremadamente importante frente a los métodos tradicionales (Westoby et al., 2012), haciendo accesible la fotogrametría para la generación de productos geospaciales. La Tabla Anexo 4 es una revisión del estado actual de la oferta de programa que contienen la técnica de fotogrametría SfM básicamente orientado al proceso de imágenes RPA para tres grupos básicos de aplicaciones SfM: programa, comerciales y gratuitos.

Tabla Anexo 4. Programas de fotogrametría SfM comerciales (C) o gratuitos (G) para el procesamiento de imágenes adquiridas a partir de RPAS y referencias en la literatura especializada

Código SfM	C G	Características generales	Referencias científicas
iWitnessPRO™	✓	Programa para la medición y modelado 3D basados en imágenes, optimizado para generar automáticamente modelos de superficies digitales, ortoimágenes y mallas de 3D a partir de imágenes RPAS. https://www.iwitnessphoto.com/iwitnesspro_photogrammetry_programa/	(Fraser & Stamatopoulos, 2014)
PhotoModeler™	✓	Programa comercial SfM de modelado 3D por comparación de imágenes, y de bajo costo de la casa Eos Systems (Canadá). Permite el uso de GCP para identificación manual o codificados https://www.photomodeler.com/pm-applications/uas/	(Micheletti et al., 2015)
PhotoScan®	✓	Programa comercial SfM y de correlación de imágenes de la empresa rusa Agisoft. Puede incorporar GCP manual o de forma automatizada. https://www.agisoft.com/features/professional-edition/	(Anai et al., 2015; Coveney & Roberts, 2017; Jaud et al., 2016, 2018; Lumban-Gaol, Murtiyoso, & Nugroho, 2018; Murtiyoso, Grussenmeyer, Börlin, Vandermeersch, & Freville, 2018; Sona, Pinto, & Pagliari, 2014)
Pix4D®	✓	Programa comercial SfM y de correlación de imágenes suiza centrada en aplicaciones RPAS. Puede incorporar GCP. También prestan servicios de procesamiento en la nube (Pix4D Cloud) https://www.pix4d.com/industry/surveying-mapping	(Rossi, Mancini, Dubbini, Mazzone, & Capra, 2017; Sona et al., 2014; C. Stöcker, Nex, Koeva, & Gerke, 2019; Visockiene, Brucas, & Ragauskas, 2014)
MicMac APERO	✓	Programa libre de correlación de puntos comunes entre imágenes del instituto geográfico francés (IGN). No incluye reconstrucción de superficie. Es recomendable para usuarios avanzados en fotogrametría. Puede incluir el uso GCP. https://micmac.ensg.eu/index.php/Apero	(Jaud et al., 2016; Fabio Remondino et al., 2017)
SF3M	✓	Interfaz para la fotorreconstrucción 3D basada en herramientas de programa libre SfM (VisualSfM, sfm_georef y CloudCompare) ofreciendo un flujo de trabajo completo para usuarios no expertos. Permite el ingreso de GCP. http://sf3mapp.csic.es/	(Castillo, James, Pérez, & Gómez, 2015)
GRAPHOS	✓	Interfaz gráfica de usuario de código abierto de fotogrametría SfM que integra códigos libres como APERO y Bunbler. Incluye reconstrucción de superficie y Permite el ingreso de GCP. https://github.com/itos3d/GRAPHOS	(Gonzalez-Aguilera, López-Fernández, L., Rodríguez-Gonzálvez, P., Hernández-Lopez, D., Guerrero, Remondino, & Gaiani, 2018; Guerrero et al., 2016)
Trimble Inpho® UASMaster	✓	Solución completa de procesamiento fotogramétrico para generación de productos geoespaciales de la casa comercial Trimble optimizado para imágenes provenientes de RPAS y fotogrametría terrestre. https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-inpho-uasmaster	(Abdel-Wahab, Wenzel, & Fritsch, 2012; Hugenholtz et al., 2013)
iWitnessPRO-V4	✓	Solución completa de procesamiento fotogramétrico (Photometrix) a partir de cámaras compactas de bajo costo desde tierra o plataformas RPAS. https://www.photometrix.com.au/iwitnesspro-v4/	(Fraser & Stamatopoulos, 2014)
Topcon® Image MasterUAS	✓	Solución fotogrametría de la casa Topcon pensada para fotogrametría aérea tripulada pero optimizada para imágenes RPAS y de objeto cercano (Terrestre) https://www.topconpositioning.com/programa-solutions/mass-data-mapping/magnet-collage	(Anai et al., 2012, 2015)

Tabla Anexo 5. Continuación Tabla 11 Códigos de fotogrametría SfM pagos (P) o gratuitos (G) para el procesamiento de imágenes adquiridas a partir de RPAS y citas en la literatura especializada.

Código SfM	P	G	Características generales	Referencias científicas
ERDAS IMAGINE Photogrammetry™	✓		Programa de HEXAGON GEOSPATIAL. Puede crear un proyecto de fotogrametría directamente en ERDAS con el paquete de fotogrametría IMAGINE Photogrammetry https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/imagine-photogrammetry	(Lumban-Gaol et al., 2018)
WebODM	✓		Es una interfaz en línea de ODM (Open Drone Map) para el procesamiento de imágenes de RPAS. Genera mapas georreferenciados, nubes de puntos y modelos 3D texturizados.	(Delgado-Vera, Aguirre-Munizaga, Jiménez-Icaza, Manobanda-Herrera, & Rodríguez-Méndez, 2017; C. Stöcker et al., 2019)
DroneDeploy®	✓		Solución de procesamiento SfM de imágenes RPAS en la nube optimizado para la generación de productos geoespaciales reconstruidos (Ortomosaicos, MDEs y índices temáticos y cálculos volumétricos). Acepta el ingreso de GCP. https://www.dronedeploy.com/	(Guzmán Zabala, Paternina, & Rodríguez Cárdenas, 2018)
PrecisionMapper®	✓	✓	PrecisionMapper es un servicio de fotogrametría SfM de la casa PrecisionHawk que procesa automáticamente imágenes adquiridas por RPAS en productos 2D o 3D. https://www.precisionhawk.com/precisionmapper	(Duncan & Murphy, 2015)
ESRI Drone2Map for ArcGIS™	✓		Marca registrada de la casa ESRI para la reconstrucción de modelos 3D y orto imágenes específicas para RPAS en el ambiente de ArcGIS. https://www.esri.es/producto/drone2map/	(Sari & Osman, 2019)
Maps Made Easy®	✓	✓	Aplicación en la nube que permite a los usuarios cargar fotos aéreas, generar ortomosaicos, reconstrucción de modelos 3D y almacenarlos para su divulgación y visualización. https://www.mapsmadeeasy.com/	(Hamilton, 2018; Pacheco Prado, 2017; Zečević, Popović, Member, & Krstajić, 2017)
3DF Zephyr Pro®	✓	✓	3DF Zephyr es un programa comercial de fotogrametría y modelado 3D. https://www.3dflow.net/3df-zephyr-free/	(Oniga, Breaban, & Statescu, 2018; Romanos, Lovatto, & Bibiana, 2018)
Autodesk ReCap™ Photo	✓		Módulo específico de Autodesk® para el procesamiento fotogramétrico en la nube de imágenes RPAS (hasta 1000 fotos) en productos 3D para ser usados en AutoCAD Civil 3D o InfraWorks. https://www.autodesk.com/products/recap/overview	(Peña-Villasenín, Gil-Docampo, & Ortiz-Sanz, 2018)
ERDAS IMAGINE Photogrammetry™	✓		Solución completa de procesamiento fotogramétrico de la casa comercial Hexagon Geospatial.	(Lumban-Gaol et al., 2018)
Altizure	✓	✓	Plataforma en línea para la generación de modelos 3D y ortofotos de fotogrametría de imágenes RPAS	(Guzmán Zabala et al., 2018; Pacheco Prado, 2017)
PHOTOMOD UAS	✓		Programa fotogramétrico orientado a RPAS, permitiendo al usuario procesar y adquirir productos fotogramétricos de valor agregado: DEM, vectores 2D y 3D, ortomosaicos. http://www.racurs.ru/?page=806	(Goldbergs, Maier, Levick, & Edwards, 2018)
DroneMapper®	✓		Aplicación en la nube para el mosaico automático de imágenes, generación de productos 3D y su georreferenciación. https://dronemapper.com/	(Zečević et al., 2017)

Anexo A2. Cálculo de parámetros de la imagen y diseño teórico de vuelos RPAS.

Determinación de los datos técnicos de las imágenes a obtener. Una vez establecidos los parámetros del vuelo a realizar hay que determinar las características de las imágenes que vamos a obtener. Para ello tendremos que calcular:

- Área a cubrir por el vuelo. Si consideramos una zona de interés rectangular de anchura A_t y altura H_t , la superficie total (S_t) a volar será:

$$S_t = A_t.H_t$$

- Distancia en el terreno cubierta por la anchura de una foto. Fijado o calculado el GSD, y conocido el ancho A_i píxeles de la foto, la anchura de este en el terreno (A_f) es:

$$A_f = A_i.GSD$$

- Escala de la imagen. Fijado o calculado el GSD (Aerial Survey Base, 2019), y conocido el tamaño del píxel en el sensor en μm o mm (T_p), la escala de la imagen es:

$$\text{Escala} = GSD/T_p$$

- Distancia en el terreno cubierta por la altura de una foto. Si se ha fijado o calculado el GSD y sabemos que cada foto tiene de altura H_i píxeles, su altura en el terreno (H_f) es:

$$H_f = H_i.GSD$$

- Área cubierta por una foto. Cada foto cubrirá la siguiente superficie del terreno:

$$S_f = A_f.H_f$$

Determinación de los parámetros técnicos del vuelo. Establecidos los parámetros del vuelo y las características de las imágenes que vamos a obtener, se pueden calcular los parámetros técnicos del vuelo.

- Fotobase. fotobase (F_b) es la distancia entre la posición del centro de proyección al tomar una imagen y la posición del centro de posición de la siguiente (figura 10).

Figura Anexo 10 Fotobase (Fb) a área de solapamiento

Dado que el avance el vuelo se realiza por el lado corto de la fotografía, la fotobase (Fb) se puede determinar en función de la altura de la foto (Hf) y del solapamiento frontal (P). tal como se presenta en la figura 11.

Figura Anexo 11. Determinación de la fotobase

La fotobase (Fb) será igual a:

$$Fb = Hf \cdot (1 - P)$$

- Distancia entre pasadas. Se denomina distancia entre pasadas (Dp) a la distancia que hay entre la posición del centro de proyección al tomar una imagen de una pasada y la posición del centro de proyección al tomar una imagen contigua en la siguiente pasada. Dado que entre una pasada y la siguiente, la cámara se ha desplazado por el lado de la fotografía, la fotobase (Dp) se puede determinar en función de la anchura de la foto (Af) y del solapamiento lateral (Q). tal como se presenta en la figura 12.

Figura Anexo 12. Determinación de la distancia entre pasadas.

La distancia entre pasadas (D_p) será igual a:

$$D_p = A_f \cdot (1 - Q)$$

- Número de fotos por pasada. Como se conoce la longitud de cada pasada es posible determinar el número de fotos que se harán en cada pasada. En el caso de que el terreno a volar será rectangular y que las pasadas se hagan siguiendo el lado más largo del terreno, el número de fotos por pasada (N_p), será igual a:

$$N_p = (A_t / F_b) + 1$$

- Número de pasadas. Si se conocen las dimensiones del territorio a volar, la dirección de las pasadas y la distancia entre pasadas se puede calcular el número de pasadas. En el caso de que el terreno a volar será rectangular y que las pasadas se hagan siguiendo el lado más largo del terreno, el número de pasada (N_q), será igual a:

$$N_q = (H_t / D_b) + 1$$

- Número total de fotografías a tomar. En el caso de que el terreno a volar será rectangular el número total de fotos a tomar (N_f) será:

$$N_f = N_p \cdot N_q$$

- Intervalo entre disparos. Es el tiempo que transcurre entre la toma de una foto y la siguiente. Si conocemos la distancia entre los centros de proyección (F_b) y la velocidad que lleva la aeronave (V_a), se puede determinar fácilmente tiempo entre disparos (I_d):

$$I_d = F_b / V_a$$

- Tiempo de vuelo para adquirir las fotos. El tiempo necesario para adquirir todas las fotografías (T_v) del trabajo se puede calcular fácilmente a partir del número de fotos (N_f) y el intervalo entre disparos (I_d):

$$T_v = N_f \cdot I_d$$

- Número de vuelos. Es la cantidad de vuelos a realizar (N_v) y se calcula a partir del Tiempo de vuelo (T_v) y el tiempo máximo de vuelo por batería (T_b) considerando un factor de seguridad (FS) de 0.5 – 0.8 dependiendo a las condiciones locales del viento proyectadas para la misión:

$$N_v = (T_v / T_b) \cdot FS$$

Anexo A3. Ortomosaicos del área inundada para el análisis preliminar.

Los ortomosaicos representan la acumulación de agua en la zona más baja de la planicie de inundación en dos eventos: (a) 2017/28/06 y (b) 2018/29/10. Una vez ocurrida la inundación fluvial el agua permanece durante un tiempo, por lo general varias semanas. En épocas de estiaje intenso, la lámina de agua desaparece por completo siendo utilizada como campo de fútbol provisional. El área inundada (color azul) es calculada con *r.lake.xy* en 2.1 ha para una profundidad de llenado de 10 cm. El MDS utilizando es el obtenido de procesamiento SfM de las imágenes del vuelo 1 (sin inundación) con 5 GCP. Los ortomosaicos son generados con el programa SfM Pix4D. Como se observa en la siguiente figura, la extensión del área inundada de los ortomosaicos en las figuras (13a) y (13b) coinciden razonablemente con la estimada (figuras 13c y 13d). Esto significa que tanto MDS y ortomosaicos complementariamente son útiles para una estimación rápida y empírica de una zona afectada por inundaciones de tipo fluvial.

Figura Anexo 13. Ortomosaicos del área inundada mínima en la zona del escenario de vuelo 3

Esta página es dejada intencionalmente en blanco.