

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

"GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN
GENERADOS CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA LA
DETERMINACIÓN DE NANOCUENCAS DE ALTA PRECISIÓN"

PRESENTA

ROGER ABRAHAM ABANTO BAZÁN

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERA AMBIENTAL

MARZO, 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

"GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN
GENERADOS CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA LA
DETERMINACIÓN DE NANOCUENCAS DE ALTA PRECISIÓN"

PRESENTA

ROGER ABRAHAM ABANTO BAZÁN

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERA AMBIENTAL

DIRECTOR DE TESIS

DR. RENÉ ALBERTO DÁVILA PÓRCEL

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MARZO DE 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

" GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN
GENERADOS CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA LA
DETERMINACIÓN DE NANOCUENCAS DE ALTA PRECISIÓN"

PRESENTA

ING. ROGER ABRAHAM ABANTO BAZÁN

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
COMITÉ

DR. RENÉ ALBERTO DÁVILA PORCEL
DIRECTOR

DRA. FABIOLA DORACELY YÉPEZ RINCÓN
CO-DIRECTORA

DR. JUAN MANUEL RODRÍGUEZ MARTÍNEZ
CO-DIRECTOR

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MARZO DE 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Civil por permitirme formar parte de su institución durante este periodo, porque estoy seguro de que me ayudará a poseer un razonamiento crítico del conocimiento que me servirá como herramienta para poder aportar a la sociedad parte de este bagaje de conocimientos.

Al Dr. René Alberto Dávila Pórcel, gracias por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que me surgiera, agradecerle sus consejos y enseñanzas con las que me apoyó y sobre todo por su confianza. Gracias por su asesoría en el trabajo de tesis, y también gracias por la amistad que formamos durante este período.

DEDICATORIA

A Dios, que me ha guiado en todo momento por el buen camino, poniendo las pruebas para hacerme crecer, sin abandonarme y dándome la fuerza necesaria para lograr cualquier objetivo.

A mi madre Victoria Bazán Cotrina, porque a pesar de la distancia siempre está incondicionalmente apoyándome en todo momento, por su entrega, sacrificio y sobretodo el amor que me ha brindado.

A mi padre Abraham Abanto Abanto por sus valiosos consejos a lo largo de mi vida. Por enseñarme el valor del esfuerzo, la constancia y perseverancia.

A mi hermana Jane Abanto Bazán por ser mi amiga, acompañándome en los momentos de felicidad y tristeza.

RESUMEN

La presente investigación analiza la precisión de los modelos digitales de elevación generados con vehículos aéreos no tripulados (VANT o dron) por medio de la ejecución de vuelos programados con dos softwares diferentes (denominados A y B) de control de vuelo no tripulado. Las imágenes obtenidas por los vehículos aéreos tienen rangos entre 70 y 80% de superposición, la altura de vuelo en todos los casos es de 200 m. Para realizar los vuelos se utilizó un dron DJI Phantom 4 y DJI Phantom 3 Profesional, en un área de estudio de 129 Ha. Los datos capturados en campo, se procesaron con un software fotogramétrico digital para productos fotográficos, del cual se obtuvieron productos digitales como el modelo tridimensional, la nube densa de puntos, la superficie de malla, el ortomosaico y el Modelo Digital de Elevación (MDE). Se generaron 4 MDE's con datos obtenidos en campo y se definieron Puntos de control Terrestre (PCT) utilizando dos diferentes equipos GPS manual y GPS RTK de doble frecuencia. El objetivo de investigación se centró en determinar cuál combinación de software, VANT y GPS poseen una mayor precisión en el cálculo de la ubicación de los puntos tridimensional y que tenga el menor margen de error. Los resultados de las diferentes combinaciones de los equipos y configuraciones antes descritas indican que los datos recabados con el software B y con los PCT tomados en campo con el GPS de doble frecuencia RTK presentan mejores resultados, cuyos errores promedio son de 0.97823 m en XY, 0.03234 m en Z y 0.615 pix. Paralelamente se realizó un análisis de las ventajas y desventajas que presenta el uso de ambos softwares de control de vuelo en la generación de imágenes útiles para la generación de MDE. Con esta información se procedió de generar el MDE con menor error y que tiene un nivel de resolución muy superior a las actuales fuentes oficiales de MDE en México finalmente se generó la red de flujo superficial en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para demostrar una importante utilidad del uso de esta tecnología.

Contenido

CAPÍTULO 1.....	9
INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 ANTECEDENTES.....	9
1.2 PERCEPCIÓN TRIDIMENSIONAL DE IMÁGENES.....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	20
1.4 HIPÓTESIS.....	20
1.5 OBJETIVOS.....	21
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.6 ALCANCES.....	21
1.7 ÁREA DE ESTUDIO.....	22
1.6.1 MARCO GEOLÓGICO.....	25
1.6.1.1 FISIOGRAFÍA.....	25
1.6.1.4 HIDROLOGÍA.....	28
CAPÍTULO 2.....	31
MARCO TEÓRICO.....	31
2.1 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN.....	31
2.1.1 LOS MDE EN LA DESCRIPCIÓN DIGITAL TRIDIMENSIONAL DE LA SUPERFICIE.....	33
2.1.2 FUENTES DE DATOS PARA LA GENERACIÓN DE UN MDE.....	34
2.2 SENSORES REMOTOS.....	36
2.2.1 SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA.....	40
2.2.2 PLANIFICACIÓN DE VUELO CON VANT.....	43
2.2.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES.....	44
2.2.3.1 ALGORITMOS EN LA FOTOGRAMETRÍA.....	46
2.3 CUENCAS HIDROLÓGICAS.....	49
2.4.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	51
2.4.2 CUENCAS Y REGIONES HIDROGRÁFICAS EN MÉXICO.....	52
CAPÍTULO 3.....	55
METODOLOGÍA.....	55
3.1 COMPARACIÓN DE SOFTWARES DE PLANIFICACIÓN DE VUELO A Y B.....	59
3.2 EJECUCIÓN DEL VUELO.....	63
3.3 TOMA DE PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA.....	64
3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS CON SOFTWARE DE FOTOGRAMETRÍA.....	67
3.5 GENERACIÓN DE LAS REDES DE DRENAJE SUPERFICIAL.....	73
CAPÍTULO 4.....	74
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
4.1 UBICACIONES DE LA CÁMARA Y SUPERPOSICIÓN DE IMÁGENES.....	74
4.2 CALIBRACIÓN DE CÁMARAS.....	77
4.3 POSICIONES DE CÁMARAS.....	79

4.4 PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA.....	81
4.5 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.....	84
4.6 GENERACIÓN DE RED DE FLUJO HÍDRICO.....	86
CAPITULO 5.....	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
5.1 CONCLUSIONES.....	88
5.2 RECOMENDACIONES.....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 COMPARACIÓN ENTRE LA CUENCA DEL RÍO ZARQA Y EL MODELO ENTRE LOS AÑOS 1993-1996. FUENTE: N. AL-ABED Æ F. ABDULLA Æ A. ABU KHYARAH (2013).....	12
FIGURA 1. 2 EJEMPLO DE PLANIFICACIÓN DE VUELO VANT, ENLAZANDO PUNTOS DE CONTROL DE MANERA ÓPTIMA. FUENTE: J. J. RUIZ (2013).....	13
FIGURA 1. 3 MODELO DE SUPERFICIE DIGITAL (MSD) CON LAS POSICIONES DE LOS PUNTOS DE CONTROL DE TIERRA (PCT). FUENTE: TOBY N. TONKIN (2016).....	14
FIGURA 1. 4 DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA (IZQUIERDA) Y MDE DE REFERENCIA CON ELEVACIONES CODIFICADAS POR COLOR (DERECHA) FUENTE: F. HU, X.M.GAO, G.Y.LI, M.LI (2016).....	15
FIGURA 1. 5 EJEMPLOS DE ALGORITMOS DE VISIÓN COMPUTACIONAL DE LOS AÑOS 70. A) ETIQUETADO DE LÍNEA. FUENTE: NALWA (1993) B) MODELO DE CUERPO ARTICULADO. FUENTE: MARR (1982).....	16
FIGURA 1. 6 EJEMPLOS DE ALGORITMOS DE VISIÓN COMPUTACIONAL DE LOS AÑOS 80. A) MEZCLA PIRAMIDAL. FUENTE: BURD, ADELSON (1983) B) FORMA PARA SOMBREAR. FUENTE: FREEMAN, ADELSON (1991). C) RECONSTRUCCIÓN SUPERFICIAL BASADA EN LA REGULARIZACIÓN. FUENTE: TERZOPOULOS (1988) ..	17
FIGURA 1. 7 EJEMPLOS DE ALGORITMOS DE VISIÓN COMPUTACIONAL DE LOS AÑOS 90. A) FACTORIZACIÓN BASADA EN LA ESTRUCTURA A PARTIR DEL MOVIMIENTO. FUENTE: TOMASI Y KANADE (1992) B) COINCIDENCIA Densa ESTÉREO. FUENTE: BOYKOV, VEKSLER Y ZABIH (2001). C) SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES. FUENTE: BELONGIE, FOWLKES (2002).....	18
FIGURA 1. 8 EJEMPLOS DE ALGORITMOS DE VISIÓN COMPUTACIONAL DE LOS AÑOS 2000. A) MODELADO BASADO EN IMÁGENES. FUENTE: DEBEVEC, TAYLOR Y MALIK (1996) B) MAPEO DE TONOS INTERACTIVO. FUENTE: LISCHINSKI, FARBMAN (2006).....	19
FIGURA 1. 9 MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	23
FIGURA 1. 10 ÁREA DE ESTUDIO.....	24
FIGURA 1. 11 MAPA DE LA ZONA SOBRE LA QUE SE REALIZARÁ EL VUELO DEL VANT. FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	25
FIGURA 1. 12 MAPA DE PROVINCIAS FISIGRÁFICAS COAHUILA. FUENTE: SUBSECRETARÍA DE RECURSOS NATURALES, 2010.....	26
FIGURA 1. 13 MAPA DE SUBPROVINCIAS FISIGRÁFICAS COAHUILA. FUENTE: SUBSECRETARÍA DE RECURSOS NATURALES, 2010.....	26
FIGURA 1. 14 MARCO TECTÓNICO DE LA CUENCA DE PARRAS FUENTE: PROYECTO CONACYT-SEMARNAT. 2002. RODRÍGUEZ M.J.M., 2007.....	27
FIGURA 1. 15 FORMACIONES FISIGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	27
FIGURA 1. 16 MAPA DE REGIONES HIDROLÓGICAS COAHUILA. FUENTE: SUBSECRETARÍA DE RECURSOS NATURALES, 2010.....	28

FIGURA 1. 17 MAPA DE CUENCA HIDROLÓGICA DE LA ZONA DE TRABAJO FUENTE: MODIFICADO DE INEGI, 2016.	29
FIGURA 1. 18 MAPA DE SUBCUENCA HIDROLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: MODIFICADO DE INEGI, 2016.	30
Figura 2. 1 Modelo digital de elevación de la cuenca secundaria G Godavari. Fuente: Anirudh Ramaraju (2015)	33
FIGURA 2. 2 A) MODELO 3D (MALLA) EN MODO SOMBREADO. B) MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN. FUENTE: OLUIBUKUN GBENGA AJAYI (2017)..	36
FIGURA 2. 3 PORCENTAJE DEL USO DE VANT EN INDUSTRIAS. FUENTE: FUENTE: H. SHAKHATREH (2018).....	38
FIGURA 2. 4 PREDICCIONES DEL MERCADO DE VANT PARA EL AÑO 2027. FUENTE: H. SHAKHATREH (2018).....	39
FIGURA 2. 5 DIFERENCIAS ENTRE LA PERCEPCIÓN REMOTA ACTIVA Y PASIVA. FUENTE: H. SHAKHATREH (2018)..	41
FIGURA 2. 6 PROCESAMIENTO CON IMÁGENES CAPTURADAS CON VANT. FUENTE: H. SHAKHATREH (2018).....	46
FIGURA 2.7 ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA RECONSTRUCCIÓN DE LAS COORDENADAS DEL TERRENO UTILIZANDO FOTOGAMETRÍA. FUENTE: ABER (2010).....	47
FIGURA 2. 8 DIFERENCIAS ENTRE CUENCA EXORREICA Y CUENCA ENDORREICA. FUENTE: BREÑA, A.F; JACOBO, M.A (2006).....	50
FIGURA 2. 9 CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN MÉXICO. FUENTE: CONAGUA (2014)..	54
Figura 3. 1 Metodología utilizada en la investigación. Fuente: Creación Propia.....	56
FIGURA 3. 2 FLUJO DE TRABAJO DE LOS PLANES DE VUELO. FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	57
FIGURA 3. 3 FLUJO DE TRABAJO EN SOFTWARE DE FOTOGAMETRÍA. FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	58
FIGURA 3. 4 FLUJO DE TRABAJO EN SIG PARA LA GENERACIÓN DE LA RED DE FLUJO HÍDRICO. FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	59
FIGURA 3. 5 PLANES DE VUELO CON SOFTWARE A. FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	61
FIGURA 3. 6 PLANES DE VUELO CON EL SOFTWARE B. FUENTE: CREACIÓN PROPIA.....	62
FIGURA 3. 7 TRABAJO EN CAMPO CON DRON.....	64
FIGURA 3. 8 POSICIONES DE LOS PCT. TOMADOS CON GPS DIFERENCIAL RTK Y PCT TOMADOS CON GPS MANUAL.....	65
FIGURA 3. 9 INTERFAZ DE SOFTWARE DE FOTOGAMETRÍA.....	67
FIGURA 3. 10 NUBE DE PUNTOS DENSA EN SOFTWARE DE FOTOGAMETRÍA.....	69
FIGURA 3. 11 MALLA EN SOMBREADO A COLOR Y MONOCROMÁTICO, EN VISTA LATERAL – SOFTWARE DE FOTOGAMETRÍA.....	69
FIGURA 3. 12 PUNTOS CLASIFICADOS DE TERRENO – SOFTWARE DE FOTOGAMETRÍA.....	72
Figura 4. 1 Ubicaciones de la cámara y superposición de imágenes.....	77
FIGURA 4. 2 GRÁFICO DE RESIDUALES PARA F C330 (3.61 MM).....	79
FIGURA 4. 3 POSICIONES DE CÁMARAS Y ESTIMACIONES DE ERRORES.....	80
FIGURA 4. 4 GRÁFICO DE ERRORES EN XY DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA.....	82
FIGURA 4. 5 GRÁFICO DE ERRORES EN Z DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA.....	83
FIGURA 4. 6 GRÁFICO DE ERRORES EN M DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA.....	83
FIGURA 4. 7 GRÁFICO DE ERRORES EN PIX DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA.....	84
FIGURA 4. 8 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN.....	86
FIGURA 4. 9 GENERACIÓN DEL FLUJO HÍDRICO EN EL ÁREA DE ESTUDIO – SIG.....	87

LISTA DE TABLAS

TABLA 2. 1 COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA ACTIVA Y PASIVA.....	42
TABLA 3. 1 PLANES DE VUELO CON SOFTWARE A.....	60
TABLA 3. 2 ESPECIFICACIONES DE LOS PLANES DE VUELO CON EL SOFTWARE B.....	62
TABLA 3. 3 ESPECIFICACIONES DE LOS DRONES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO. FUENTE: DJI.....	63
TABLA 3. 4 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE PCT CON GPS MANUAL.....	65
TABLA 3. 5 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE PCT CON GPS DIFERENCIAL.....	66
TABLA 3. 6 ESPECIFICACIONES DEL TRABAJO.....	66
TABLA 4. 1 ESPECIFICACIONES DE CÁMARA.....	74
TABLA 4. 2 ESPECIFICACIONES DE VUELO A.....	75
TABLA 4. 3 ESPECIFICACIONES DE VUELO B.....	76
TABLA 4. 4 ESPECIFICACIONES DE LAS FOTOGRAFÍAS OBTENIDAS CON VANT.....	78
TABLA 4. 5 ERRORES MEDIOS DE LAS POSICIONES DE CÁMARAS.....	81
TABLA 4. 6 ESPECIFICACIONES DE LOS MDE CREADOS.....	85

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para levantamientos fotogramétricos recientemente ha ganado enorme popularidad. Las imágenes tomadas de los VANT se utilizan para generar Modelos Digitales de Elevación (MDE) e imágenes ortorrectificadas (C. Kiser, 2010).

En 1991 se desarrolló un estudio haciendo uso de un método apoyado por un Sistema de Información Geográfica (SIG) para detectar un mosaico hidrológico y evidenciar el rol del ser humano como factor de impacto sobre la hidrología. La finalidad de este estudio fue determinar la probabilidad de que un área actúe como zona de recarga o descarga de agua subterránea utilizando métodos SIG. El método se basó en superposiciones de mapas con la distribución de los factores determinantes de la respuesta hidrológica (Andersson & Sivertun, 1991).

En 1998, se realiza una investigación en donde se utilizan métodos de detección satelital para estimar áreas de inundación y determinar sus límites. En aquel estudio se utilizaron altímetros de radar que tienen mucha eficacia para medir de manera directa la variación de niveles de inundación en ríos grandes. Y además se obtuvieron estimaciones de la descarga del río desde el espacio, utilizando mediciones de tierra y datos satelitales para construir curvas empíricas que relacionan el área de superficie del agua con la descarga (Smith, 1998).

La utilización de los VANT como herramienta fundamental de las técnicas de percepción remota y el monitoreo ambiental data aproximadamente del año 1993, no obstante, aún para este tiempo el término de VANT se utilizaba para referirse específicamente al ámbito militar de drones, para lo que los costos minoristas y de operación eran demasiado elevados para su uso como herramienta académica (Hutchison, 1993). Sin embargo, con el paso de los años, los costos de fabricación de los equipos VANT han disminuido y en la actualidad existe un costo beneficio para su desarrollo como herramientas para el monitoreo de áreas geográficas y estudios de hidrología.

A partir de la década del 2000, se utilizaron los VANT en trabajos en áreas de cultivo para comprobar la presencia de nitrógeno, comparando técnicas de recuperación de clorofila multiespectrales basadas en la tierra utilizando fotogrametría con VANT, para que se pueda detectar la deficiencia y exceso de nitrógeno y sus consecuencias en la escorrentía y contaminación de nutrientes (Zhu, 2009).

También se utilizaron este tipo de equipos en estudios de ecohidrología e hidrología de las cuencas hidrográficas en sitios con presencia de humedales, en los cuales se usaron datos de imágenes a gran escala para mapear la distribución de los ecosistemas tanto de manera terrestre como acuática (Vivoni, 2012). Esta investigación proporciona información de mucha utilidad para la administración de los recursos hídricos.

Posteriormente se desarrollaron investigaciones enfocadas en el área de la hidrología de las cuencas hidrográficas y estudios relacionados con ecohidrología, utilizando los VANT en diferentes tipos de ambientes y situaciones como en humedales, donde se mapeó la distribución de ecosistemas acuáticos y terrestres. (Anderson, 2012). En años posteriores los VANT se han usado para monitorear sistemas de riego (Jiménez – Bello, 2013) y para la gestión de agua en tiempo

real (Chao, 2008). Asimismo, se aprovecharon los VANT para el desarrollo de investigaciones enfocadas en el uso de sensores para mapeo espacial de procesos de evapotranspiración de cuencas hidrográficas (Templeton, 2014).

También se han explorado el uso de vehículos robotizados para el monitoreo de cuerpos de agua (Pinto, 2013). En dichos campos de acción, los VANT son una plataforma de teledetección usualmente utilizada, pues los datos recopilados con estos equipos a corta distancia permiten detectar información individual o indicadores hidrológicos y de esta forma, optimizar la gestión del agua a una escala más precisa.

En el año 2013, se realizó en India una investigación acerca de la aplicación de la detección satelital y los SIG en estudios hidrológicos y se basó en la determinación de la utilidad de este tipo de tecnología para obtener un mejor control de calidad del agua, usando diferentes tipos de imágenes de detección remota y parámetros fisicoquímicos y biológicos para la evaluación de calidad de agua superficial y subterránea. En dicho estudio se evidenció que la teledetección brinda información detallada en el tiempo y espacio; incluso desde zonas inaccesibles, mientras que los SIG ayudan a almacenar, interpretar y recuperar datos espaciales (B. Sharma, R. Dobha, S. Tyagi, V. Jaiswal y P. Singh, 2013).

En el mismo año, un estudio investiga a los modelos hidrológicos para la gestión de recursos hídricos, donde hicieron uso de modelos que se aplicaron en el Río Zarqa (Jordania) para posteriormente realizar una comparación entre dos modelos para aplicar el más eficiente en gestión de recursos (Figura 1.1). Se comprobó que la tecnología SIG es muy útil para la realización de diversos modelos hidrológicos, ya que recopila muchas fuentes de datos diferentes para ayudar a calcular parámetros hidrológicos (N. Al-Abed, F. Abdulla, A. Abu Khyarah, 2013).

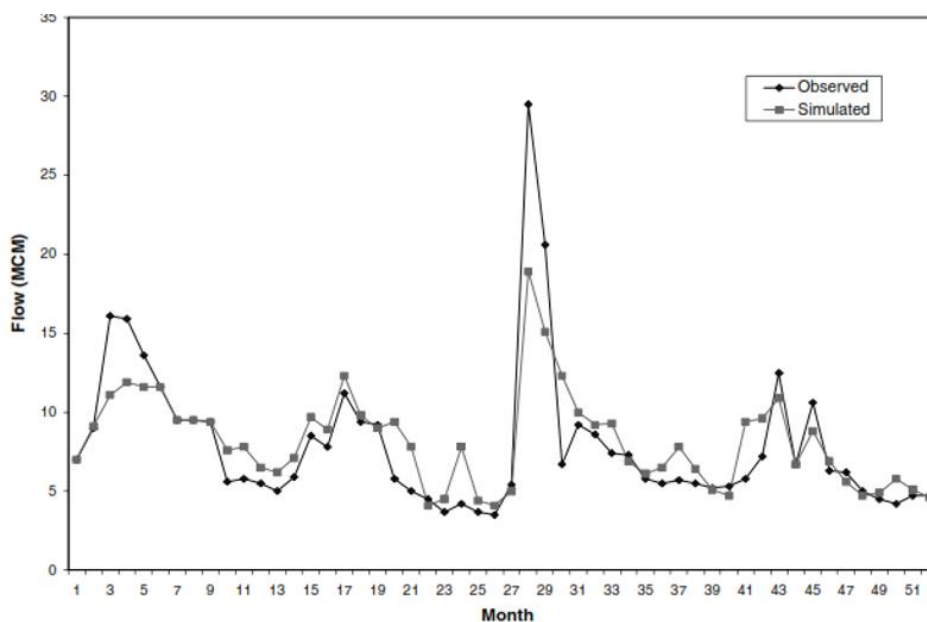


Figura 1.1. Comparación entre la Cuenca del Río Zarqa y el modelo entre los años 1993-1996. Fuente: N. Al-Abed & F. Abdulla & A. Abu Khyarah (2013).

Los MDE de alta resolución son una importante fuente de información para aplicaciones geocientíficas en la ciencia y la industria (S. Wechsler, 2007). Permiten realizar análisis y principalmente, cuantificaciones en la morfología de la superficie (erosión del suelo, deslizamientos de tierra, erosión de barrancos, morfología fluvial y costera), hidrología (redes de drenaje), tectónica y vulcanismo, glaciares, oceanografía e incluso investigación espacial (P. Tarolli, D. Fontana, 2009).

Para la creación de un MDE utilizando técnicas de fotogrametría es esencial la toma de PCT mediante la utilización de GPS, varios estudios investigaron el efecto de variar el número y la posición de los puntos GPS en la precisión del MDE.

En el año 2013, un estudio evaluó el efecto de los GPS sobre la precisión de los MDE generados a partir de imágenes aéreas obtenidas con VANT. La principal contribución de esta investigación es el estudio del efecto de los receptores GPS montados en plataformas VANT, el experimento se llevó a cabo utilizando un cuadrotor pequeño con los GPS demostrando que la precisión del MDE final depende totalmente de la información de posicionamiento. (Ruiz, 2013). La figura

1.2 muestra una de manera gráfica el VANT con los GPS incorporados realizando la labor de vuelo con sus respectivos PCT, señalados de color blanco.

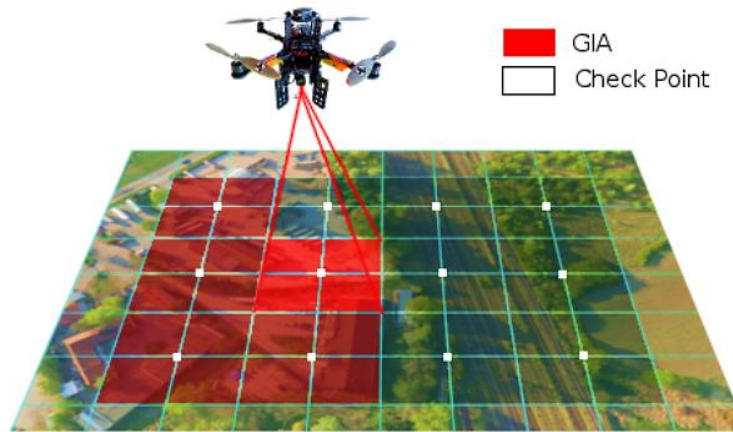


Figura 1.2. Ejemplo de planificación de vuelo VANT, enlazando puntos de control de manera óptima.

Fuente: J. J. Ruiz (2013).

Otra investigación, utilizando un VANT de ala fija con cámara digital, analizó el rendimiento fotogramétrico de VANT para recolectar imágenes y se aplicaron diferentes técnicas para verificar el MDE, generado a partir de imágenes de VANT. El experimento se realizó en Lituania, cubriendo un área de imagen aproximada de 80 Ha. Durante la misión del vuelo VANT fueron capturadas un total de 180 imágenes (Ruzgiene, 2014).

En el año 2015, se realizaron varias pruebas variando el número y las ubicaciones de los puntos GPS, así como también el número de imágenes donde los puntos eran visibles, en este estudio se concluyó que un MDE georreferenciado con un mayor número de PCT es más preciso que un MDE georreferenciado con pocos y que una red GPS distribuida uniformemente genera un MDE de mayor precisión que una red en la que los puntos GPS están agrupados. También mostraron que la precisión de MDE es mayor cuando los PCT se instalan de manera visible en muchas imágenes (Shahbazi, 2015). De forma similar, otros proyectos de investigación coincidieron en que la precisión

de un MDE aumenta con el aumento del número de PCT (Tahar, 2012 / Rosnell & Honkavaara, 2013).

Una investigación del año 2016 (Figura 1.3), demostró que cuando se alcanza cierto número PCT, la precisión del MDE ya no se ve incrementada. Específicamente, se encontraron retornos decrecientes cuando se incluyeron PCT aleatoriamente para la generación del modelo, con el uso de ≥ 4 PCT se obtiene precisión aceptable en el MDE, precisión que no cambia con el aumento de más PCT (Tonkin, 2016).

Todos estos estudios, tienen algo en común, realizaron sus evaluaciones y pruebas de campo en terrenos planos u ondulados y en superficies bien estructuradas, factores que facilitan la construcción de un MDE.

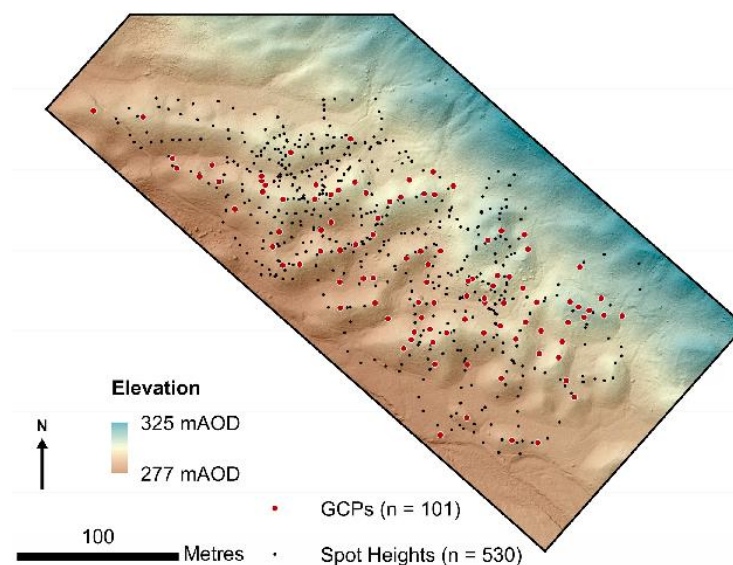


Figura 1.3. Modelo de superficie digital (MSD) con las posiciones de los puntos de control de tierra (PCT). Fuente: Toby N. Tonkin (2016).

También en el año 2016, en China se realizó un estudio utilizando imágenes satelitales WV-3, se validó la precisión del posicionamiento geográfico de la imagen, y se midieron un total de dieciocho PCT. La precisión planimétrica sin PCT fue de 2,16 m, mientras que la precisión vertical fue de 1,61 m. Esta investigación demuestra que, para los datos de imagen satelital WV-3, con una

pequeña cantidad de PCT ubicados en el centro o en las cuatro esquinas del área de prueba, el error sistemático puede compensarse adecuadamente (Figura 1.4). Es decir, que la precisión del posicionamiento geográfico de las imágenes en un área montañosa es precisa con solo unos pocos PCT, distribuidos de manera uniforme sobre el terreno. (F. Hu, X.M.Gao, G.Y.Li, M.Li, 2016).

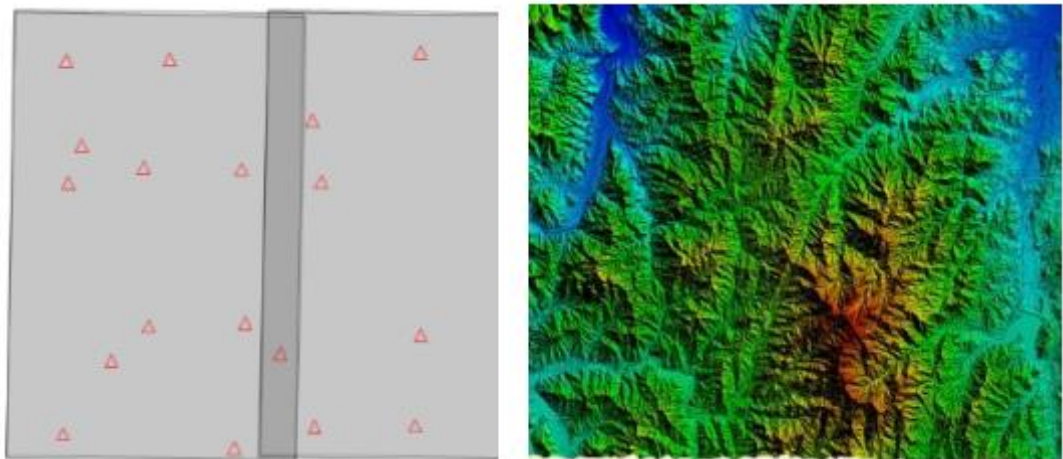


Figura 1.4. Distribución de Puntos de control en tierra (izquierda) y MDE de referencia con elevaciones codificadas por color (derecha) Fuente: F. Hu, X.M.Gao, G.Y.Li, M.Li (2016).

1.2 Percepción Tridimensional de Imágenes

Por varias décadas, la tecnología en la reconstrucción de imágenes a través de programas computacionales ha demostrado avances importantes respecto a la percepción tridimensional de territorios, edificios y demás objetos como se puede evidenciar en la Figura 1.5.

Cuando la visión por medio de computadora comenzó a inicios de la década de 1970, se vio como el componente de percepción visual que buscaba imitar la inteligencia humana y para dotar a los robots de un comportamiento inteligente. Los primeros intentos para comprender una escena visual computarizada, implicaron extraer bordes y luego inferir la estructura 3D de un

objeto o un "mundo de bloques" de la estructura topológica de las líneas 2D (Roberts, 1965).

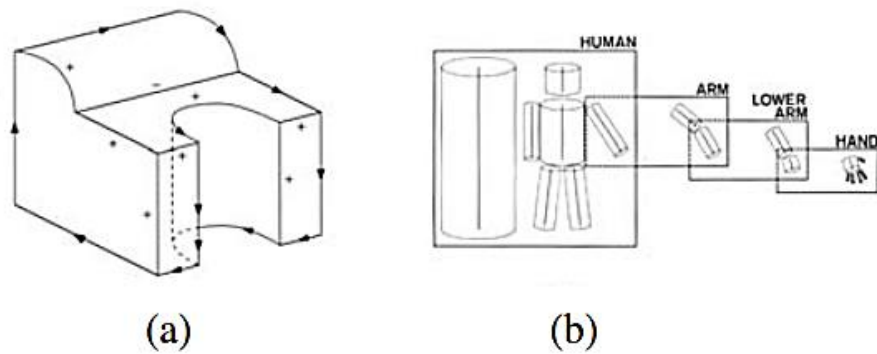


Figura 1.5. Ejemplos de algoritmos de visión computacional de los años 70. a) Etiquetado de Línea. Fuente: Nalwa (1993) b) Modelo de cuerpo articulado. Fuente: Marr (1982).

Por otra parte, pero en el mismo periodo se estudiaba el modelado tridimensional de objetos no poliédricos (Baumgart, 1974; Baker, 1977). Un enfoque popular utilizó cilindros generalizados, es decir, sólidos de revolución y curvas cerradas barridas, a menudo organizadas en relaciones de partes. (David Marr, 1982). En esta época se comenzaron trabajos básicos en la recuperación simultánea de la estructura 3D y el movimiento de la cámara, relacionando una teoría computacional, algoritmos, representaciones e implementación del hardware. (David Marr, 1982).

Hacia la década de 1980, se prestó mucha atención a técnicas matemáticas más sofisticadas para realizar análisis cuantitativos de imágenes y escenas (ver Figura 1.6). En estos años empezaron a utilizarse las pirámides de imágenes para tareas como la combinación de imágenes. (Rosenfeld, 1980). La investigación para una mejor detección de bordes y contornos también estuvo activa durante este período (Nalwa y Binford, 1986).

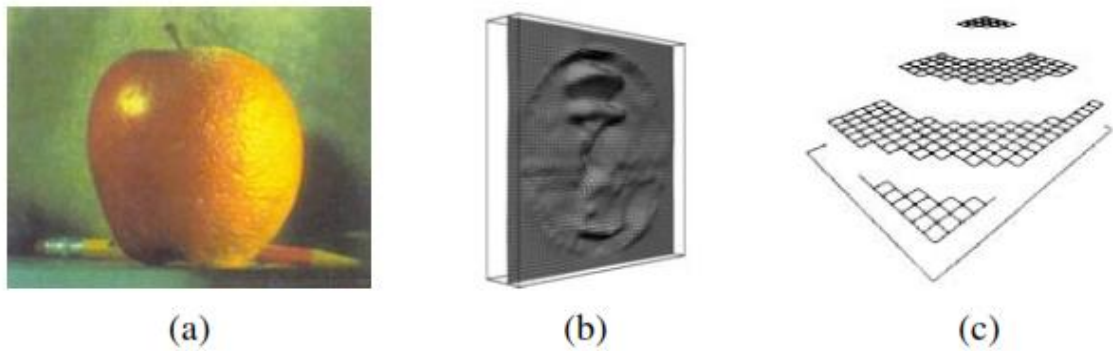


Figura 1.6. Ejemplos de algoritmos de visión computacional de los años 80. a) Mezcla Piramidal. Fuente: Burd, Adelson (1983) b) Forma para sombrear. Fuente: Freeman, Adelson (1991). c) Reconstrucción superficial basada en la regularización. Fuente: Terzopoulos (1988).

El procesamiento de datos de rango tridimensional (adquisición, fusión, modelado y reconocimiento) continuó siendo explorado de manera activa durante esta década. Para la década de los años 90, se siguieron explorando muchos de los temas mencionados anteriormente, algunos de ellos se hicieron significativamente más activos.

Gran parte de la actividad se dirigió a reconstrucciones proyectivas, que no requerían conocimientos de calibración de cámara. Simultáneamente, se desarrollaron técnicas de factorización para resolver de manera eficiente los problemas para los cuales eran aplicables las aproximaciones ortográficas de la cámara (Tomasi y Kanade, 1992).

Finalmente, se comenzó a utilizar la optimización global completa, que luego se reconoció como las mismas técnicas de ajuste de haces que se utilizaban tradicionalmente en fotogrametría (Triggs, McLauchlan, Hartley, 1999). Los sistemas de modelado 3D totalmente automatizados (dispersos) se construyeron utilizando dichas técnicas (Schaffalitzky y Zisserman, 2002).

Quizá el desarrollo más notable en la visión por computadora durante esta década fue la mayor interacción con los gráficos por computadora

especialmente en el área interdisciplinaria de modelado y renderización basada en imágenes (Seitz y Szeliski 1999). La idea de manipular imágenes del mundo real directamente para crear nuevas animaciones primero se destacó con técnicas de transformación de imagen y luego se aplicó para ver la interpolación, costura panorámica de la imagen, y la representación completa del campo de luz (Figura 1.7). Al mismo tiempo, se introdujeron técnicas de modelado basado en imágenes para crear automáticamente modelos 3D realistas a partir de colecciones de imágenes (Taylor, Debevec, y Malik, 1996).

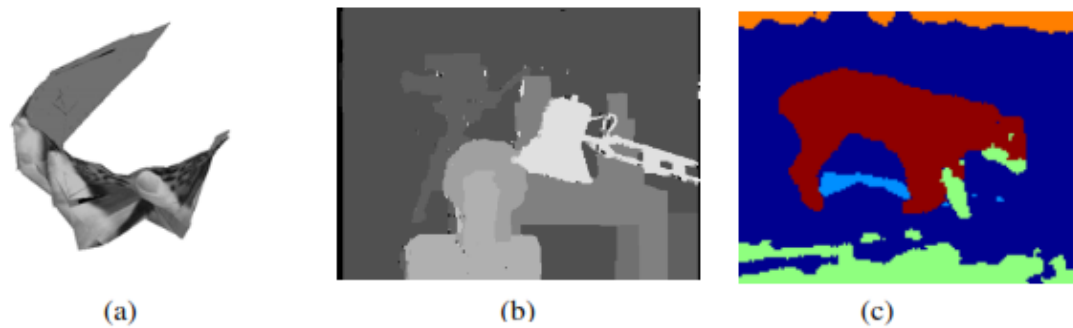


Figura 1.7. Ejemplos de algoritmos de visión computacional de los años 90. a) Factorización basada en la estructura a partir del movimiento. Fuente: Tomasi y Kanade (1992) b) Coincidencia densa estéreo. Fuente: Boykov, Veksler y Zabih (2001). c) Segmentación de imágenes. Fuente: Belongie, Fowlkes (2002)

En la década de los años 2000, se continuó estudiando la interacción cada vez más profunda entre la visión y los campos gráficos. En particular, muchos de los temas de la representación basada en imágenes, como la costura de imágenes, la captura y representación de campos de luz y la captura de imágenes de alto rango dinámico. La rápida adopción del corchete de exposición para crear imágenes de alto rango dinámico requirió el desarrollo de algoritmos de mapeo de tonos para convertir esas imágenes de nuevo a resultados visualizables. (Fattal, Lischinski y Werman 2002). Además de fusionar exposiciones múltiples, se desarrollaron técnicas para combinar imágenes de flash con sus homólogos no flash (Eisemann y Durand, 2004) y para seleccionar interactiva o automáticamente diferentes regiones de imágenes superpuestas (Agarwala y Dontcheva, 2004).

Una segunda tendencia notable durante esta década ha sido el surgimiento de técnicas basadas en características (combinadas con el aprendizaje) para el reconocimiento de objetos. Algunos de los documentos notables en esta área incluyen el modelo de constelación de Fergus, Perona y Zisserman (2007) y las estructuras pictóricas de Felzenszwalb y Huttenlocher (2005). Las técnicas basadas en características también dominan otras tareas de reconocimiento, como el reconocimiento de escenas (Zhang y Marszalek, 2007) y el reconocimiento de ubicación y panorama (Brown y Lowe, 2007). Y mientras que las características de los puntos de interés (basadas en parches) tienden a dominar la investigación actual, algunos grupos persiguen el reconocimiento basado en contornos (Belongie, Malik y Puzicha, 2002) y la segmentación de la región (Mori, Ren y Efors, 2004).

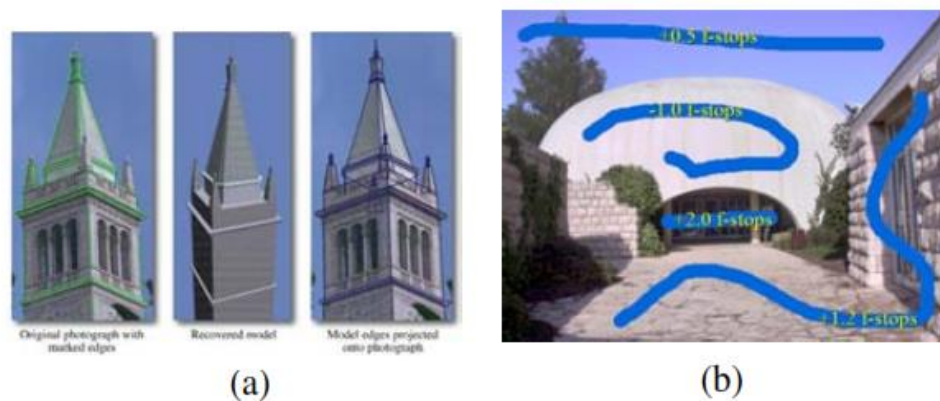


Figura 1.8. Ejemplos de algoritmos de visión computacional de los años 2000. a) Modelado basado en imágenes. Fuente: Debevec, Taylor y Malik (1996) b) Mapeo de tonos interactivo. Fuente: Lischinski, Farbman (2006).

1.3 Justificación

En la bibliografía especializada no se tiene antecedentes de realizar una comparación en el uso de los softwares de control de vuelo autónomo de VANT y de la precisión de los resultados que se obtienen por medio del uso de estas diferentes opciones disponibles hoy en día, y que se constituyen en una tecnología que contribuye a la generación de MDE que son muy útiles en el estudio del territorio de una manera muy amplia cuando se utilizan las técnicas de percepción remota. Este método para generar nueva información, ofrece datos actualizados, permite la obtención de mejores resoluciones, posee una gran cobertura de área, tiene acceso rápido a datos y además es muy rentable.

Los MDE permiten tener una visión global de las características hidrológicas de una cuenca hidrográfica, y contribuyen al estudio del flujo superficial de las corrientes de agua.

1.4 Hipótesis

El uso simultáneo de software de control de vuelo autónom, de VANT, de los métodos de medición de geolocalización PCT, de técnicas de percepción remota y software de procesamiento de imágenes digitales podrían mejorar la precisión en la generación de MDE pudiendo constituirse en un importante aporte al estudio de las características hidrológicas de una nano-cuenca hidrográfica y optimizar el estudio de redes de flujo superficial local.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Analizar la precisión de los modelos digitales de elevación generados con dos vehículos aéreos no tripulados utilizando dos softwares de control autónomo de vuelo y dos diferentes tipos de medición de puntos de control terrestre en la determinación de redes de flujo superficial alta precisión en nanocuenca hidrológicas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Obtener imágenes de ultra-precisión por medio de vehículos aéreos no tripulados, utilizando técnicas de fotogrametría aérea y dos softwares comerciales.
- Definir las diferencias entre los softwares de vuelo autónomo software A (DroneDeploy) y software B (Pix4DCapture).
- Establecer la diferencia de los MDE obtenidos utilizando puntos de control en tierra tomados con GPS manual y con GPS de doble frecuencia.
- Crear un Modelo Digital de Elevación con la combinación de tecnologías más óptimas.
- Determinar la nanocuenca hidrológica y la red de flujo superficial de alta precisión.

1.6 Alcances

- Percepción remota mediante VANT.
- Interfaces de planificación de vuelo de dron.

- Fotogrametría utilizando software especializado en tratamiento de imágenes de dron.
- Creación de ortomosaico del área de estudio y de MDE
- Análisis e interpretación de resultados de puntos de control en tierra, medidos con diferentes equipos topográficos.
- Análisis del flujo hidrológico de la nanocuenca del área de estudio en SIG, haciendo uso del MDE con más exactitud.

1.7 Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Ramos Arizpe, Coahuila, dicho municipio se encuentra ubicado en la porción oriental de la República Mexicana delimitado al norte con los municipios de Cuatro Ciénegas, Castaño y el estado de Nuevo León; al este con el estado de Nuevo León, al sur con los municipios de Saltillo, Arteaga y General Cepeda y al oeste con el municipio de Parras.

La zona se encuentra ubicada dentro del Desierto Chihuahuense tiene un rango altitudinal entre los 1,300 a los 2,000 msnm.

Mapa de Ubicación

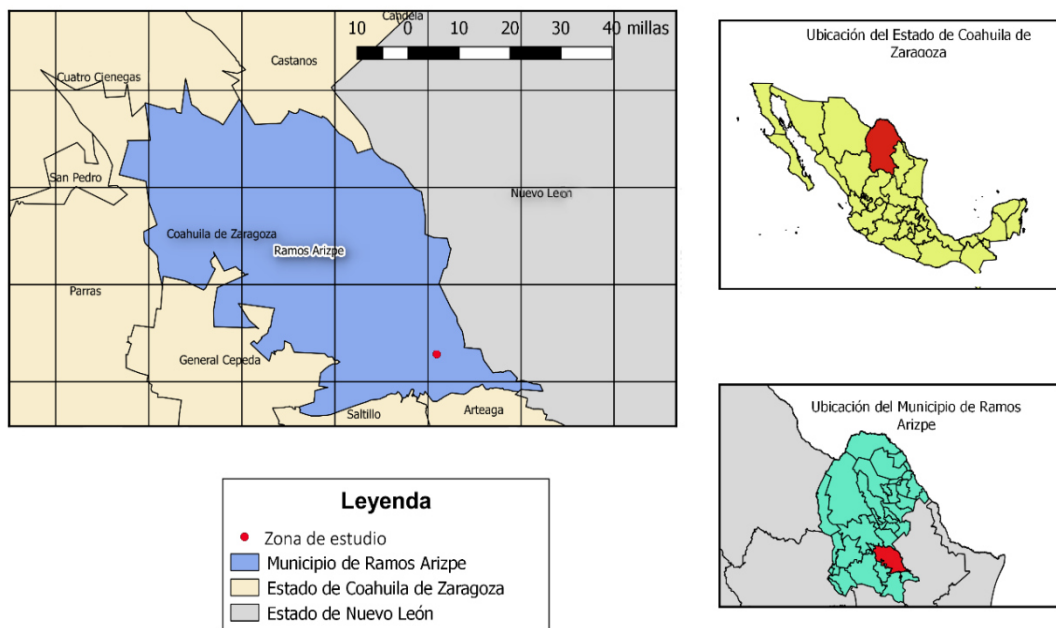


Figura 1.9: *Mapa de ubicación de la zona de trabajo* Fuente: *Modificado de INEGI*

En julio del año 2010, fuertes precipitaciones en el Noreste del país causaron que la mayoría de los arroyos en las inmediaciones del municipio se desbordaran, ocasionando severas inundaciones en las instalaciones de instituciones públicas y de empresas privadas en el municipio.

A fin de conocer la red hidrológica de la zona y aplicar medidas para evitar que se repitan sucesos que dañan las instalaciones civiles, se realizó un estudio para conocer el caudal máximo de agua que podría afectar la zona de estudio. Se identificaron las zonas vulnerables a inundaciones y posteriormente se definió el área en la cual se realizará el levantamiento con drones.



Figura 1.10. *Imagen de una porción del área de estudio.*

El reconocimiento del área de estudio se llevó a cabo utilizando un mapa digital de las áreas vulnerables a la inundación utilizadas para diseñar el plan de vuelo para asegurar una misión exitosa.

El reconocimiento en campo se realizó con el fin de determinar las zonas seguras que se utilizarán para establecer los PCT para la optimización y la georreferenciación. Para garantizar una misión de vuelo segura y sin problemas, se llevó a cabo una prueba previa al vuelo para probar todas las partes electrónicas de los VANT para verificar el correcto funcionamiento y también para la calibración y configuración de la cámara, tareas importantes para prevenir accidentes o problemas en el VANT durante la misión de vuelo.

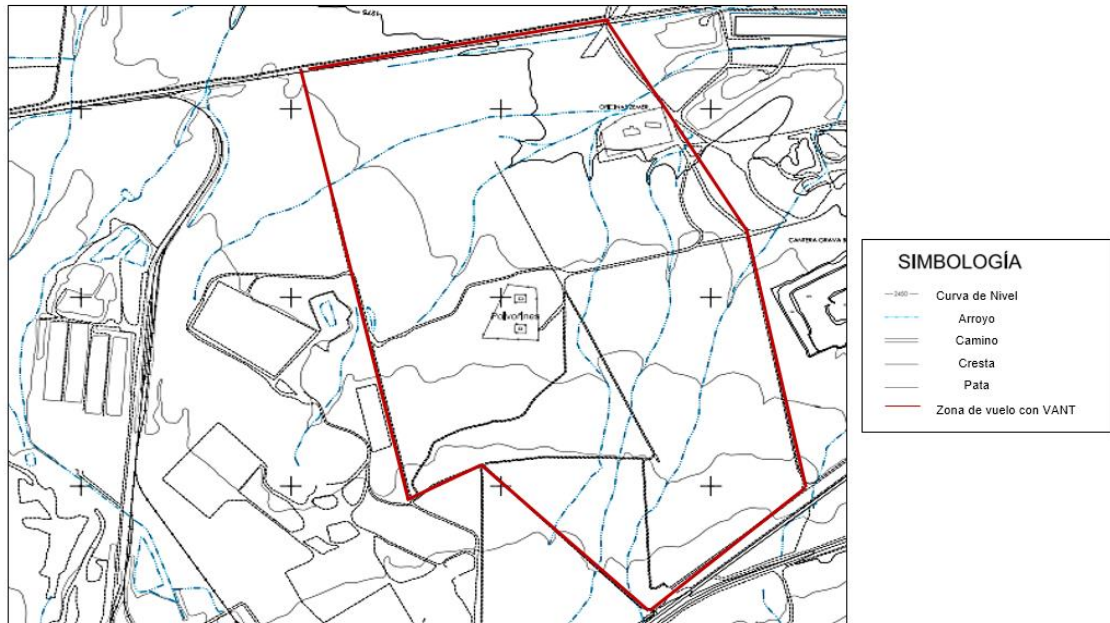


Figura 1.11: Mapa de la zona sobre la que se realizará el vuelo del VANT. Fuente: Creación Propia

1.6.1 Marco Geológico

1.6.1.1 Fisiografía

Fisiográficamente la región se ubica en la Sierra Madre Oriental, en la subprovincia de Pliegues de Saltillo-Parras y Sierra de Paila, se caracteriza por tener una serie de estructuras rocosas anticlinales y sinclinales que forman sierras con pliegues tendidos, bajada típica, bajada con lomeríos y valles con una orientación este-oeste; se ubica en la Sierra Madre Oriental y en la convergencia de los Terrenos Sierra Madre y Coahuila, conforme a la clasificación de los terrenos tectono-estratigráficos de México. La sierra más importante en esta región es la de Parras la cual alcanza una altura de 3000 m.s.n.m. y se extiende a

lo largo de los municipios de Parras, Saltillo y Ramos Arizpe (Subsecretaría de Recursos Naturales, 2010).

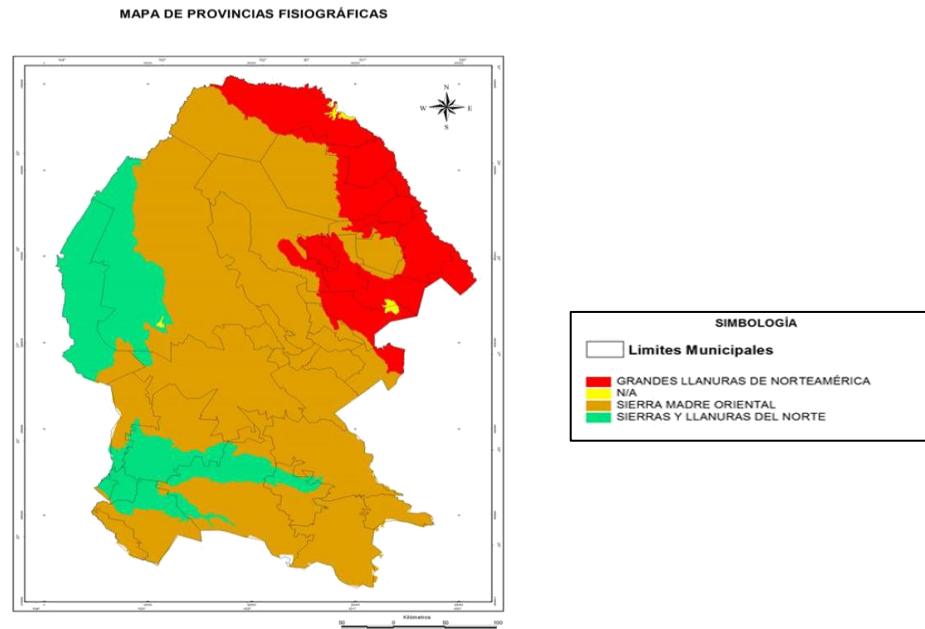


Figura 1.12: *Mapa de Provincias Fisiográficas Coahuila*. Fuente: *Subsecretaría de Recursos Naturales, 2010*.

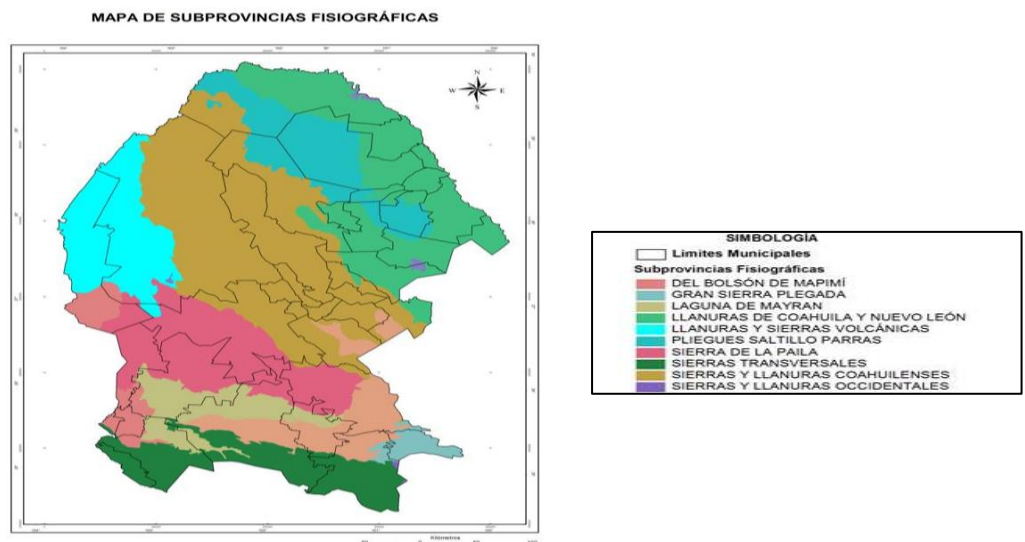


Figura 1.13: *Mapa de Subprovincias Fisiográficas Coahuila*. Fuente: *Subsecretaría de Recursos Naturales, 2010*.

La región denominada Cuenca de Parras está definida por una gruesa sección de estratos sedimentarios de alrededor de 5500 metros de espesor, constituida principalmente por sedimentos siliciclásticos de grano fino a grueso que presentan algunas intercalaciones calcáreas. La cuenca de Parras corresponde en general al Cretácico Superior- Terciario Inferior básicamente influye la Formación Parras y Grupo Difunta, que están asociadas con sistemas fluviodeltaicos relacionadas íntimamente con el levantamiento de la Sierra Madre Oriental durante la Orogenia Laramide (De la Torre, 2015).

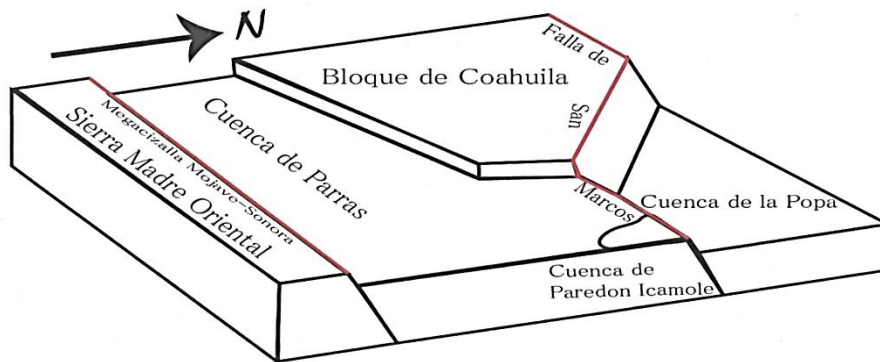


Figura 1.14: Marco Tectónico de la Cuenca de Parras Fuente: Proyecto CONACYT-SEMARNAT. 2002. Rodríguez M.J.M., 2007.



Figura 1.15: Formaciones Fisiográficas del área de estudio Fuente: Creación Propia

1.6.1.4 Hidrología

Respecto a la hidrología Coahuila se encuentra entre las regiones hidrológicas "Bravo-Conchos", "Mapimí", "Nazas-Agua Naval" y "El Salado", los recursos hidráulicos de la región son escasos, pues las precipitaciones media anuales de grandes extensiones es menor a 350 mm y los escurrimientos superficiales son muy limitados e intermitentes. Los principales ríos se encuentran al norte y centro del Estado, en épocas de lluvias llegan a ser caudalosos, entre ellos se encuentran el Río Bravo, Río San Rodrigo, Río San Diego, Río San Antonio, Río Sabinas y Río Salado.

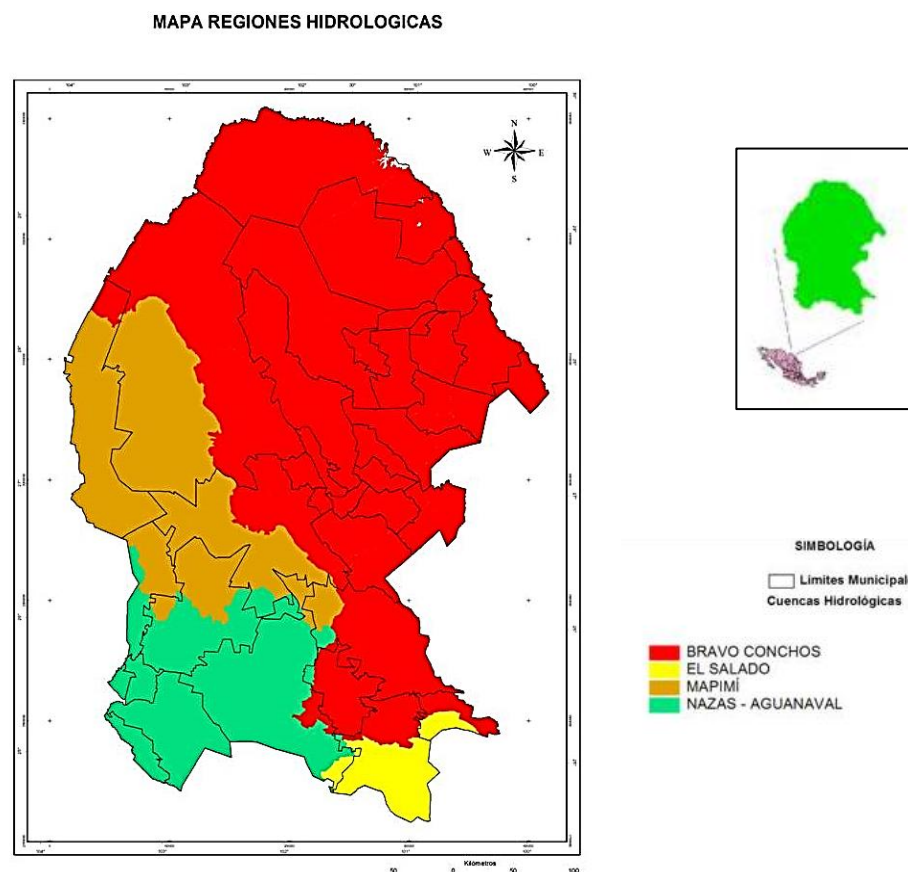


Figura 1.16: Mapa de regiones hidrológicas Coahuila. Fuente: Subsecretaría de Recursos Naturales, 2010.

En lo que respecta al área de estudio no se cuenta con ningún cauce de agua importante, perteneciendo a la región RH24 "Bravo-Conchos", cuenca Río Bravo-San Juan, sub-cuenca San Miguel.

La cuenca hidrológica del Río Bravo (Figura 1.17) que es de tipo exorreico; en el territorio mexicano ocupa una extensión de 226,275 km², la región hidrológica en la que se encuentra la zona de trabajo corresponde a la cuenca de Bravo – Conchos y posee un tipo de drenaje de tipo angular, debido a la presencia en la zona de características como control estructural (fallas, fracturas, discontinuidades, alta permeabilidad, mediano caudal, moderada cobertura vegetal, mediana pluviosidad, etc.)

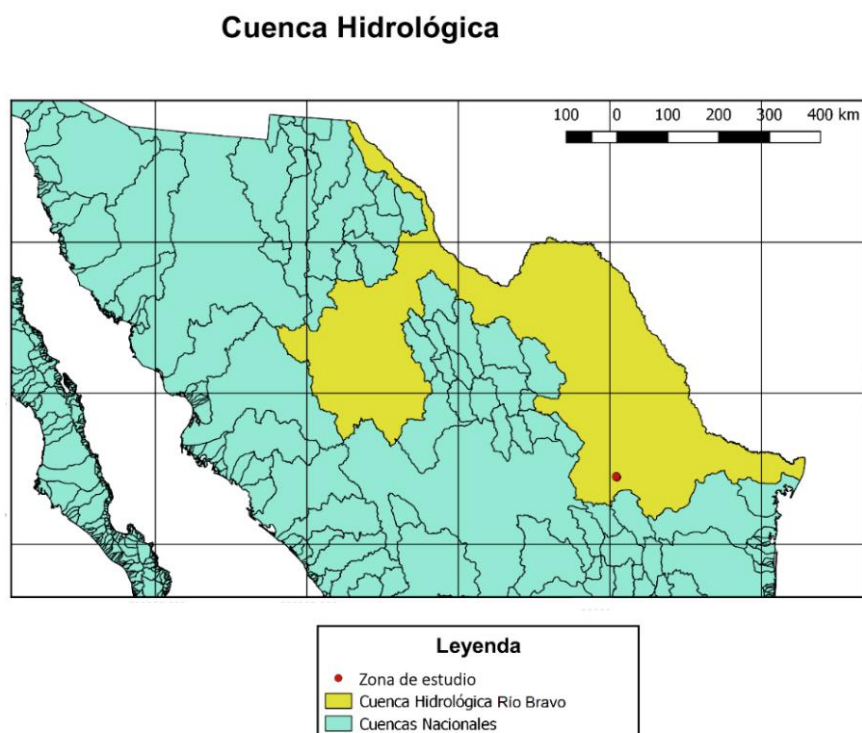


Figura 1.17: *Mapa de cuenca hidrológica de la zona de trabajo* Fuente: *Modificado de INEGI, 2016*

En la Figura 1.18, se presenta la subcuenca hidrológica que engloba el área del proyecto de investigación. Esta subcuenca cuenta con una extensión 41,883.49 Ha.

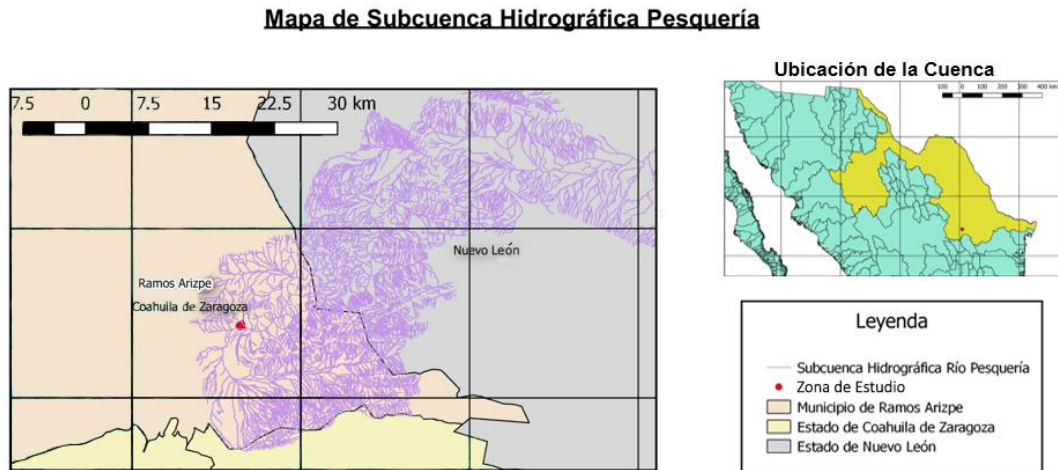


Figura 1.18: *Mapa de subcuenca hidrológica de la zona de estudio.* Fuente: *Modificado de INEGI, 2016.*

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Modelos Digitales de Elevación

Un MDE es una representación de la superficie de la Tierra con latitud, longitud y altitud definidas: es decir, posee valores en las coordenadas horizontales (X, Y) y altura (Z). Los MDE son una importante herramienta para la extracción de modelos tridimensionales (Swaraj y Anji Reddy, 2013). Contienen la elevación de un punto en una superficie por encima del nivel medio del mar. Estos modelos, a menudo se denominan también Modelo de Terreno Digital (MTD), Modelo de Superficie Digital (MSD) o Modelo de Altura Digital (MHD) (Poon, 2005).

Los términos MDE, MTD y MSD se usan generalmente para referirse a varios tipos de datos geoespaciales continuos, tridimensionales (3D). Un MDE se puede definir como una imagen ráster 3D en la que los valores de píxel o los niveles de contorno representan las elevaciones del terreno con referencia al nivel medio del mar. Un MSD se puede definir como una imagen ráster en la que los valores de píxel representan las elevaciones del terreno sobre el nivel del mar con todas las demás características como árboles, edificios, colinas, etc., mientras que un MTD es una imagen rasterizada de la tierra desnuda en la que los valores de píxel representan la elevación del suelo sobre el nivel del mar o desde un dato local. (Oluibukun Gbenga Ajayi, 2017)

El MDE es una representación cuantitativa del terreno y es consecuente para las aplicaciones geológicas e hidrológicas (Gurugnanam et al., 2014). El MDE es simplemente una representación estadística de la superficie continua del terreno mediante un gran número de puntos seleccionados con coordenadas conocidas en un campo de coordenadas arbitrarias.

Se utilizan diferentes técnicas para la adquisición de datos fuente de MDE: fotogrametría aérea y espacial, radargrametría, interferometría SAR, escaneo láser aéreo (LIDAR), digitalización cartográfica de mapas existentes, técnicas topográficas tradicionales y modernas.

Las nuevas técnicas de adquisición y procesamiento de datos se han desarrollado y han aparecido nuevos tipos de modelos digitales del terreno: desde el diseño de autopistas hasta el diseño de ferrocarriles, la gestión de recursos hídricos, la simulación de vuelo, el control de inundaciones y muchos más. Los MDE son de gran ayuda para resolver diferentes tipos de problemas ambientales como la planificación y la construcción de obras civiles, los servicios hidrológicos y meteorológicos, la industria minera y petrolera, la evaluación de riesgos y las predicciones de riesgos y peligros, lo que hace que su producción precisa sea esencial (Oluibukun Gbenga Ajayi, 2017)



Figura 2.1. Modelo digital de elevación de la cuenca secundaria G Godavari. Fuente:
Anirudh Ramaraju (2015).

El MDE utilizado en la industria de topografía y geomática contiene solo valores de elevación de la verdadera superficie del suelo sobre el nivel del mar. En fotogrametría, los MDE son un producto que resulta de la interpolación de densas nubes de puntos 3D que se derivan de las imágenes superpuestas (PCI Geomatics 2006).

2.1.1 Los MDE en la descripción digital tridimensional de la superficie

Los MDE juegan un papel fundamental en el mapeo. La descripción digital de la superficie tridimensional es importante para varias aplicaciones. Hoy en día, el producto fotogramétrico más utilizado son las ortoimágenes generadas por medio de una sola imagen y un MDE. Los sensores espaciales de muy alta resolución funcionan principalmente en un solo modo de imagen; los pares estéreo no se toman con mucha frecuencia.

Una georreferenciación correcta solo es posible en función de un MDE. Los MDE mundiales existentes y no clasificados generalmente no tienen una precisión y fiabilidad suficientes para aplicaciones más precisas o pueden ser demasiado costosos (Ramaraju Anirudh, 2015).

El archivo MDE tampoco contiene información civil, como carreteras o edificios. No es una imagen escaneada del mapa en papel (gráfico). No es un mapa de bits. El MDE no contiene contornos de elevación, solo los valores de elevación específicos en ubicaciones de puntos de grilla específicos. Delimitación de los parámetros del terreno, tales como pendiente, red de drenaje, límites de cuencas, etc. Estos parámetros a menudo son necesarios en la preparación del plan de desarrollo y conservación de recursos naturales, desarrollo de infraestructura, urbanismo, entre otros. Un MDE generado a partir de datos estéreo debe ser validado usando PCT.

2.1.2 Fuentes de datos para la generación de un MDE.

Un MDE podría generarse utilizando métodos como la fotogrametría desde el levantamiento aéreo, el LIDAR, el radar de apertura sintética interferométrica (InSAR) y el levantamiento de tierra (Li et al, 2005). Otros métodos de adquisición de MDE son el sistema de posicionamiento global cinemático en tiempo real (RTK GPS), fotografías de satélites ópticos y mapas topográficos. Las técnicas terrestres se utilizan en el mapeo geodésico y topográfico, como el desplazamiento, el aumento trigonométrico y la nivelación taquimétrica, donde la habilidad y experiencia profesional del topógrafo determina la precisión del MDE resultante. Los cambios de pendiente deben medirse para obtener datos de altura precisos entre los puntos medidos e interpolarlos entre estos puntos conocidos (Karel 2009).

El LIDAR aéreo es un método similar a la fotogrametría pero utiliza sensores activos. LIDAR utiliza el principio de rayo láser activo que se emite desde el sensor dirigido hacia el suelo. El tiempo de emisión del láser hasta el momento en que regresa lo registra el sensor, por lo tanto, tanto la primera como la última devolución se pueden adquirir en una sola vez (Karel, 2009). Se registran los datos de la nube de puntos que se utilizan para la interpolación y generación de MDE. Las unidades LIDAR basadas en tierra se conocen como escáneres láseres terrestres (TLS).

Otra fuente de datos para la generación de MDE es estéreo-radargrametría, donde, en lugar de utilizar las cámaras como en la fotogrametría, la radargrametría se logra a partir de la detección de radio activa y el alcance (RADAR). El RADAR es muy ventajoso debido a que puede funcionar en cualquier tipo de clima mientras opera con microondas que penetran a través de las nubes, lo que permite que se representen las propiedades geométricas y eléctricas de las superficies (Bamler y Hartl 1998; Toutin y Gray, 2000; Rosen et al. 2000).

También se puede generar MDE a partir de datos provenientes de InSAR / IFSAR. La geometría de visualización de InSAR implica dos posiciones de antena SAR separadas por una distancia corta y ubicación en el suelo. La fase se mide por cada antena SAR, relacionada con el número de longitud de onda de la señal necesaria para cubrir el rango desde la antena hasta el suelo y regresar al sensor (Smith 2002).

Finalmente, las cámaras aéreas digitales se utilizan actualmente para adquirir imágenes de ciertas altitudes que luego se llevan a una computadora para su procesamiento. Las cámaras conectadas a la parte inferior de una aeronave (no tripulada o tripulada) se llevan a una cierta altitud desde donde se capturan las fotografías / imágenes con las superposiciones adecuadas para garantizar el mosaico preciso y la vista estereoscópica 3D. Este enfoque final se

ha adoptado en esta investigación utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

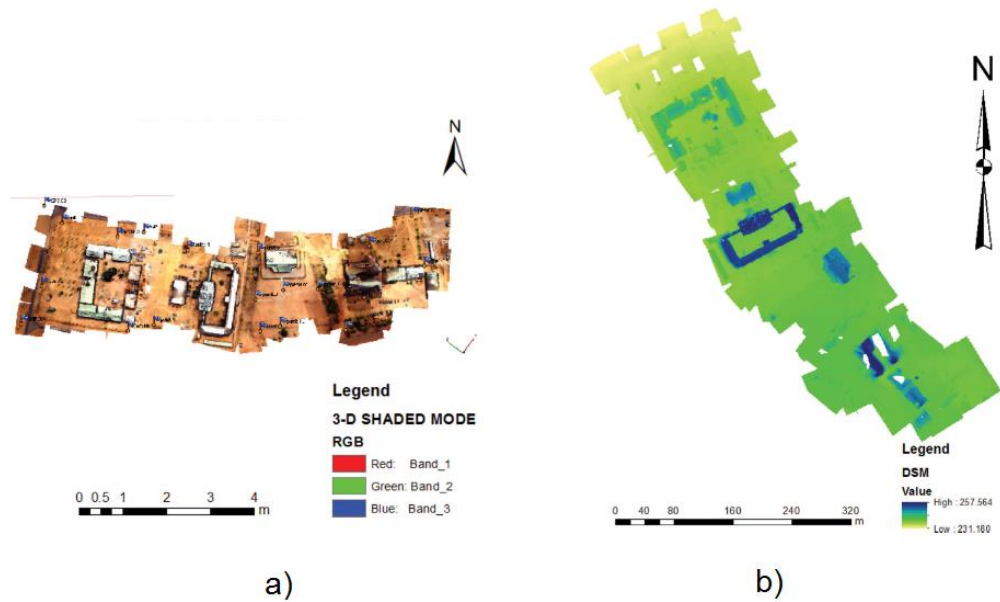


Figura 2.2. a) Modelo 3D (malla) en modo sombreado. b) Modelo digital de elevación.

Fuente: *Oluibukun Gbenga Ajayi (2017)*.

2.2 Sensores Remotos

Esta tecnología ofrece una nueva gama de aplicaciones en muchas áreas de investigación diferentes, incluidas la agricultura, la arqueología, la biología y la hidrología. También se observa un aumento de los estudios que usan fotogrametría VANT en geociencias, donde los MDE y las ortofotos se usan típicamente para el mapeo y el monitoreo, la detección de objetos o la cuantificación de cambios topográficos. Clásicamente, los MDE se producen

mediante análisis fotogramétricos de estudios terrestres o trabajos realizados en el aire y el espacio. La detección y el rango de la luz han surgido más recientemente como una alternativa para generar MDE de alta resolución. Comparado con estos métodos, la fotogrametría VANT puede ser atractiva debido a:

- ✓ La portabilidad de las plataformas VANT requeridas.
- ✓ La disponibilidad de un software fácil de usar para la evaluación de datos.
- ✓ La posibilidad de llegar a zonas inaccesibles con encuestas terrestres.
- ✓ El costo relativamente bajo.

Los VANT se pueden usar para recopilar datos de sensores terrestres y entregar los datos recopilados a estaciones base terrestres (E. Tuyishimire, 2017). Los vehículos aéreos no tripulados equipados con sensores también se pueden utilizar como redes de sensores aéreos para el monitoreo ambiental y la gestión de desastres (M. Quaritsch, 2010).

Se han adquirido numerosos conjuntos de datos procedentes de la detección remota de VANT's para respaldar a los equipos de investigación, que sirven para una amplia gama de aplicaciones: monitoreo de cultivos, estimaciones de rendimiento, monitoreo de sequías, monitoreo de la calidad del agua, especies de árboles, detección de enfermedades, entre otras (Vito, 2017).

El enfoque VANT puede ser útil para producir modelos espacio-temporales de alta resolución, en período competitivo y recursos, que proporcionan datos 3D útiles para muchas aplicaciones de monitoreo implementados en SIG, como información georreferenciada a gran escala derivada de ortoimágenes y MSD (Yastikli et al., 2013). La característica más llamativa de los datos de los VANT es la resolución espacial muy fina, tan

pequeña como la escala centimétrica (o escalas potencialmente más finas), como lo demuestran muchos estudios. Por ejemplo, Pádua (2018) producen imágenes con píxeles de 2.4–3.8 cm, y Zhou (2018) imágenes con píxeles de 5 cm. Aunque los científicos apenas están comenzando a explorar la detección remota en esta escala, esta resolución fina permite una escala de características fundamentalmente diferente a la del mapa, como las malezas pequeñas en un campo agrícola (Stroppiana, 2018).

Las principales aplicaciones de los VANT (Figura 2.3) en la producción de datos espaciales para el modelado y análisis SIG son: territorial, geológica, urbanística, agrícola y forestal (Perko, 2015; Höflel., 2013; Susaki, 2012; Grenzdörffer, 2008).

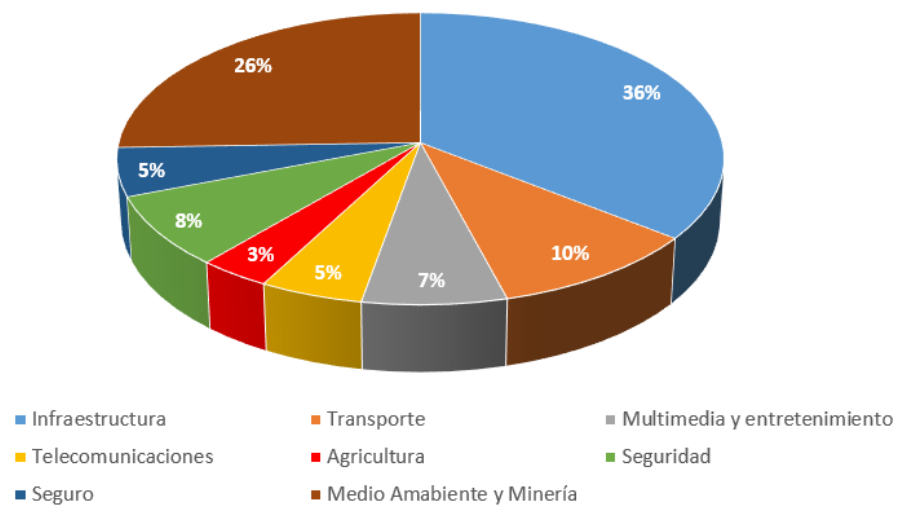


Figura 2.3. Porcentaje del uso de VANT en industrias. Fuente: Fuente: *H. Shakhathreh (2018)*.

En la Figura 2.4 se presenta la participación en el mercado relacionados a las tecnologías de adquisición remota de datos. Radares y equipos de comunicaciones dominan el mercado global de carga útil de VANT con una participación de mercado cercana al 80%, seguido del segmento de cámaras y

sensores con alrededor del 11% y un segmento de armamento con casi el 9% (The Global UAV Payload Market 2017-2027, 2017).

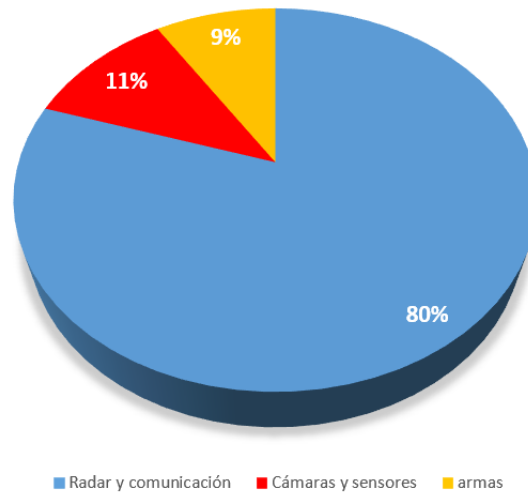


Figura 2.4. Predicciones del mercado de VANT para el año 2027. Fuente: *H. Shakhathreh (2018)*.

Para fines de investigación sobre formas terrestres, el uso de adquisiciones de VANT permite obtener datos morfológicos detallados del área, que pueden procesarse para generar un MDE; con estos resultados podemos proceder en muchos casos a actualizar eficazmente la cartografía tradicional y los datos numéricos. Sin embargo, la información 3D con respecto a la superficie de la Tierra debe procesarse para la derivación de un MDE útil, sin la interferencia causada por la cubierta vegetal y los edificios. En la literatura, muchas aplicaciones en esta dirección se refieren a datos de nubes de puntos a partir de fotogrametría aérea o escaneo láser aéreo y diferentes enfoques en el proceso de filtrado y algoritmos (Hosseini, 2014; Korzeniowska, 2011, Chen, 2007; Masaharua, 2002).

Las técnicas comúnmente utilizadas para producir ortofotos a partir del movimiento generan datos de nubes de puntos que implican una estructura tridimensional inherente a los datos (Guerra Hernández et al. 2018), a diferencia de las imágenes satelitales convencionales de fotograma único. Esto permite no solo la producción de MDE de alta resolución espacial (por ejemplo, un MDE de 5

cm por Gonçalves, Pérez y Duarte 2018), sino que permite que la tercera dimensión sea una parte integral de las técnicas de análisis de imágenes, tales como trabajo individual de identificación de árboles de Carr y Snyder (2018).

2.2.1 Sistemas de percepción remota

Existen dos tipos principales de sistemas de percepción remota: activos y pasivos (NASA, 2017).

En el sistema de percepción remota activa, los sensores son responsables de proporcionar la fuente de energía necesaria para detectar los objetos. El sensor transmite radiación hacia el objeto a investigar, luego el sensor detecta y mide la radiación que se refleja desde el objeto. La mayoría de los sistemas remotos activos utilizados en aplicaciones de detección remota operan en la porción de microondas del espectro electromagnético, y esto los hace capaces de propagarse a través de la atmósfera en la mayoría de las condiciones (NASA, 2017). Los sistemas de percepción remota activos incluyen altímetro láser, LiDAR, radar, instrumento de alcance, dispersómetro y sonda.

En el sistema de detección remota pasiva, el sensor detecta la radiación natural emitida o reflejada por el objeto. La mayoría de los sensores pasivos operan en las partes visible, infrarroja, infrarroja térmica y de microondas del espectro electromagnético (NASA, 2017). Los sistemas de detección remota pasiva incluyen acelerómetro, radiómetro hiper-espectral, radiómetro de imagen, radiómetro, sonda, espectrómetro.

Los sensores activos comunes en sensores remotos son LiDAR y radar. Un sensor LiDAR dirige un rayo láser a la superficie de la Tierra y determina la distancia al objeto registrando el tiempo entre los pulsos de luz transmitidos y retrodispersados. Un sensor de radar produce una imagen bidimensional de la

superficie al registrar el rango y la magnitud de la energía reflejada de todos los objetos. El sensor pasivo común en la teledetección es el espectrómetro. Un sensor de espectrómetro está diseñado para detectar, medir y analizar el contenido espectral de la radiación electromagnética incidente. Las diferencias entre ambos sistemas se pueden observar en la Figura 2.5.

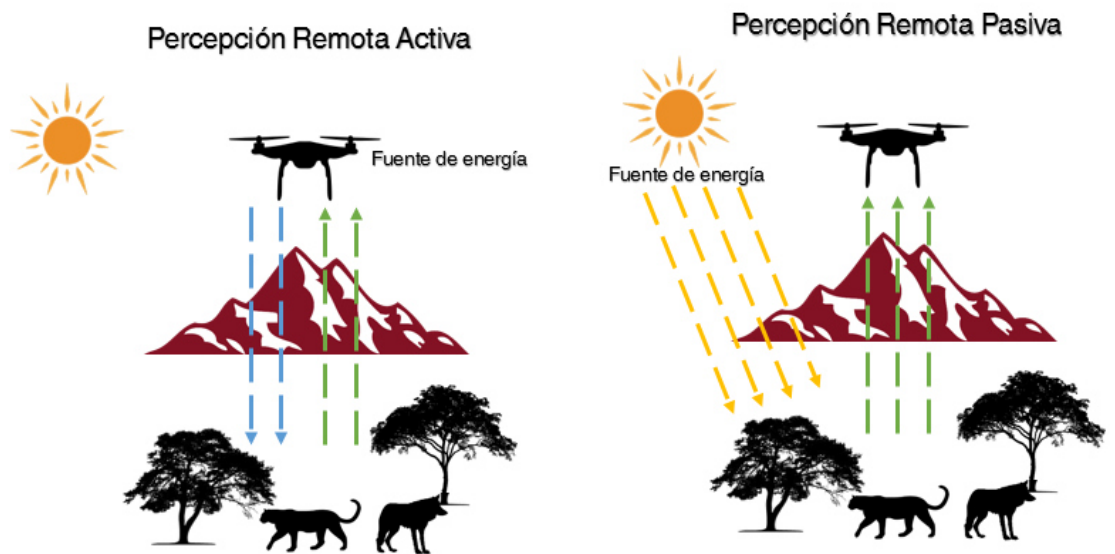


Figura 2.5. Diferencias entre la percepción remota activa y pasiva. Fuente: *H. Shakhatreh (2018)*.

En la Tabla 2.1 se establece una comparación entre los sistemas de percepción remota activa y pasiva, basados en la frecuencia operativa y las aplicaciones correspondientes a cada sistema.

Tabla 2.1: Comparación de Sistemas de Percepción remota activa y pasiva.

Tipo de percepción remota	Frecuencia de operación	Tipo de sensor	Aplicaciones
Percepción remota activa	Porción de microondas del espectro electromagnético	Altímetro láser	Mide la altura de un VANT con respecto a la superficie media de la tierra para determinar la topografía de la superficie subyacente.
		LiDAR	Determina la distancia al objeto al registrar el tiempo entre los pulsos de luz transmitidos.
		Radar	Produce una imagen bidimensional de la superficie y la magnitud de la energía reflejada.
		Dispersómetro	Deriva mapas de la velocidad y dirección del viento en la superficie al medir la radiación retrodispersada
		Sonda	Mide la distribución vertical de precipitación, temperatura, etc.
Percepción remota pasiva	Partes visibles, infrarrojas, infrarrojas térmicas y de microondas del espectro electromagnético	Acelerómetro	Mide dos tipos generales de acelerómetros: Las aceleraciones de traslación y las aceleraciones angulares.
		Radiómetro hiperspectral	Distingue entre diferentes objetivos en función de su respuesta espectral en cada una de las bandas estrechas.
		Radiómetro de imagen	Proporciona una matriz bidimensional de píxeles a partir de la cual se puede producir una imagen.
		Radiómetro	Mide la intensidad de la radiación electromagnética en algunas bandas dentro del espectro.
		Sonda	Mide las distribuciones verticales de los parámetros atmosféricos como la temperatura, la presión y la composición a partir de información multispectral.
		Espectrómetro	Se diseña para detectar, medir y analizar el contenido espectral de la radiación electromagnética incidente.

2.2.2 Planificación de vuelo con VANT

Cada misión de vuelo con VANT es única en su naturaleza, aun así, deben de seguirse pasos y procesos. Una misión de vuelo VANT empieza con la planificación del vuelo (C. Hugenholtz, 2013). Este paso depende del algoritmo específico de planificación de vuelo y se utiliza un mapa de fondo o una imagen satelital como referencia para definir el área de vuelo.

Luego se incluyen datos adicionales, como la altitud de vuelo deseada, la distancia focal y la orientación de la cámara, y por supuesto, la trayectoria de vuelo deseada. El algoritmo de planificación de vuelo encontrará una manera eficiente de obtener imágenes estéreo superpuestas que cubran el área de interés.

Durante el proceso de planificación de vuelo, el algoritmo puede ajustar varios parámetros hasta que el operador esté satisfecho con el plan de vuelo. Como parte del proceso de planificación de la misión de vuelo, los ajustes de velocidad del obturador de la cámara deben satisfacer las diferentes condiciones de iluminación. Si el tiempo de exposición es demasiado corto, las imágenes pueden ser demasiado oscuras para diferenciar entre todas las características clave de interés, pero si es demasiado largo, las imágenes podrían salir borrosas o muy brillosas.

Con el plan de vuelo generado se carga en piloto automático el VANT. El piloto automático utiliza las instrucciones contenidas en el plan de vuelo para encontrar las tasas de ascenso y los ajustes posicionales que permiten al VANT seguir la ruta planificada lo más cerca posible durante el vuelo.

El piloto automático lee los ajustes del sistema global de navegación, los satélites y la unidad de medición inicial varias veces por segundo durante todo el vuelo. Una vez finalizado el vuelo, el piloto automático descarga un archivo de registro, este archivo contiene información sobre las ubicaciones VANT 3D

registradas durante todo el vuelo, así como información sobre cuándo se activó la cámara.

La información del archivo de registro se utiliza para proporcionar estimaciones iniciales de las posiciones del centro de la imagen y las orientaciones de la cámara, que luego se utilizan como entradas para recuperar las posiciones exactas de los puntos de superficie (K. Whitehead, C. H. Hugenholtz, 2014).

2.2.3 Procesamiento y análisis de imágenes

El flujo de procesamiento de imágenes generalmente es el mismo para la mayoría de los algoritmos de procesamiento de imágenes procedentes de la percepción remota.

Primero, el algoritmo utiliza el archivo de registro del piloto automático del VANT para proporcionar estimaciones iniciales para la posición y orientación de cada imagen. Luego, el algoritmo aplica un proceso de triangulación aérea en el cual el algoritmo restablece las verdaderas posiciones y orientaciones de las imágenes de una misión aérea.

Durante este proceso, el algoritmo genera una gran cantidad de puntos de enlace automatizados para los puntos conjugados identificados en múltiples imágenes. Luego, un ajuste de bloque de paquete utiliza estos puntos de enlace automatizados para optimizar las posiciones y orientaciones de la foto al generar un gran número de observaciones redundantes, que se utilizan para obtener una solución eficiente a través de un ajuste riguroso de mínimos cuadrados. Para proporcionar una verificación independiente de la precisión del ajuste, el algoritmo incluye una serie de puntos de verificación. Luego, las imágenes orientadas se utilizan para crear un modelo de superficie digital, que proporciona

una representación detallada de la superficie del terreno, incluidas las elevaciones de objetos elevados, como vegetación y edificios.

Posteriormente se genera una nube de puntos densos al combinar características en varios pares de imágenes. En esta etapa, se puede generar un modelo de terreno digital, que se conoce como un modelo de tierra desnuda (K. Whitehead, 2013).

Un modelo de terreno digital es un producto más útil que un modelo de superficie, porque se elimina el ruido de alta frecuencia asociado con la cubierta vegetal.

Una vez que el algoritmo genera un modelo de terreno digital, se puede realizar el proceso de ortorrectificación para eliminar la distorsión en las imágenes originales. Después del proceso de ortorrectificación, el algoritmo combina las imágenes individuales en un mosaico, para proporcionar una imagen perfecta del área de la misión a la resolución deseada. (Whitehead y C. H. Hugenholtz, 2014). El proceso completo del procesamiento de datos generados en campo se presenta en la Figura 2.6.

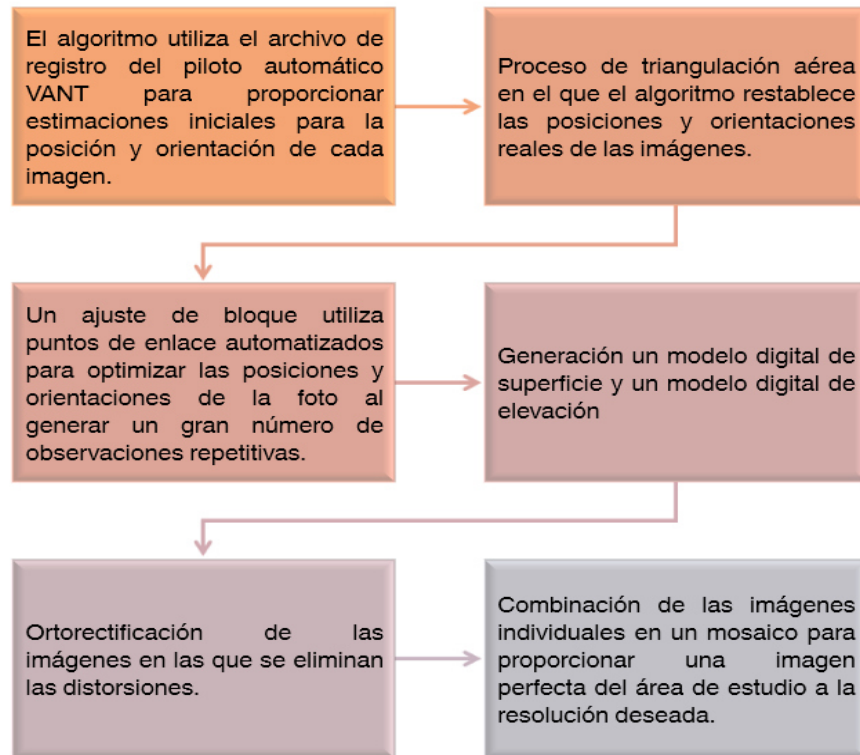


Figura 2.6. Procesamiento con imágenes capturadas con VANT. Fuente: *H. Shakhathreh (2018)*.

2.2.3.1 Algoritmos en la Fotogrametría

La perspectiva de la fotogrametría tradicional se basa en las posiciones y puntos específicos conocidos (parámetros externos e internos) de imágenes bidimensionales tomadas desde diferentes posiciones para reconstruir objetos tridimensionales. El principio básico es la reconstrucción de las trayectorias de los rayos entre el plano de la imagen y el objeto mediante la triangulación (Aber, 2010).

En la fotogrametría aérea de gran formato, la orientación externa se puede medir utilizando la combinación precisa de GPS y la Unidad de Medición Inercial (IMU). La orientación externa también puede ser determinada con mayor exactitud por los PCT que deben marcarse en el campo y medirse con una alta precisión de centímetros o menos (Aber, 2010).

Para evitar la necesidad de al menos tres PCT por imagen, se puede realizar el llamado ajuste de bloque de paquetes, combinando varias imágenes en bloques. Las imágenes en un bloque se conectan mediante puntos de imagen o también conocidos como puntos de enlace, los que aparecen en dos o más imágenes al momento de marcar los PCT en cada foto.

El término "paquete" se refiere al conjunto de rayos de luz que se ajustan para adaptarse de manera ideal al objeto y la posición de la cámara (Figura 2.7). Esto significa que los parámetros internos y externos se ajustan en un paquete (Triggs, 1999).

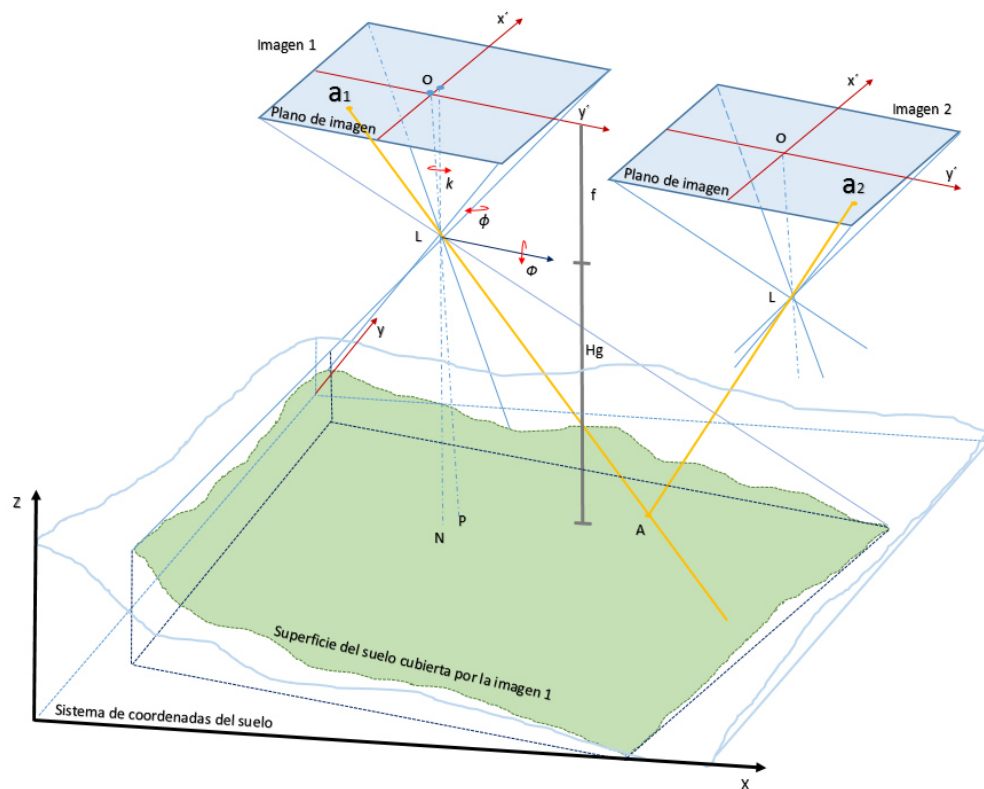


Figura 2.7. Ilustración esquemática de la reconstrucción de las coordenadas del terreno utilizando fotogrametría. Fuente: Aber (2010).

Especialmente en la percepción remota utilizando VANT's, la medición de parámetros internos y externos con una buena precisión, generalmente se asocia con costos elevados. Aviones pequeños, cometas o globos no podrían soportar el peso de tales sistemas de medición. La estructura del movimiento, en inglés: *Structure for Motion (SfM)*, elimina la necesidad de realizar estas mediciones, ya que los parámetros se calculan directamente de las imágenes altamente redundantes, mediante el ya mencionado ajuste de paquete. Esta técnica se basa en los mismos principios matemáticos que la fotogrametría convencional (Westoby, 2012).

Primeramente, se detectan distintas características de puntos en todas las imágenes y se combinan utilizando, por ejemplo, el algoritmo del detector de punto clave de Transformación de Característica Invariante, en inglés *Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*, que proporciona la ubicación de cada punto y un descriptor local. El descriptor local debe ser distintivo e invariante para diferentes condiciones como ángulos de visión, resoluciones de imágenes e iluminaciones (Lowe, 2004). Este algoritmo es una de las principales diferencias a la fotogrametría convencional, ya que permite la adquisición de imágenes no estructuradas, a diferencia de las aplicaciones fotogramétricas convencionales, donde se utilizan planes de vuelo paralelos para adquirir imágenes superpuestas casi ortogonales (Fonstad, 2013).

El software de fotogrametría utilizado en este estudio trabaja el algoritmo de la Estructura del Movimiento y no utiliza el algoritmo SIFT, pero el algoritmo SfM tiene una calidad de alineación un poco más alta que el algoritmo SIFT (Snavely, 2008). Los parámetros de la cámara luego se reconstruyen y optimizan minimizando el error de reproyección, que es la suma de las distancias entre las proyecciones y las características de imagen correspondientes. El algoritmo de la Estructura del Movimiento, utiliza un ajuste de paquete para refinar repetitivamente el modelo durante la alineación de la imagen.

El enfoque de la Estructura del Movimiento se diferencia de la fotogrametría convencional estimando primero las ubicaciones relativas de las cámaras para luego introducir los PCT, pero no se desarrollan de manera separada (Fonstad, 2013 – Robson, 2014).

Finalmente, se calcula una nube de puntos densos tomando como base la nube de puntos dispersos y las posiciones de cámara calculadas (Westoby, 2012). Esto se puede lograr mediante el uso de un algoritmo Multi-View Stereo (MVS).

2.3 Cuencas Hidrológicas

La situación respecto al agotamiento del agua se ha agravado mucho en los últimos tiempos, de toda el agua que existe en nuestro planeta, solamente el 2.5% es agua dulce, y de ese porcentaje únicamente el 0.4% pertenece a cuerpos de agua dulce superficiales como ríos, lagunas, arroyos, entre otros. Una buena parte del agua dulce se encuentra en las aguas subterráneas (30%), mientras que los glaciares ocupan el mayor porcentaje en cantidad de estas (68.7%) (PNUMA, 2007).

Las cuencas son las unidades primordiales de la hidrología. Una cuenca es una superficie de terreno en la que el agua resultante de la precipitación se desplaza hacia zonas topográficas que tienen una elevación menor debido al efecto de la gravedad que genera un sistema de drenaje, para posteriormente se derive hacia otras cuencas adyacentes o en otros casos al océano (Breña & Jacobo, 2006).

Teniendo en cuenta el tipo de salida de flujos de agua, se clasifican principalmente en dos tipos de cuencas: exorreicas y endorreicas ver Figura 2.8.

Las cuencas endorreicas o cuencas cerradas son las que la salida del flujo de agua se encuentra dentro de los límites de la cuenca y comúnmente son lagos

o lagunas. En cambio, las cuencas exorreicas o cuencas abiertas son aquellas que tienen la salida de agua dentro de los límites de la cuenca pero que las descargas se vierten en una corriente o en el océano.

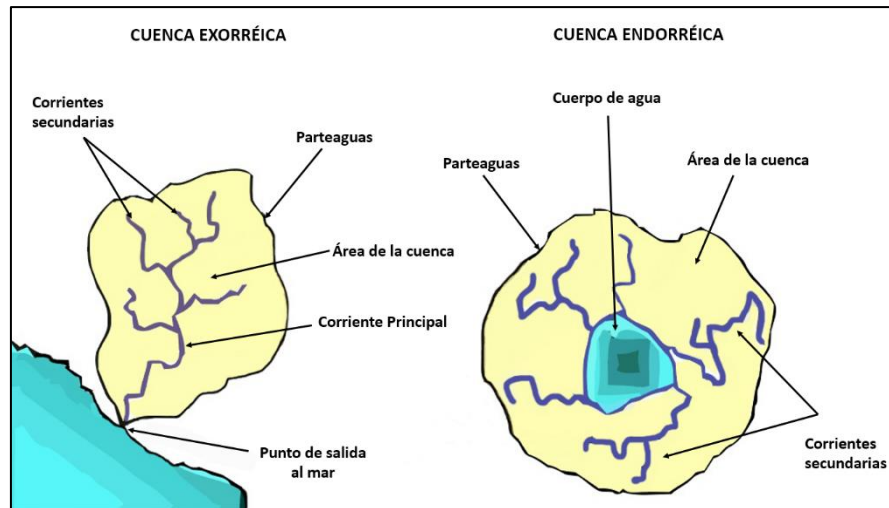


Figura 2.8. *Diferencias entre Cuenca Exorreica y Cuenca Endorreica.* Fuente: Breña, A.F; Jacobo, M.A. (2006).

En el área de cuenca convergen aguas provenientes de diversos puntos, estas aguas se unen y posteriormente drenan hacia otro cuerpo de agua. Una cuenca hidrográfica se diferencia de una cuenca hidrológica porque la primera está referida solamente a aguas superficiales, mientras que la otra abarca también las aguas subterráneas.

La cantidad de agua que fluya por las cuencas va a depender de diferentes factores como la geografía, la cantidad de precipitaciones, las propiedades del suelo (absorción, infiltración, porosidad, etc.), evaporación, entre otros. Y van a estar delimitadas unas de otras por las zonas morfológicamente elevadas o por formaciones geológicas que las separan (divisoria de aguas).

2.4.1 Características de una Cuenca Hidrográfica

Es importante identificar las características de una cuenca hidrográfica para la adecuada gestión y planificación del recurso hídrico en ella, estas características pueden categorizarse en: clima, geología y fisiografía, suelos, uso de suelo y condiciones de cobertura, hidrología de cuencas, características socioeconómicas.

Las características importantes a tener en cuenta en lo referente a cuencas hidrográficas son principalmente:

- ✓ **Área de drenaje:** Es un factor clave para el diseño hidrológico; da a conocer el volumen total de agua que se ha generado producto de la lluvia.
- ✓ **Longitud de la cuenca hidrográfica:** Este factor aumenta a medida que aumenta el drenaje; es de mucha importancia en los cálculos hidrológicos; se define como la distancia medida a lo largo del canal principal desde la salida de la cuenca hasta la división de la cuenca; la longitud de la cuenca se mide a lo largo de la ruta de flujo principal. Tanto el área de drenaje y la longitud de la cuenca ayudan a identificar y reflejar diferentes aspectos del tamaño de la cuenca hidrográfica.
- ✓ **Pendiente de la cuenca hidrográfica:** Las magnitudes de las inundaciones reflejan el impulso de la escorrentía. La pendiente es un factor importante en el momento de impulso. La pendiente de la cuenca hidrográfica refleja la tasa de cambio de elevación con respecto a la distancia a lo largo de la ruta de flujo principal.

- ✓ **Forma de la cuenca hidrográfica:** Las cuencas hidrográficas tienen una variedad infinita de formas, y éstas reflejan la manera en que la escorrentía se acumulará en la salida. Por ejemplo, una cuenca hidrográfica circular daría lugar a la escorrentía desde varias partes de la cuenca hidrográfica hasta su salida al mismo tiempo.

2.4.2 Cuencas y Regiones Hidrográficas en México

A partir del año 1992, en la Ley de Aguas Nacionales se incorporó el principio de que las cuencas hidrológicas y acuíferos son las unidades de gestión del recurso hídrico, a partir de esto, numerosas instituciones y organismos estatales que se encargan de la gestión de los recursos hídricos, han distribuido al territorio mexicano de diferentes formas. A lo largo de los años se ha venido regionalizando las áreas hidrológicas en México, utilizando como base criterios hidrográficos y orográficos. Esto tiene como finalidad, un manejo descentralizado e integrado del recurso hídrico, para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental.

Surgió la necesidad de instaurar ciertos criterios de regionalización de las cuencas hidrográficas, con el objetivo de:

- ✓ Detallar unidades hidrográficas con una dimensión que permita inferir los datos locales y municipales, para hacer que una cuenca sea la figura de la planeación y gestión de los recursos naturales.
- ✓ Contar con un número manejable de unidades hidrográficas, y por lo tanto obtener también una mejor representación cartográfica de los fenómenos físicos.

Con fines de administrar las aguas nacionales, en la década de los años 60's, la Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos creó la primera regionalización hidrológica en México; además, la Comisión Nacional del Agua ha detallado 731 cuencas hidrológicas.

Las cuencas se agruparon en 37 regiones hidrológicas, mientras que las regiones hidrológicas se organizaron en 13 regiones hidrológico-administrativas. Las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas de México y se emplean para el cálculo del agua renovable. Y hasta el día de hoy se encuentran vigentes como fundamento para estudios técnicos referentes a hidrología y las demás regionalizaciones realizadas posteriormente (Figura 2.9).

En la actualidad, la demarcación de cuencas hidrográficas ha generado que se realice una administración del recurso hídrico de manera eficaz, incluso con el otorgamiento de concesiones de agua, de acuerdo a la abundancia o carencia de agua en cada cuenca.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha ubicado en México trece regiones hidrológico-administrativas las cuales gestiona, así mismo, la sociedad también forma parte de la gestión del agua de las cuencas por medio de los Consejos de Cuenca.

Además de la CONAGUA, otras entidades han delimitado las cuencas hidrográficas en México, El Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) distribuyó en 3000 cuencas alrededor del país, mientras que El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INEEC), delimitó un total de 1424 cuencas, teniendo en cuenta el comportamiento hídrico de éstas, dejando de lado el factor antropogénico y social (Secretaría de Gobernación, 2015).



Figura 2.9. Cuencas Hidrográficas en México. Fuente: CONAGUA (2014)

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Para el proyecto de investigación se definió un nivel relacional, pues previamente se identificaron, estudiaron, describieron y posteriormente se relacionaron las variables presentes en este estudio, como: altura de vuelo, especificaciones del equipo (dron), resolución, puntos de control en tierra, superposición de imágenes, softwares utilizados para la planificación de vuelo y para el procesamiento fotogramétrico.

El proyecto de tesis del presente documento es una investigación del tipo cuantitativa; pues se recopilaron, procesaron y analizaron datos adquiridos en campo, haciendo uso de herramientas tecnológicas, informáticas, matemáticas y de estadística para la obtención de resultados. Se utilizó la investigación cuantitativa porque se busca cuantificar el nivel de precisión de los MDE que se obtuvieron luego de la adquisición de datos en campo y del procesamiento de estos en gabinete. Las Fases de la metodología, así como las principales actividades, tareas y lugar de desarrollo de las mismas se presentan en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Metodología utilizada en la investigación. Fuente: Creación Propia

* Se utilizaron dos softwares para la planificación de los vuelos

DroneDeploy (Software A) y Pix4DCapture (Software B). En la etapa de procesamiento de los datos capturados con cada uno de estos softwares se tuvo en cuenta los puntos de control en tierra tomados con GPS manual y los que fueron tomados con GPS diferencial RTK, datos con los que se generaron cuatro MDE. Las especificaciones de los planes y ejecución de los vuelos con softwares A

y B, así como el posicionamiento de los puntos de control en tierra, se detallan en el punto 3.1 y se resumen en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Flujo de trabajo de los planes de vuelo. Fuente: Creación Propia

** Para la generación de los MDE, se procesó la información recabada en campo, generándose cuatro procesos: Dos con los datos provenientes del software A; con información de GPS manual y GPS diferencial RTK; y otros dos procesos con datos provenientes del software B, con datos de GPS manual y diferencial respectivamente. Para el procesamiento de los datos, se trabajó en dos computadoras, equipadas con una tarjeta gráfica Intel HD Graphics 620. Las computadoras tienen 8GB de RAM y 32 GB de RAM respectivamente. El esquema del trabajo realizado con el software de fotogrametría se detalla paso a paso en la Figura 3.3.

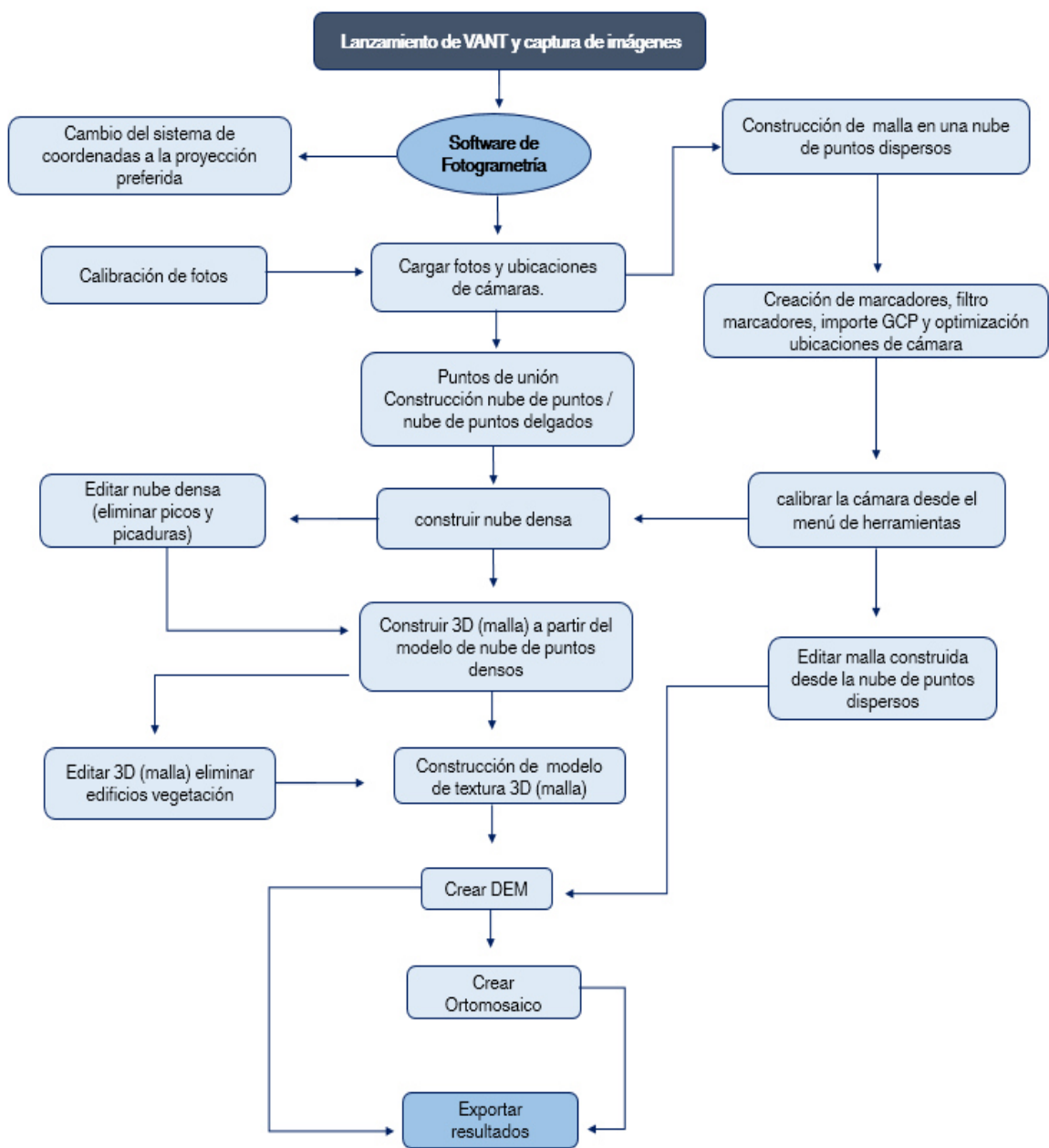


Figura 3.3. Flujo de trabajo en Software de fotogrametría. Fuente: Creación Propia

***La determinación de la red de flujo hídrico se realizó mediante un SIG, en el que se trabajó con el modelo de menor error procesado con el software de

fotogrametría y el que numéricamente es el más preciso. En el SIG se generó la dirección, acumulación, definición del flujo, la segmentación de corriente, la definición de la red y polígono de captación, la línea de drenaje y la ruta de flujo más larga, el proceso de cálculo se presenta en la Figura 3.4.

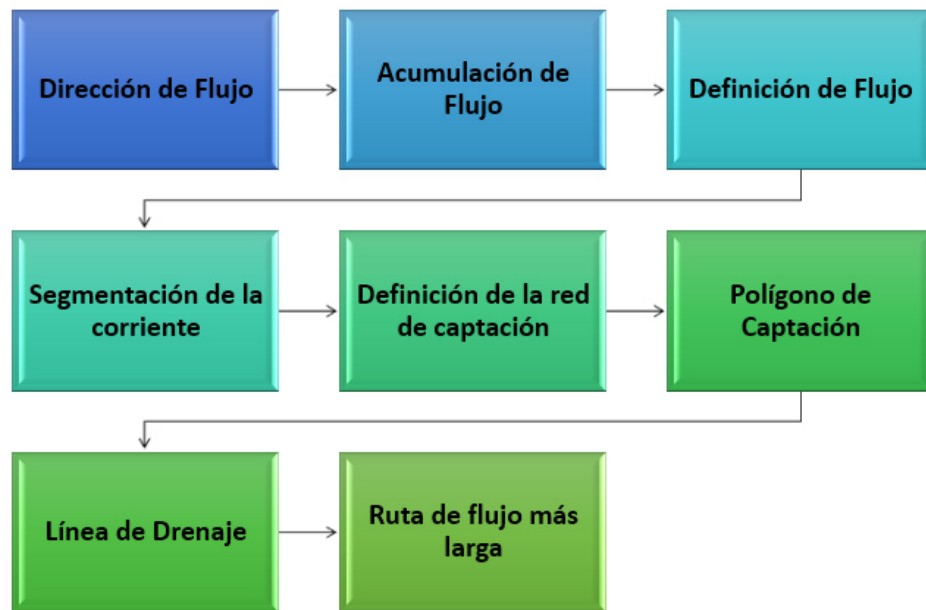


Figura 3.4: Flujo de trabajo en SIG para la generación de la red de flujo hídrico. Fuente: Creación Propia.

3.1 Comparación de Softwares de planificación de vuelo A y B

El proceso de adquisición de imágenes involucra a un equipo operativo responsable de monitorear el despegue y el aterrizaje, el estado de la batería, la conexión entre el VANT y el equipo de monitoreo en la estación de operación y asegurar las superposiciones de imagen adecuadas. También involucra al personal de tierra que fue responsable de la tarea de garantizar que el plan de vuelo diseñado se cumpliera y monitorear la altitud del VANT.

Para el caso del Software A, se programaron dos planes de vuelo que abarca la totalidad del área de estudio, y se tuvieron en cuenta características y datos como el tiempo de vuelo, número total de fotografías, altitud, dirección (tomando dos direcciones opuestas, 180° hacia una dirección y 180° hacia la otra, así cubre los 360°) y velocidad de vuelo, resolución, superposición de imágenes. Dichos datos se especifican a detalle en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Planes de Vuelo con Software A.

SOFTWARE A			
Plan de Vuelo 1		Plan de Vuelo 2	
Tiempo	16:59 min	Tiempo	20:52 min
Superficie	55 Ha	Superficie	74 Ha
Imágenes	174	Imágenes	227
Baterías	2	Baterías	2
Altitud de Vuelo	200 m	Altitud de Vuelo	200 m
Resolución	6.0 cm/pix	Resolución	6.0 cm/pix
Dirección de Vuelo	-105°	Dirección de Vuelo	141°
Velocidad de Vuelo	15 m/s	Velocidad de Vuelo	15 m/s
Superposición frontal	75%	Superposición frontal	75%
Superposición lateral	70%	Superposición lateral	70%
Total			
Tiempo		37.11 minutos	
Superficie		129 Ha	
Imágenes		401	
Baterías		4	
Altitud de Vuelo		200 m	
Resolución		6.0 cm/pix	

La Figura 3.5 muestra el área de estudio que se voló con los VANT y los dos planes de vuelo realizados con el software A.

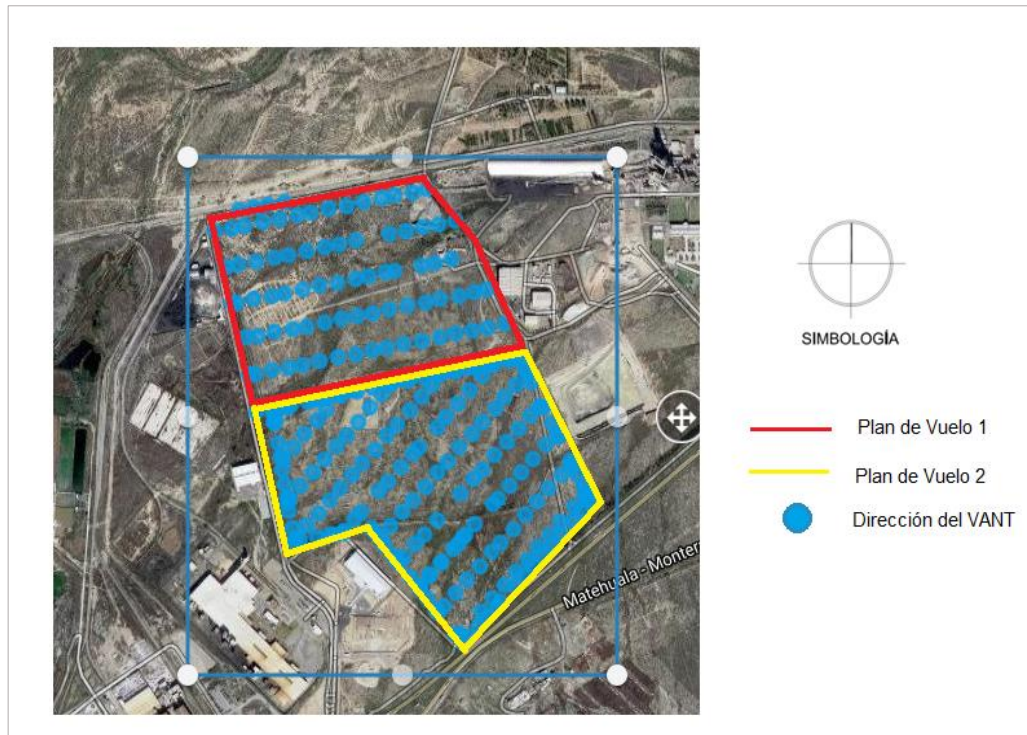


Figura 3.5. Planes de vuelo con Software A. Fuente: Creación Propia

Para el caso del Software B, se configuraron un total de nueve planes de vuelo, teniendo en cuenta el número de imágenes por vuelo, el tiempo, altitud de vuelo, la superficie, resolución, superposición de imágenes. Dichas especificaciones se muestran a detalle en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Especificaciones de los planes de vuelo con el Software B.

SOFTWARE B						
Vuelo	N° de imágenes	Tiempo (min)	Superficie (Ha)	Altitud (m)	Resolución	Superposición
1	70	11:06	16.6	200	9 cm/pix	75%
2	56	12:35	12.5	200	9 cm/pix	75%
3	54	15:51	14.6	200	9 cm/pix	75%
4	60	8:21	14.7	200	9 cm/pix	75%
5	51	9:05	9.6	200	9 cm/pix	75%
6	59	15:04	14.7	200	9 cm/pix	75%
7	54	12:25	14.6	200	9 cm/pix	75%
8	60	11:58	14.2	200	9 cm/pix	75%
9	60	11:15	17.6	200	9 cm/pix	75%
Total	524	1.8 Hrs	129 Ha	200	9 cm/pix	75%

La Figura 3.6 muestra el área que abarcan los planes de vuelo con los VANT y los nueve planes de vuelo realizados con el software B.



Figura 3.6. Planes de vuelo con el Software B. Fuente: Creación Propia

3.2 Ejecución del Vuelo

Con los planes de vuelo previamente realizados, se procedió a volar los VANT sobre el área de trabajo. Para la realización de este estudio se utilizaron dos drones con las especificaciones mostradas en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3.: *Especificaciones de los drones utilizados en el estudio.* Fuente: DJI

Phantom 3 Profesional		Phantom 4 Profesional	
Peso (Batería y Hélices Incluidas)	1280 g	Peso (Batería y Hélices Incluidas)	1 380 g
Tamaño Diagonal (Hélices Excluidas)	350 mm	Tamaño Diagonal (Hélices Excluidas)	350 mm
Velocidad Máx. en Ascenso	5 m/s	Velocidad Máx. en Ascenso	6 m/s
Velocidad Máx. en Descenso	3 m/s	Velocidad Máx. en Descenso	4 m/s
Velocidad Máx.	16 m/s (modo ATTI, sin viento)	Velocidad Máx.	20 m/s (modo ATTI, sin viento)
Modo GPS	GPS/GLONASS	Modo GPS	GPS/GLONASS
Máx. Duración de Vuelo	23 minutos aprox.	Máx. Duración de Vuelo	28 minutos aprox.
Cámara		Cámara	
Sensor	1/2.3" CMOS Píxeles efectivos: 12.4 M	Sensor	1/2.3" CMOS Píxeles efectivos: 12.4M
Lente	FOV 94° 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8, enfoque a ∞	Lente	FOV 94° 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8, enfoque a ∞
Tamaño Máx. de Imagen	4000×3000	Tamaño Máx. de Imagen	4000×3000
Modos de Fotografía	Disparo único Disparo en ráfaga: 3/5/7 disparos Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 Horquilla de Exposición a 0.7EV Bias Time-lapse	Modos de Fotografía	Disparo único Disparo en ráfaga: 3/5/7 fotogramas Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 horquilla de exposición a 0.7EV bias Timelapse HDR

El tiempo de duración de las baterías de los drones capturando imágenes en el aire fue de 13 minutos aproximadamente por lo que cada plan de vuelo debía

desarrollarse de manera pausada, es decir en dos partes. El tiempo de carga de batería de cada dron fue entre 1:40 horas, un ejemplo del trabajo de campo se presenta en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Trabajo en campo con dron.

3.3 Toma de Puntos de Control en Tierra

Para la toma de puntos de control en tierra (PCT), se utilizaron dos tipos de instrumentos para su medición: un GPS manual GARMIN y un GPS de doble frecuencia, la ubicación de los PCT en el área donde se desarrolló el proyecto de investigación se presenta en la Figura 3.8.



Figura 3.8: Posiciones de los PCT. Tomados con GPS diferencial RTK y PCT tomados con GPS manual.

Con el GPS manual se tomaron 6 PCT en diferentes puntos ubicados dentro del área de estudio, las coordenadas de estos puntos se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Coordenadas Geográficas de PCT con GPS manual.

Puntos tomados con GPS Manual GARMIN			
Punto PCT	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud Z
RAB01	100.52403	25.36669	1276 m
RAB02	100.52405	25.36664	1281 m
RAB03	100.52430	25.36641	1281 m
RAB04	100.52436	25.36666	1275 m
RAB05	100.52440	25.36687	1273 m
RAB06	100.52423	25.36689	1273 m

Con el GPS de doble frecuencia se establecieron 6 PCT ubicados de manera homogénea en el área de estudio para abarcarla por completo, los datos de los puntos se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: *Coordenadas Geográficas de PCT con GPS diferencial.*

Puntos tomados con GPS diferencial			
Punto PCT	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud Z
point 1	-100.881518	25.611960	1281 m
point 2	-100.878603	25.610006	1281 m
point 3	-100.874709	25.613199	1275 m
point 4	-100.875538	25.607625	1283 m
point 5	-100.877488	25.603012	1294 m
point 6	-100.870503	25.604837	1287 m

En la Tabla 3.6 se detallan los equipos utilizados en el trabajo, así como los dos softwares que se aplicaron para el desarrollo de los vuelos, así como especificaciones de cada equipo, altura, densidad de puntos, entre otros.

Tabla 3.6: *Especificaciones del trabajo.*

	SOFTWARE B	SOFTWARE A
Phantom 3	FOV 94° 20 mm	
	Altura: 200 m	
	N° fotos: 524	N° fotos: 401
	Densidad de puntos: 7.51	Densidad: 8.45 puntos/m ²
	Superficie: 129 Ha	
Phantom 4	FOV 94° 20 mm	
	Altura: 200 m.	
	N° fotos: 524	N° fotos: 401
	Densidad de puntos: 7.80	Densidad: 8.41 puntos/m ²
	Superficie: 129 Ha	

3.4 Procesamiento de Datos con Software de Fotogrametría

- a) Se crea el proyecto y se importan las fotografías obtenidas con el VANT, además se verifica que no exista la presencia de alguna fotografía descuadrada o mal capturada.

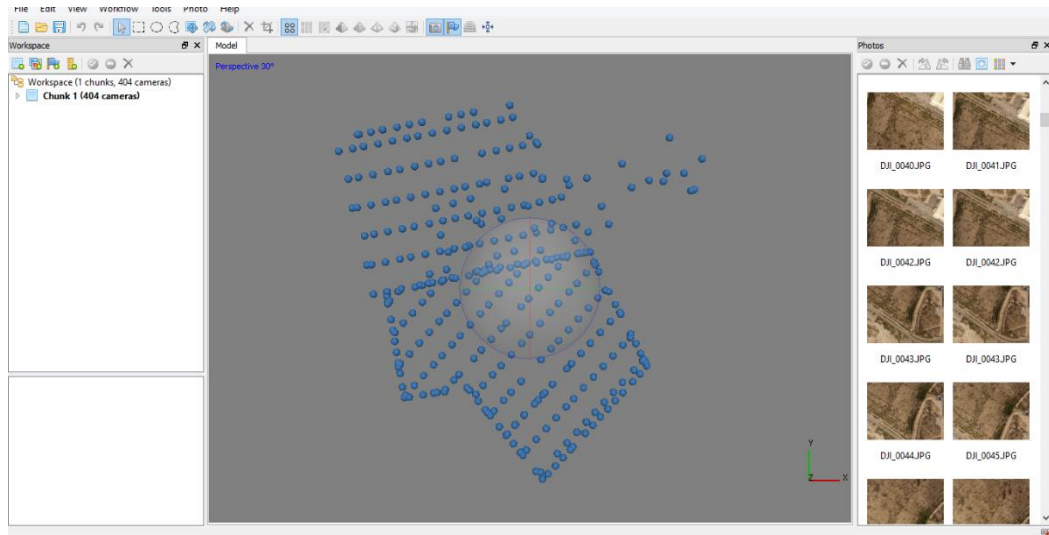


Figura 3.9. *Interfaz de Software de Fotogrametría.*

- b) Se calibra la cámara en el programa. Se configuró el tamaño de píxel (la dimensión física de un píxel en el sensor de la cámara digital) se estableció en el valor calculado de 0.0043 mm.
- c) Se orientan las fotografías, con una precisión alta y se toman como guía a los puntos de apoyo para el pre-proceso de emparejamiento de las fotos. En este proceso se realiza una referencia rápida de las imágenes haciendo coincidir puntos distintos (puntos clave) en imágenes adyacentes. En esta parte, el software de fotogrametría, detecta los puntos en las fotografías de origen y las variaciones de iluminación para generar un descriptor para cada punto según su vecindario local.

Estos descriptores se utilizan más adelante para detectar correspondencias en las fotos. Esto es similar al conocido enfoque del algoritmo SIFT, pero utiliza diferentes algoritmos para una calidad de alineación un poco más alta.

El Software utiliza un algoritmo detallado para encontrar ubicaciones aproximadas de la cámara y las refina más tarde con un algoritmo de ajuste de paquete por medio de un algoritmo muy parecido al de Bundler.

- d) Se crea la nube densa de puntos dispersos al alinear las fotografías con la configuración de "alta" precisión para obtener mayor exactitud. En este proceso, se estimaron las posiciones de la cámara y los parámetros de calibración de la cámara utilizando los puntos de enlace. La precisión se estableció en Alta, lo que significa que las imágenes originales no se escalaron antes del procesamiento.

Esta nube reúne las características o patrones encontrados entre las fotografías alineadas previamente. En la parte de filtración de mapas de profundidad se configuró en modo "Agresivo" (es la opción más idónea para ser utilizada en modelos terrestres) y se espera el tiempo de respuesta de máquina, pues es uno de los procesos que toma más tiempo.

Durante este proceso, no solo se determinan los parámetros externos, sino también los internos: la auto-calibración de la cámara. Éstas son la longitud focal, las coordenadas del punto principal, el coeficiente de transformación, que describe el ángulo entre el eje X y el eje Y de los píxeles (sesgo), los coeficientes de distorsión radial y los coeficientes de distorsión tangencial.

La Tabla 4.4, muestra todos los parámetros calculados durante el procedimiento de auto-calibración en el software de fotogrametría.

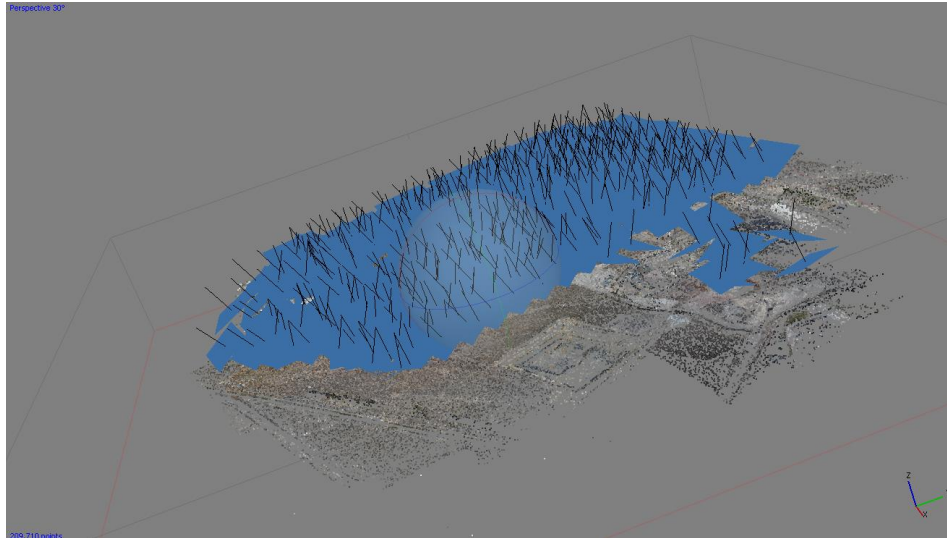


Figura 3.10: *Nube de puntos densa en Software de Fotogrametría.*

- e) Posteriormente se procede a la creación de la malla en el flujo de trabajo. Tomando como datos del tipo de superficie el bajo relieve / terreno y como los datos fuente de la nube de puntos densa creada anteriormente, también se seleccionó como opción “Alta” en el número de caras de la malla y la interpolación “habilitada” (Figura 3.11).

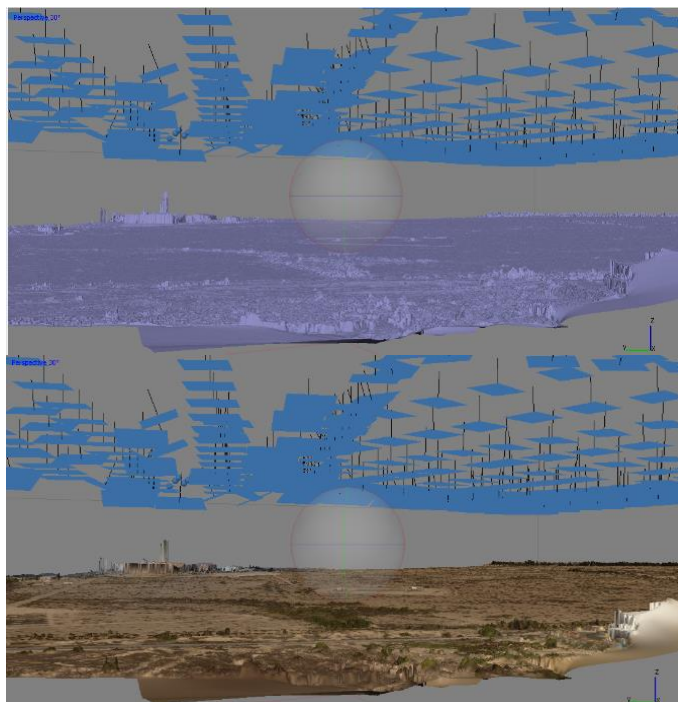


Figura 3.11: *Malla en sombreado a color y monocromático, en vista lateral – Software de Fotogrametría*

- f) Se definen y ubican los marcadores en las fotos, teniendo puesto un marcador, el software empezará a marcar las fotos coincidentes en las que aparece el mismo punto; todos los PCT deben comprobarse y reposicionarse con precisión en todas las fotografías, y aparece como señal una marca azul cuando está ubicado, y una marca verde cuando se logró hacer coincidir. Si una foto tiene una marca de marcador en ella, pero el PCT no está visible (oculto), se puede dejar como una bandera gris y no se utilizará, de lo contrario, se activará.

A diferencia de lo detallado para el enfoque tradicional de SfM (en el proceso de alineación de las fotografías), donde los PCT no se utilizan para alinear la cámara, los parámetros internos y externos de la cámara, estimados previamente se pueden optimizar utilizando los PCT. En esta parte del proceso, se evidencian posibles deformaciones no lineales y se ajusta la nube de puntos dispersos y los parámetros de la cámara al minimizar la suma del error de reproyección y el error de desalineación de coordenadas de referencia.

Se ubicaron los 6 puntos de control obtenidos con GPS manual y en otro proyecto los 6 puntos de control obtenidos con GPS de doble frecuencia RTK.

- g) Luego, se importan las coordenadas de cada uno de esos puntos, verificando que la longitud, latitud y altitud estén correctamente importados. Posteriormente, se calibra todo el mosaico con los PCT para la referenciación de la ortofoto.
- h) Se define el sistema de coordenadas en los ajustes, para el caso en estudio se definió el sistema WGS84.

- i) El software optimizó la distorsión estimada de la lente de la cámara. Con esta configuración en su lugar, se actualizaron las alineaciones de las fotografías, las posiciones estimadas de la cámara y la nube dispersa.
- j) Una vez optimizado, se vuelve a generar la nube de puntos densa. La calidad del cálculo se estableció en Media. Esto significa que las imágenes se reducen en escala antes del procesamiento. La resolución resultante para los modelos se encuentra en un rango de aprox. 8 y 9 cm / pix para imágenes desde una altura de 200 m.
- k) Posteriormente se creó la malla, ya que nube de puntos densos debe ser interpolada para recuperar información de altura desde cualquier punto dado. Como tipo de superficie, se seleccionó la opción "Height Field", porque esta opción está optimizada para superficies planas e imágenes aéreas. El recuento de polígonos se estableció en Alto, lo que significa que el número de caras de polígonos es igual a 1/5 del número de puntos en la nube de puntos densos. Para rellenar pequeños orificios dentro de la malla, se habilitó la interpolación.
- l) Se clasificó la nube de puntos densa, en la opción "Clases de nubes de puntos densa", se clasifica los puntos de terreno, para separar los puntos de terreno natural (que quedan de color café) y los puntos de objetos, como vegetación, vehículos, etc. (que quedan de color blanco) y de esa manera, obtener los puntos de terreno natural (Figura 3.12). En este paso están disponibles varios algoritmos de procesamiento. Los métodos de campo Exact, Smooth y Height se basan en el cálculo de mapas de profundidad por pares, mientras que el método Fast utiliza un enfoque de vista múltiple.

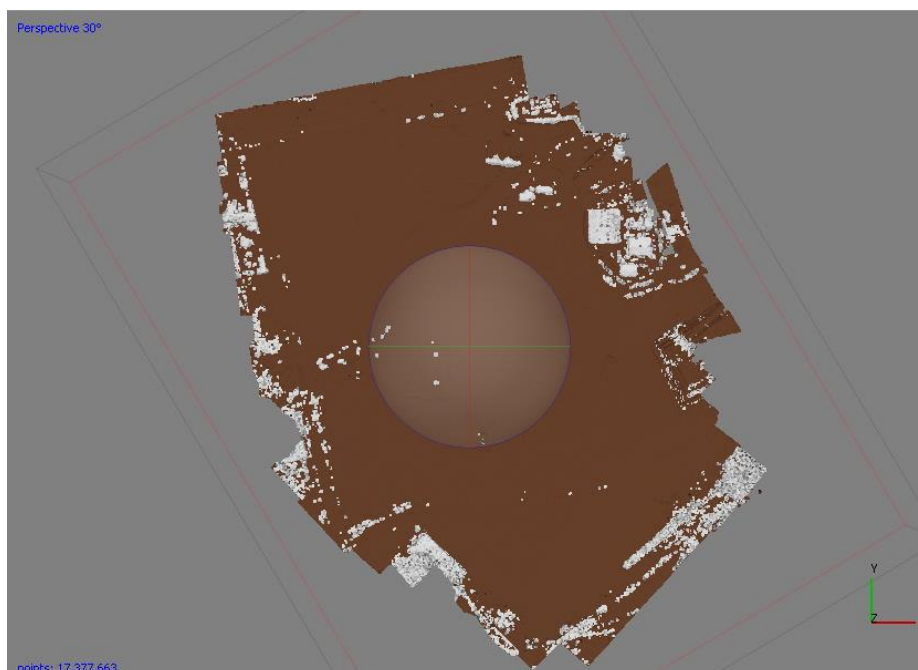


Figura 3.12: *Puntos clasificados de terreno – Software de Fotogrametría*

- m) Se exportaron los puntos de terreno natural, eligiendo en el cuadro de diálogo el sistema de coordenadas WGS84, los datos fuente de la nube de puntos densa, y se seleccionó la opción de "terreno" en la clasificación.
- n) Se procedió a la creación del MDE, teniendo en cuenta el sistema de coordenadas, se tomaron dentro de los parámetros los datos fuente de la nube de puntos densa y la interpolación habilitada.
- o) Luego se procedió a la creación del ortomosaico en el flujo de trabajo, con una proyección del tipo "Geográfica", se tomó en cuenta dentro de los parámetros de superficie el MDE, y del modo de mezcla el mosaico (por defecto).
- p) Una vez creados, se procedió a su exportación: tanto el ortomosaico como el MDE se exportaron en formato TIFF/GeoTIFF.

q) Posteriormente se procedió a comparar los resultados obtenidos en el Software de Fotogrametría de las diferentes configuraciones de equipo de captura de datos, de georreferenciación y de ejecución del plan de vuelo.

3.5 Generación de las redes de drenaje superficial

Para esta etapa del estudio se hizo uso de un Software SIG, que permite aplicaciones hidrológicas complejas, proporciona modelos de datos para redes hidrológicas y herramientas necesarias para calcularlas y analizarlas. Se utilizó una geodatabase de archivos para almacenar las redes de drenaje. Utilizando un comando Model Builder, se construyó un modelo que realiza todos los pasos necesarios mencionados anteriormente y en la Figura 3.4.

El primer paso es el llenado de los sumideros de drenaje dentro del DEM para permitir un flujo continuo desde cualquier punto dado. Las depresiones se llenan hasta la altura del píxel circundante más bajo.

El ráster resultante se utiliza para calcular la dirección del flujo para cada píxel utilizando el descenso más pronunciado desde ese píxel.

Bajo este procedimiento es posible determinar la red de flujo superficial de agua con una precisión más alta lo cual es un aporte en el cálculo de volúmenes y zonas de tránsito del agua,

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fueron desarrollados 4 procesos en el software de fotogrametría, por lo que se obtuvieron un total de 4 modelos con los mismos parámetros y diferentes resultados en exactitud.

4.1 Ubicaciones de la cámara y superposición de imágenes

La superposición de imágenes en el plan de vuelo con el software A, tiene una superposición frontal de 80% y lateral de 75%, en el caso del software B, las imágenes capturadas tienen una superposición de 75%. En la Tabla 4.1 se especifican los detalles como modelo de cámara, resolución, longitud focal en milímetros, el tamaño del pixel.

Tabla 4.1: *Especificaciones de cámara.*

Modelo de cámara	Resolución	Longitud focal	Tamaño del pixel	Precalibrado
F C330 (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 um	No

Se capturaron y procesaron un total de 401 imágenes con el software A. En la Tabla 4.2, se especifican los datos de vuelo tomados con el software A, que se utilizaron para la generación de cada MDE como el número total de

fotografías, la altura a la que se voló el VANT, la resolución del terreno, las estaciones de cámara, proyecciones y error de proyección.

Tabla 4.2: *Especificaciones de Vuelo A.*

Software A	
Puntos tomados con GPS manual	
Número de imágenes: 401	Estaciones de cámara: 393
Altura de vuelo: 227 m	Estaciones de cámara: 107,852
Resolución del terreno: 8.6 cm/pix	Proyecciones: 1,224,496
Área de cobertura: 1.82 Km ² .	Error de reproyección: 3.32 pix
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK	
Número de imágenes: 401	Estaciones de cámara: 393
Altura de vuelo: 231 m.	Estaciones de cámara: 108,007
Resolución del terreno: 8.62 cm/pix	Proyecciones: 1,226,365
Área de cobertura: 1,82 Km ² .	Error de reproyección: 1.92 pix

En el caso del Software B, se capturaron y procesaron 524 imágenes. En la Tabla 4.3, se especifican los datos de vuelo tomados con el software B, que se utilizaron para la generación de cada MDE como el número total de fotografías, la altura a la que se voló el VANT, la resolución del terreno, las estaciones de cámara, proyecciones y error de proyección.

Tabla 4.3: *Especificaciones de Vuelo B.*

Software B	
Puntos tomados con GPS manual	
Número de imágenes: 524	Estaciones de cámara: 524
Altura de vuelo: 272 m.	Estaciones de cámara: 209,710
Resolución del terreno: 8.86 cm/pix	Proyecciones: 433,274
Área de cobertura: 1,7 Km ² .	Error de reproyección: 78.2 pix
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK	
Número de imágenes: 524	Estaciones de cámara: 524
Altura de vuelo: 246 m.	Estaciones de cámara: 209,710
Resolución del terreno: 9.37 cm/pix	Proyecciones: 2,033,022
Área de cobertura: 2,87 Km ² .	Error de reproyección: 1.45 pix

Para completar con éxito la tarea de reconstrucción, es crucial garantizar la suficiente superposición de imágenes al momento de la obtención de datos de entrada. Para el caso de estudio, la superposición frontal fue de 75% y lateral de 70%. La Figura 4.1 a) representa la información capturada utilizando Software B y PCT con GPS manual. La Figura 4.1 b) representa la Información capturada utilizando Software B y PCT con GPS de doble frecuencia RTK. La Figura 4.1 c) representa la información capturada utilizando Software A y PCT con GPS manual y la Figura 4.1 d) representa la información capturada utilizando Software A y PCT con GPS de doble frecuencia RTK.

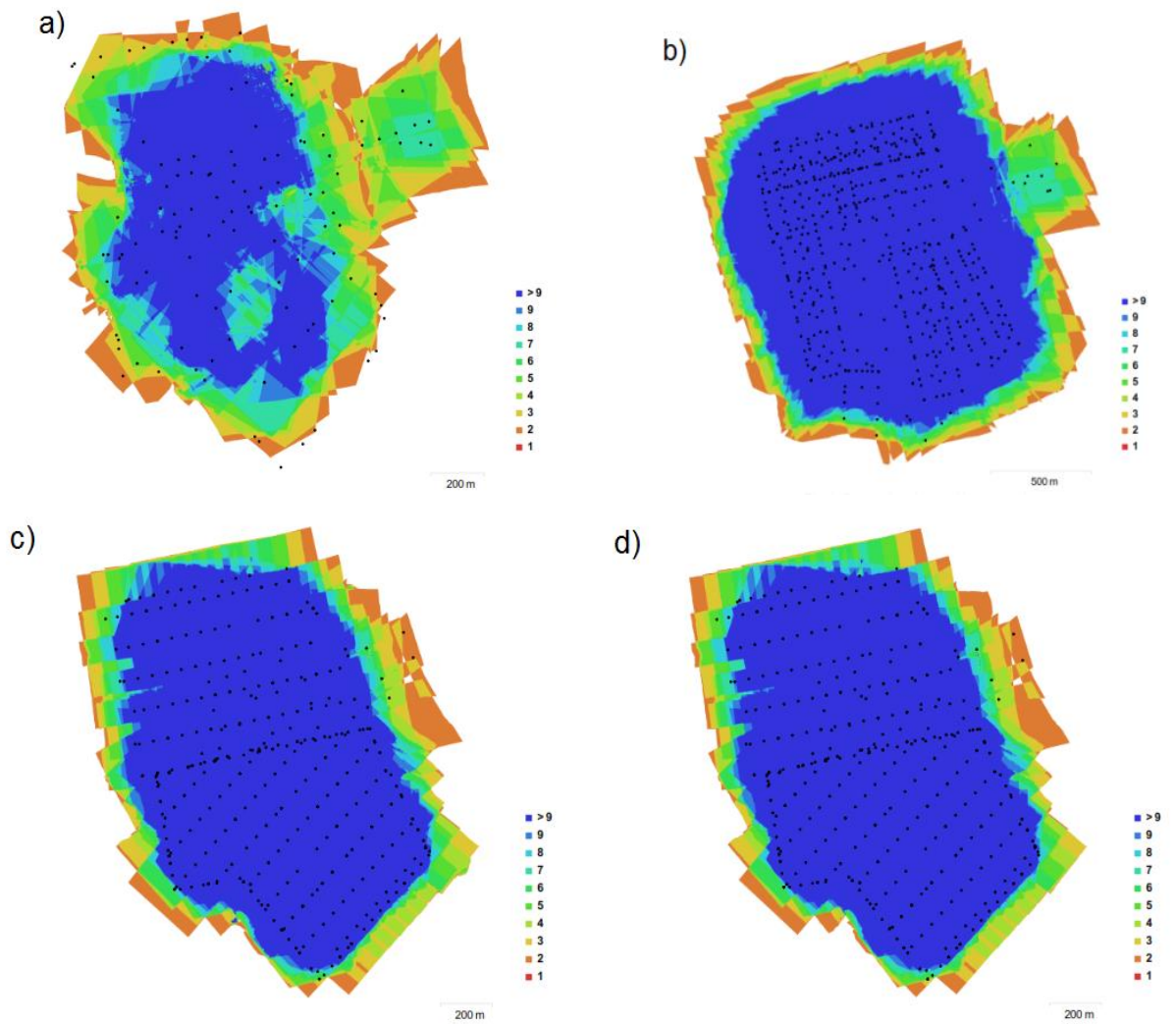


Figura 4.1: Ubicaciones de la cámara y superposición de imágenes.

4.2 Calibración de Cámaras

La Tabla 4.4 muestra los valores tanto en el software A como en el B, de las distancias focales (f_x y f_y), también se describen los valores de las coordenadas del llamado punto principal que debe estar en el centro de la imagen (C_x y C_y). Se presentan las distorsiones de la imagen: parámetros de distorsión radial (K_1 , K_2 , K_3 , K_4) y parámetros de distorsión tangencial (P_1 , P_2 , P_3 , P_4).

Tabla 4.4: Especificaciones de las fotografías obtenidas con VANT.

SOFTWARE B			
Puntos tomados con GPS manual			
Tipo:	Cuadro	Sesgo:	0
Fx:	2864.19	Cx:	2068.96
Fy:	2864.19	Cy:	1209.77
K1:	-0.0463222	P1:	0.00706484
K2:	0.0431104	P2:	0.00667807
K3:	-0.0359338	P3:	0
K4:	0	P4:	0
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK			
Tipo:	Cuadro	Sesgo:	0
Fx:	2341.26	Cx:	2012.26
Fy:	2341.26	Cy:	1486.38
K1:	-0.0107343	P1:	0.000142775
K2:	0.0109328	P2:	0.000661794
K3:	0.00444864	P3:	0
K4:	0	P4:	0
SOFTWARE A			
Puntos tomados con GPS manual			
Tipo:	Cuadro	Sesgo:	0
Fx:	2344.46	Cx:	1931.19
Fy:	2344.46	Cy:	1522.04
K1:	0.00418142	P1:	0.000807784
K2:	-0.0134263	P2:	-0.000807784
K3:	0.00714187	P3:	0
K4:	0	P4:	0
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK			
Tipo:	Cuadro	Sesgo:	0
Fx:	2388.64	Cx:	1931.4
Fy:	2388.64	Cy:	495.94
K1:	0.00455734	P1:	0.000832972
K2:	-0.0112745	P2:	-0.000263982
K3:	0.00587646	P3:	0
K4:	0	P4:	0

La Figura 4.2 de "Residuos de imagen" muestra el vector promedio del error de reproyección de los píxeles en las celdas correspondientes. Se muestra la cantidad de distorsión (error) corregida por el modelo de lente para el modelo de

cámara F C330 (3.61mm). La Figura 4.2 a) representa la información capturada utilizando Software B y PCT con GPS manual. La Figura 4.2 b) representa la información capturada utilizando Software B y PCT con GPS de doble frecuencia RTK. La Figura 4.2 c) representa la información capturada utilizando Software A y PCT con GPS manual y la Figura 4.2 d) representa la información capturada utilizando Software A y PCT con GPS de doble frecuencia RTK.

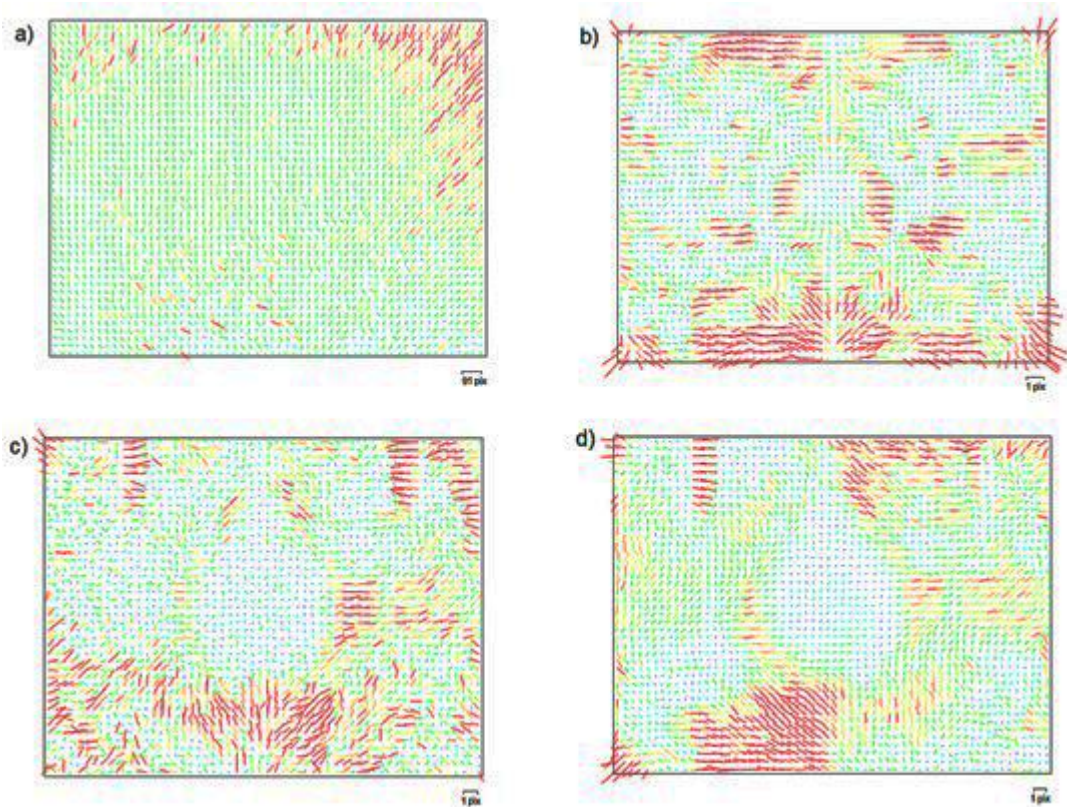


Figura 4.2: Gráfico de residuales para F C330 (3.61 mm).

4.3 Posiciones de Cámaras

En la Figura 4.3, el error Z está representado por el color de la elipse. Los errores X, Y están representados por forma de elipse. Las ubicaciones estimadas de la cámara están marcadas con un punto de color negro.

La Figura 4.3 a) representa la información capturada utilizando Software B y PCT con GPS manual. La Figura 4.3 b) representa la Información capturada utilizando Software B y PCT con GPS de doble frecuencia RTK. La Figura 4.3 c) representa la información capturada utilizando Software A y PCT con GPS manual y la Figura 4.3 d) representa la información capturada utilizando Software A y PCT con GPS de doble frecuencia RTK.

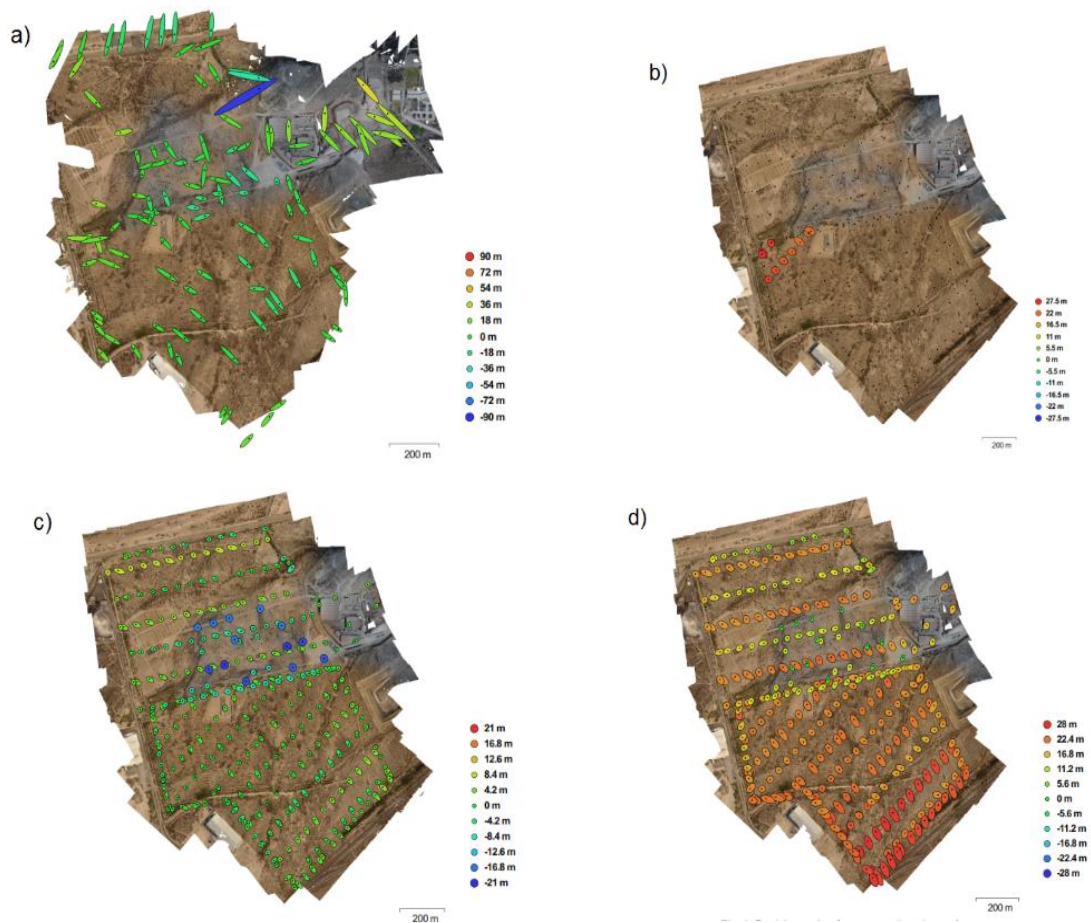


Figura 4.3: Posiciones de cámaras y estimaciones de errores.

Y además se obtuvieron los siguientes parámetros, que se muestran a detalle en la Tabla 4.5:

- ✓ **Error X (m):** error cuadrático medio para la coordenada X para todas las cámaras.

- ✓ **Error de Y (m):** error cuadrático medio para la coordenada Y de todas las cámaras.
- ✓ **Error XY (m):** error cuadrático medio para las coordenadas X e Y para todas las cámaras.
- ✓ **Error Z (m):** error cuadrático medio para la coordenada Z para todas las cámaras.
- ✓ **Error total (m):** error cuadrático medio para las coordenadas X, Y, Z para todas las cámaras.

Tabla 4.5: Errores medios de las posiciones de cámaras.

SOFTWARE B				
Puntos tomados con GPS manual				
X (m)	Y (m)	XY (m)	Z (m)	Z (m)
28.468	26.7545	39.067	16.6516	42.4677
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK				
X (m)	Y (m)	XY (m)	Z (m)	Z (m)
5.16294	3.47685	6.2245	24.5937	25.3692
SOFTWARE A				
Puntos tomados con GPS manual				
X (m)	Y (m)	XY (m)	Z (m)	Z (m)
4.40154	3.71742	5.76132	4.87217	7.54525
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK				
X (m)	Y (m)	XY (m)	Z (m)	Z (m)
5.94644	6.37737	8.71957	19.7808	21.6174

4.4 Puntos de Control en Tierra

Se obtuvieron los errores de los PCT en XY expresados en metros, teniendo un error mínimo de 0.07 m en el modelo cuyos datos provienen del GPS de doble frecuencia RTK, y de la planeación de vuelo se hizo con el software

B. Y un error máximo de 5.8 m en el modelo cuyos puntos fueron tomados con GPS manual y el plan de vuelo con el software A (Figura 4.4).

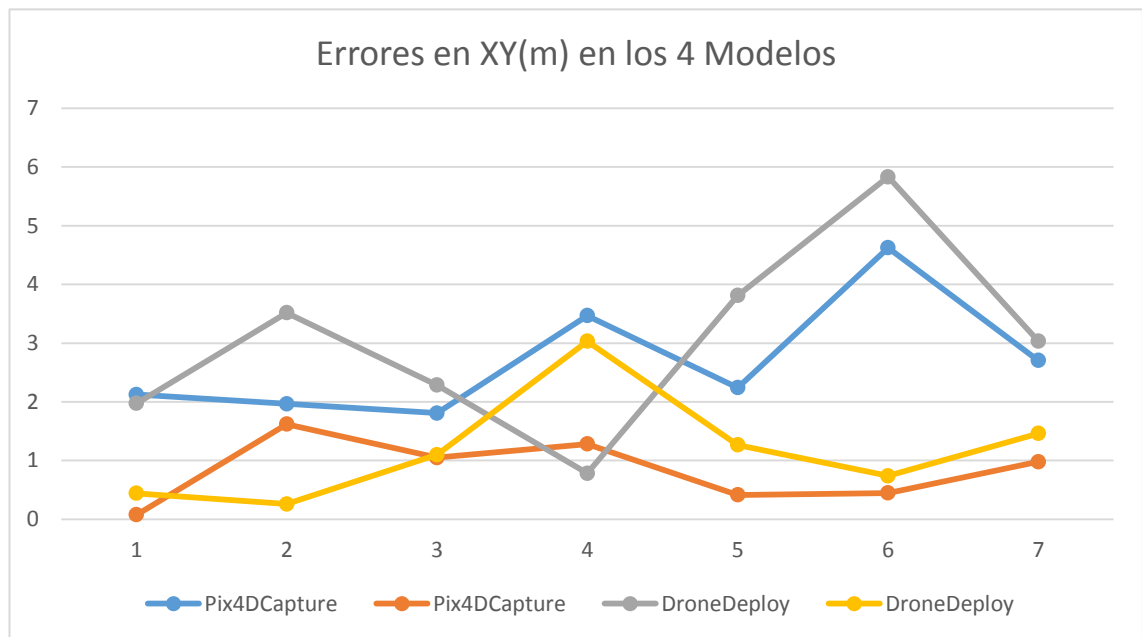


Figura 4.4: Gráfico de errores en XY de los puntos de control en tierra.

Los errores de los PCT en Z expresados en metros, el error mínimo de 0.02 m en el modelo cuyos datos provienen del GPS de doble frecuencia RTK, y de la planeación de vuelo se hizo con el software B. Y un error máximo de 4.4 m en el modelo cuyos puntos fueron tomados con GPS manual y el plan de vuelo con el software A. Los resultados se resumen en la Figura 4.5.

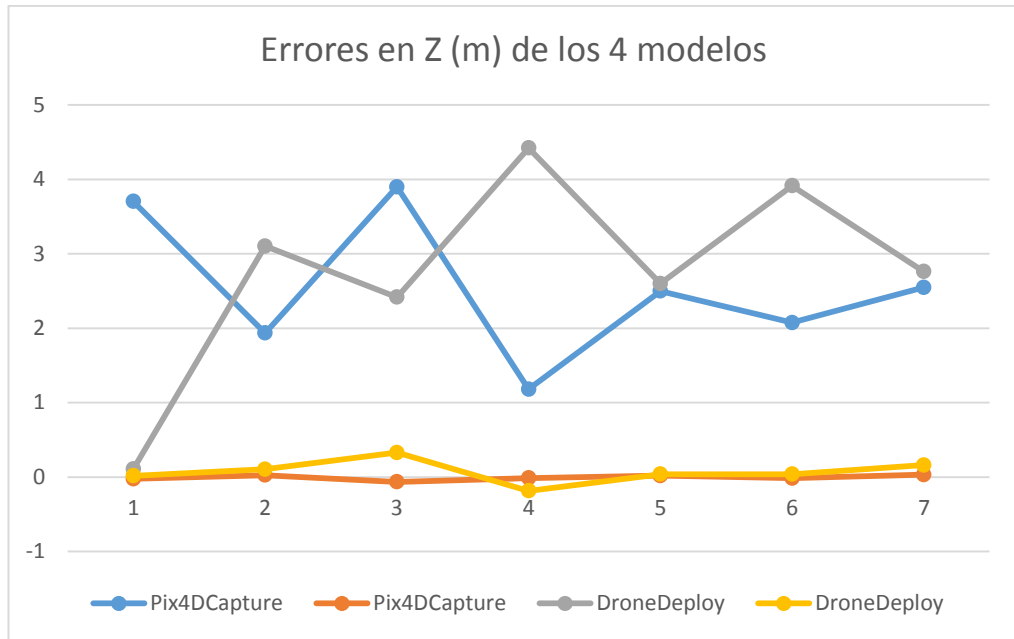


Figura 4.5: Gráfico de errores en Z de los puntos de control en tierra.

Se obtuvieron los errores de los PCT en metros, teniendo un error mínimo de 0.08 m en el modelo cuyos datos provienen del GPS de doble frecuencia RTK, y de la planeación de vuelo se hizo con el software B. Y un error máximo de 5.3 m en el modelo cuyos puntos fueron tomados con GPS manual y el plan de vuelo con el software A. Los resultados se presentan resumidos en la Figura 4.6.

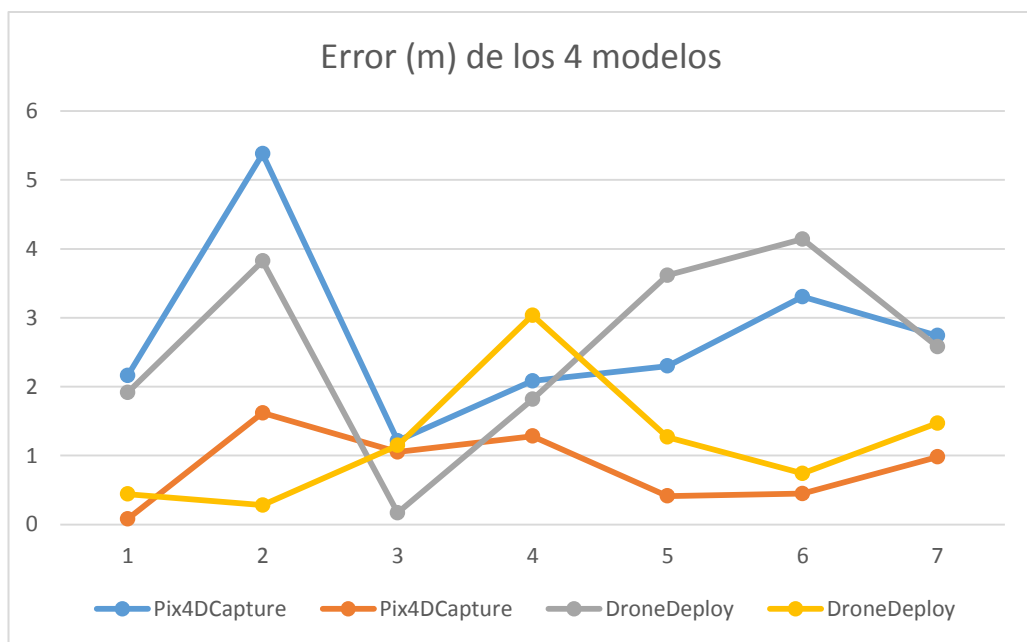


Figura 4.6: Gráfico de errores en m de los puntos de control en tierra.

Los errores de los PCT en pixeles fueron los siguientes, el error mínimo de 0.23 pix en el modelo cuyos datos provienen del GPS de doble frecuencia RTK, y de la planeación de vuelo se hizo con el software B. Y un error máximo de 5.6 pix en el modelo cuyos puntos fueron tomados con GPS manual y el plan de vuelo con el software A, los resultados se muestran en la Figura 4.7.

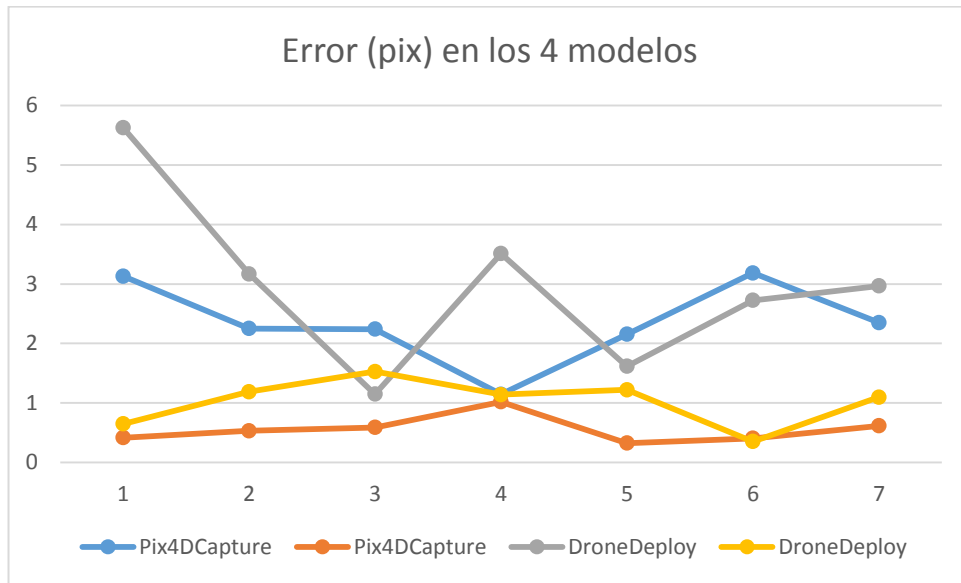


Figura 4.7: Gráfico de errores en pixeles de los puntos de control en tierra.

4.5 Modelo Digital de elevación

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados de resolución y de densidad de puntos de los cuatro MDE generados luego del procesamiento de los datos. La resolución efectiva del MDE exportado dependió del valor del parámetro de calidad que se utilizó en el paso de la nube de puntos de compilación, pues los MDE's de este proyecto de investigación se generaron a partir de la nube de puntos densos. Y la densidad de puntos, denota el número promedio de puntos de nubes densas por metro cuadrado.

Tabla 4.6: Especificaciones de los MDE creados.

SOFTWARE A	
Puntos tomados con GPS Manual GARMIN	
Resolución:	34.4cm/pix
Densidad de puntos:	8.44677 puntos por m ²
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK	
Resolución:	34.5 cm/pix
Densidad de puntos:	8.41538 puntos por m ²
SOFTWARE B	
Puntos tomados con GPS Manual GARMIN	
Resolución:	35.7 cm/pix
Densidad de puntos:	7.8633 puntos por m ²
Puntos tomados con GPS de doble frecuencia RTK	
Resolución:	37.5 cm/pix
Densidad de puntos:	7.11713 puntos por m ²

La Figura 4.8 a) representa la información capturada utilizando Software B y PCT con GPS manual. La Figura 4.8 b) representa la información capturada utilizando Software B y PCT con GPS de doble frecuencia RTK. La Figura 4.8 c) representa la Información capturada utilizando Software A y PCT con GPS manual y la Figura 4.8 d) representa la Información capturada utilizando Software A y PCT con GPS de doble frecuencia RTK.

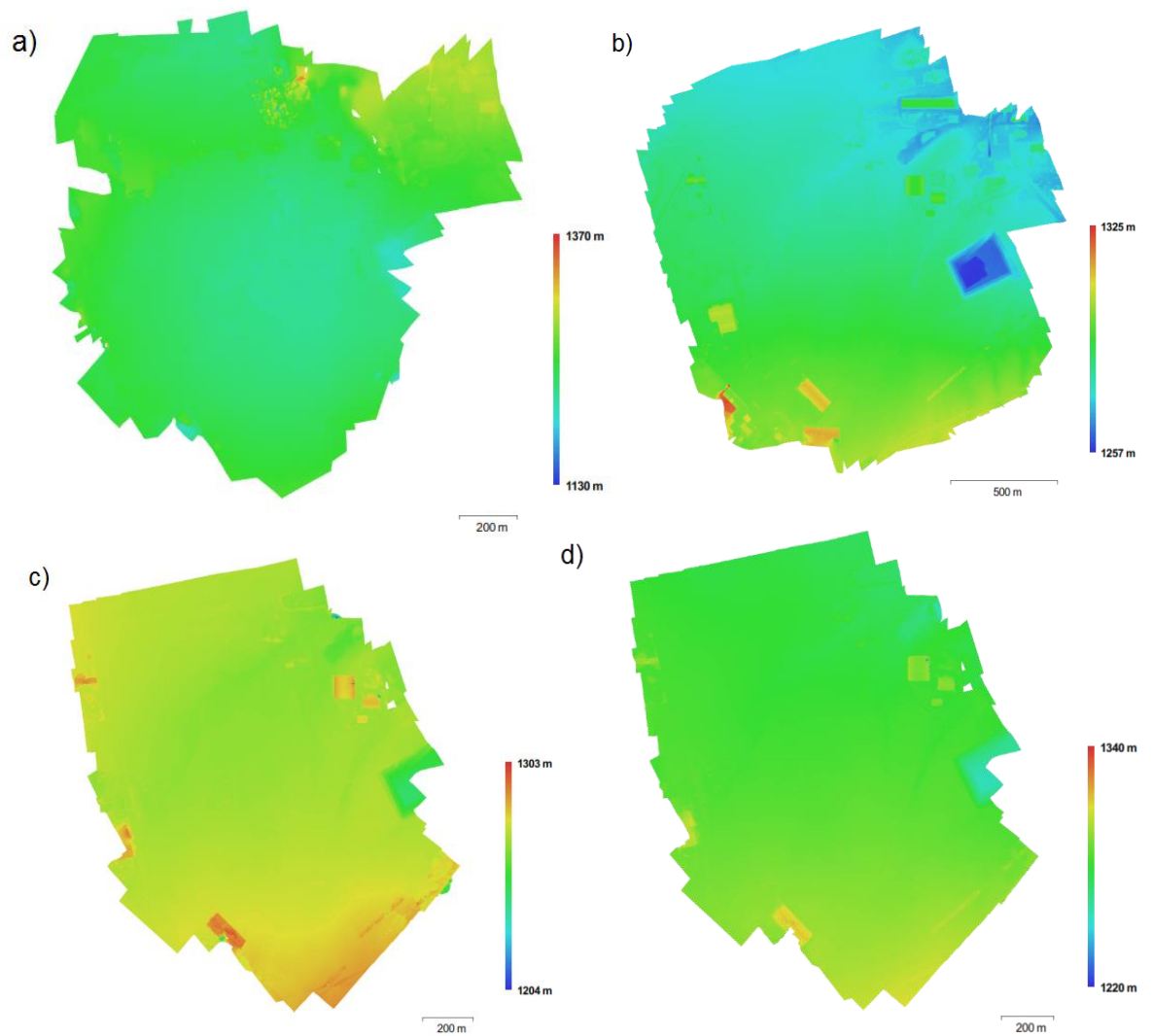


Figura 4.8: Modelos Digitales de Elevación.

4.6 Generación de Red de Flujo Hídrico

La modelación de la red de flujo superficial de la zona donde se realizó el proyecto de investigación se generó con la información del MDE calculado con la mayor precisión de los cuatro MDE trabajados; el MDE con estas características es el plan de vuelo del Software B, y del que los PCT se tomaron con el GPS diferencial RTK.

Se evidencia la presencia de los cuerpos de agua que fluyen en el área, esto se obtuvo con las herramientas hidrológicas que nos ofrecen los SIG, ya que permiten identificar sumideros, determinar la dirección de flujo, calcular la acumulación de flujo, delinear cuencas hidrográficas y crear redes de corrientes. La imagen 4.9 procede de una red de corrientes obtenida de un MDE:

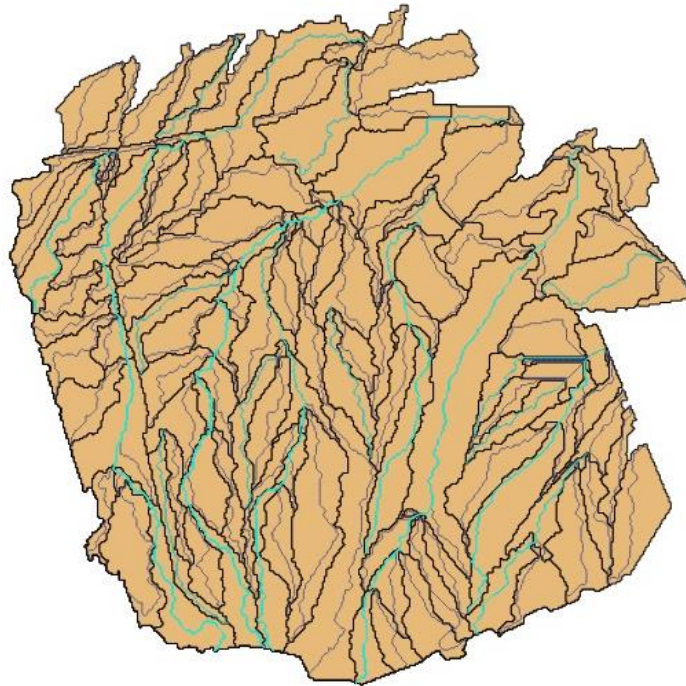


Figura 4.9: Red de flujo superficial en el área del proyecto de investigación

Fuente: Generación propia.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- ✓ El Software de vuelo B es mucho más detallado que el Software de vuelo A; pero la captura de B es incapaz de volar misiones más largas para cubrir grandes áreas. Se requiere usar más de una batería, para volar misiones más grandes y hacer recarga constante de baterías que prolonga el trabajo de campo. El programa de vuelo A tiene un interfaz de uso muy sencillo y es más eficiente en la ejecución de los planes de vuelo, ya que su malla de vuelo no es tan detallada como la del software B.
- ✓ La diferencia entre los errores de elevación en las coordenadas X, Y y Z son claramente evidentes entre los datos recabados con GPS manual GARMIN y los del GPS de doble frecuencia RTK, siendo estos últimos los datos más precisos y obteniendo errores de hasta 2 cm.
- ✓ Los errores en los valores de los MDE más grandes se encuentran en los que se utilizó el GPS manual GARMIN, en dichos modelos los errores tienen valores cercanos a los 5 metros.

- ✓ De los cuatro Modelos Digitales de Elevación obtenidos, el modelo más exacto es el que tiene como datos los recabados con el software B y con los PCT tomados en campo con el GPS de doble frecuencia RTK. Teniendo errores promedio de 0.97823 m en XY, 0.0323441 m en Z y 0.615 pixeles.
- ✓ Se determinó que el uso de VANT son adecuados para la generación de Modelos Digitales de Elevación para la determinación de nano-cuencas hidrográficas.
- ✓ Los resultados obtenidos con la combinación más eficiente (software B + GPS RTK) con un adecuado plan de trabajo de campo, ejecución del plan de vuelo y un cuidadoso procesamiento de información puede reemplazar el trabajo topográfico realizado por una brigada de topografía completa con el uso de estación total.
- ✓ La evaluación de costo - beneficio entre la topografía a detalle para análisis hidrológico realizado por una brigada de topografía tradicional versus los métodos investigados y aplicados en el presente trabajo es evidente porque se ahorra en costos destinados al pago de personal, viáticos y tiempo de los trabajos a realizarse en campo. Pues para un área de 129 Ha, un levantamiento topográfico tradicional con datos en altimetría y planimetría cuesta \$80,000.00 MX, mientras que un levantamiento en planimetría y altimetría con VANT, \$30,000.00 MX, habiendo una clara diferencia en cuanto al costo.
- ✓ La investigación documentada en el presente trabajo sirve como solida ase para el desarrollo de proyectos de gestión sostenible del recurso agua superficial, de estudios de riesgo de inundación en áreas rurales y urbanas, de estudios de impacto ambiental y de estudios de ingeniería relacionados a la distribución de agua en sistemas de riego destinados a la agricultura.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda ubicar los puntos de control en tierra de manera uniforme en el área a estudiar, tomando en cuenta aspectos que puedan perjudicar al VANT al momento del vuelo, como: presencia de torres de alta tensión, condiciones climatológicas adversas (vientos huracanados, cielo nublado, fuertes lluvias, etc.), interferencia con edificaciones.
- Para la construcción del Modelo Digital de Elevación, se recomienda tener muy en cuenta el error de reproyección alto, que generalmente indica una precisión de localización deficiente de las proyecciones de puntos correspondientes en el paso de coincidencia de puntos. También es típico de las falsas coincidencias. La eliminación de dichos puntos puede mejorar la precisión del siguiente paso de optimización.
- Se recomienda realizar una evaluación de las diferencias en volumetría hídrica entre MDE generados con una resolución igual a 5.0 x 5.0 metros por pixel y el MDE generado con una resolución igual a 0.0862 x 0.0862 metros por pixel con el objetivo de definir la optimización en el dimensionamiento de obras civiles orientadas a la optimización del uso del recurso agua.

Referencias bibliográficas

- Aber, J., Marzloff, I., Ries, B. (2010). Cameras for Small Format Aerial Photogrammetry.
- Agarwala, A., Dontcheva, M., Agrawala, M., Drucker, S., Colburn, A., Curless, B., Salesin, D. H., and Cohen, M. F. (2004). Interactive digital photomontage. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2004).
- Anderson, C.A., Vivoni, E.R., Pierini, N., Robles-Morua, A., Rango, A., Laliberte, A. & Saripalli, A. (2012). Characterization of shrubland atmosphere interactions through use of the Eddy covariance method, distributed footprint sampling and imagery from unmanned aerial vehicles
- Anirudh Ramaraju (2015). Surface Water Bodies monitoring using GIS.
- Baker, H. H. (1977). Three-dimensional modeling. In Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence
- Bamler, R., Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry.
- Baumgart, B.G. (1974). Geometric Modeling for Computer Vision.
- Belongie, S., Malik, J., and Puzicha, J. (2002). Shape matching and object recognition using shape contexts.
- Boykov, Y., Veksler, O. & Zabih, R. (2001). Fast approximate energy minimization via graph cuts.
- Breña, A.F; Jacobo, M.A (2006). Principios de la Hidrología Superficial.
- Brown, M. and Lowe, D. (2007). Automatic panoramic image stitching using invariant features.
- Burt, P.J., Adelson, E.H. (1983). The Laplacian pyramid as a compact image code. IEEE Transactions on Communications.
- Carr, J. & Slyder, J. (2018). Individual tree segmentation from a leaf off photogrammetric point cloud.
- Chao, H., Baumann, M., Jensen, A., Chen, Y., Cao, Y., Ren, W., and McKee, M. 2008. Band-reconfigurable multi-UAV-based cooperative remote sensing for real-time water management and distributed irrigation control.
- Chen, Q., Gong, P., Baldocchi, D., Xie, G. (2007). Filtering airborne laser scanning data with morphological methods.
- Comisión Nacional del Agua (2015). Atlas del Agua en México.
- David Marr (1982). Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information.

- Debevec, P. E., Taylor, C. J., and Malik, J. (1996). Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach.
- E. Tuyishimire, E. (2017). Cooperative Data Muling Using a Team of Unmanned Aerial Vehicles.
- Eisemann, E., Durand, F. (2004). Flash photography enhancement via intrinsic relighting.
- Fattal, R., Lischinski, D. & Werman, M. (2002). Gradient domain high dynamic range compression.
- Fonstad, M., Dietrich, J., Courville, B., Jensen, J., Carbonneau, P. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement
- Freeman, W.T., Adelson, E.H. (1991). The design and use of steerable filters.
- Gonçalves, J.A., Pérez, E., & Simic, A. (2018). Unmanned Aerial Systems (UAS) for environmental applications special issue preface.
- Grenzdörffer, G. (2008). The Photogrammetric Potential of Low Cost UAVs in Forestry and Agriculture.
- Guerra-Hernández, J., Cosenza, D., Rodriguez, L., Silva, M., Margarida Tomé, R., & González Ferreiro, E. (2018). Comparison of ALS and UAV (SfM)-derived Hig Density Point Clouds for Individual Tree Detection in Eucalyptus Plantations.
- Gurugnanam, B. (2014). Analysis of Digital Elevation Model of Kolli Hill, South India using Shuttle Radar Topography Mission Data and GIS Techniques.
- Höfle, B., Griesbaum, L., Forbriger, M. (2013). GIS-Based Detection of Gullies in Terrestrial LiDAR Data of the Cerro Llamoca Peatland (Peru).
- Hosseini, S., Mesbahi, M. (2014). Energy Aware Aerial Surveillance for a Long Endurance Solar Powered Unmanned Aerial Vehicles.
- Hu, F., Gao, X. M., Li, G. Y., Li, M. (2016). DEM Extraction from Worldview-3 Stereo-Images and Accuracy Evaluation.
- Hugenholtz, C., Whitehead, K. & Moorman (2013). Low cost, on demand aerial photogrammetry for glaciological measurement.
- Hugenholtz, C., Whitehead, K. (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems.
- Jiménez-Bello, M.A., Royuela, A., Manzano, J., Zarco-Tejada, P.J., and Intrigliolo, D. 2013. Assessment of drip irrigation sub-units using airborne thermal imagery acquired with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV).
- Juan Manuel Rodríguez Martínez (2007). *Marco Tectónico de la Cuenca de Parras. Proyecto CONACYT-SEMARNAT. 2002.*

- Korzeniowska, K., Lackam, M. (2011). Generating DEM from LiDAR data – comparison of available software tools.
- L. Chris Kiser, J. Michael Kelly (2010). GPS- vs. DEM-Derived Elevation Estimates from a Hardwood Dominated Forest Watershed.
- Laurance C. Smith (1998). Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology.
- Lotta Andersson, Åke Sivertun (1991). A GIS-supported method for detecting the hydrological mosaic and the role of man as a hydrological factor.
- Lowe, D. (2004). Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints.
- Masaharua, H., Ohtsubo, K. (2002). A filtering method of airborne laser scanner data for complex terrain.
- Mori, G., Ren, X., Efros, A., and Malik, J. (2004). Recovering human body configurations: Combining segmentation and recognition.
- Mozhdeh Shahbazi, Gunho Sohn, Jérôme Théau, Patrick Menard (2015). Development and Evaluation of a UAV-Photogrammetry System for Precise 3D Environmental Modeling.
- N. Al-Abed, F. Abdulla, A. Abu Khyarah (2013). GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin.
- Nalwa, V.S. (1987). Edge-detector resolution improvement by image interpolation.
- Nalwa, V.S. (1993). A Guided Tour of Computer Vision. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Nalwa, V.S., Binford, T.O. (1986). On detecting edges. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.
- NASA (2017). Remote sensors. Available: <https://earthdata.nasa.gov/user-resources/remote-sensors>
- Oluibukun Gbenga Ajayi (2017). Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images.
- Pablo Tarolli, Dalla Fontanna (2009). Hillslope to valley transition morphology: New opportunities and challenges, Geomorphology.
- Pádua, L., Marques, J., Hruska, T., Adao, J., Bessa, A., Sousa, E., Peres, R., Morais, J. (2018). Vineyard Properties Extraction Combining UAS-based RGB Imagery with Elevation Data.
- Perko, R., Raggam, H., Guyjahr, KH., Schardt, M. (2015). Advanced DTM generation from very high-resolution satellite stereo images.
- Pinto E, Santana P, Barata J. (2013). On collaborative aerial and surface robots for environmental monitoring of water bodies.

- PNUMA (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. GEO4 medio ambiente para el desarrollo.* PNUMA.
- Quaritsch, M., Kruggl, K., Wischounig-Strucl, D., Bhattacharya, S., Shah, M., Rinner, B. (2010). Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications,
- Roberts, L.G. (1965). *Machine perception of three-dimensional solids.*
- Robson, S., James, M. (2014). *Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks.*
- Rosenfeld, A. (1980). *Quadtrees and pyramids for pattern recognition and image processing.*
- Rudy Abigail de la Torre Diaz, (2015). *Integración de datos en un sistema de información geográfica (SIG) del Acuífero de la región geohidrológica la Paila, estado de Coahuila.*
- Ruzgiene, B., Berteska, T., Gecyte, S., Jakubauskiene, E., Aksamitauskas, V. C. (2014). *The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation.*
- Schaffalitzky, F., Zisserman, A. (2002). *Multi-view matching for unordered image sets.*
- Secretaría de Gobernación (2015). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.*
- Seitz, S., Szeliski, R. (1999). *Applications of computer vision to computer graphics.*
- Shakhathreh, H., Sawalmeh, A., Fuqaha, A., Dou, Z. (2018). *Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges.*
- Snavely, K.N. (2008). *Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections.*
- Stroppiana, D., Villa, P., Sona, G., Ronchetti, G., Candini, G. (2018). *Early season weed mapping in rice crops using multi-spectral UAV data.*
- Subsecretaria de Recursos Naturales, 2010.
- Susaki, J. (2012). *Adaptive Slope Filtering of Airborne LiDAR Data in Urban Areas for Digital Terrain Model (DTM) Generation.*
- Suzanne P., Wechsler 2007. *Spacial Data Uncertainty.*
- Swaraj, J., Anji Reddy, M., (2013) *Generation and Evaluation of Cartosat DEM for Hyderabad city.*
- Tahar, K. N., Ahmad, A. (2012). *A simulation study on the capabilities of rotor wing unmanned aerial vehicle in aerial terrain mapping.*
- Taylor, C.J., Debevec, P.E. & Malik, J. (1996). *Reconstructing polyhedral models of architectural scenes from photographs.*
- Templeton RC, Vivoni ER, Méndez-Barroso LA, Pierini NA, Anderson CA, Rango A, Laliberte A, Scott RL. 2014. *High-resolution characterization of a semiarid watershed: Implications on evapotranspiration estimates.*
- Terzopoulos, D. (1988). *The computation of visible-surface representations.*

- The Global UAV Payload Market 2017-2027 (2017). Global security threats to increase demand for Unmanned Aerial Vehicle payload.
- Toby N. Tonkin, Nicholas G. Midgley (2016). Ground-Control Networks for Image Based Surface Reconstruction: An Investigation of Optimum Survey Designs Using UAV Derived Imagery and Structure-from-Motion Photogrammetry.
- Tomasi, C., Kanade, T. (1992). Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method.
- Tomasi, C., Kanade, T. (1992). Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method.
- Tomi Rosnell, Eija Honkavaara (2012). Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadcopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera.
- Toutin, T., Gray, L. (2000). State of the art of elevation extraction from satellite SAR data.
- Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R. & Fitzgibbon, A. (1999). Bundle Adjustment: A Modern Synthesis.
- Triggs, B., McLauchlan, P.F., Hartley, R.I. & Fitzgibbon, A.W. (1999). Bundle adjustment a modern synthesis. In International Workshop on Vision Algorithms.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P. And Dobha, R. (2013) Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index American Journal of Water Resources,
- Vito, T., Albani, D., Nardi, D. (2017). Field coverage and weed mapping by UAV swarms.
- Westoby, M., Glasser, N., Brasington, J., Hambrey, M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications.
- Whitehead, K., Hugenholtz, H., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B., LeClair, A., Riddell, K. & Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment a photogrammetrically derived digital terrain model.
- Yastikli, N., Bagci, I., Beser, C. (2013). The Processing of Image Data Collected by Light UAV Systems for GIS Data Capture and Updating.
- Zhang, J., Marszalek, M., Lazebnik, S., and Schmid, C. (2007). Local features and kernels for classification of texture and object categories: a comprehensive study.
- Zhou, X., Sun, Z., Liu, S., Peixin, Y., Wang, Y., Wang X. (2018). A Method for Extracting the leaf Litter Distribution Area in Forest using Chip Feature.
- Zhu, J., Wang, K., Deng, J., and Harmon, T. 2009. Quantifying nitrogen status of rice using low altitude UAV-mounted system and object-oriented segmentation methodology.