

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación
en Geociencias Ambientales**

**Levantamientos topográficos multitemporales basados en
técnicas de fotogrametría aérea**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Sergio Alvarado Soto

Ensenada, Baja California, México

2016

Tesis defendida por
Sergio Alvarado Soto

Y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Jorge Torres Rodríguez

Director de tesis

Dr. Mario González Escobar

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo

M.C. Francisco Suárez Vidal



Dr. Juan García Abdeslem

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Sergio Alvarado Soto ©2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Sergio Alvarado Soto** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Levantamientos topográficos multitemporales basados en técnicas de fotogrametría aérea

Resumen aprobado por:

Dr. Jorge Torres Rodríguez
Director de tesis

En la actualidad, la fotogrametría aérea se ha convertido en una técnica de gran utilidad en diversas aplicaciones, pudiendo incluso sustituir los levantamientos topográficos convencionales. Sin embargo, generalmente los productos generados por fotogrametría no son validados, restándole confiabilidad a la información. El objetivo de este trabajo de tesis es diseñar, implementar y validar técnicas para la generación y análisis de productos topográficos multitemporales mediante el uso de fotografía aérea. Se analizaron cuatro pares de fotografías estereoscópicas de una zona de prueba (campus CICESE-UABC) provenientes de diferentes organizaciones y en diferentes fechas; tres de gran formato (cámara métrica): DETENAL de 1973, IMIP de 1994 y de INEGI en 2006, y un par de formato pequeño (cámara no métrica): de CICESE en 2010. Se colocaron puntos de control en el terreno con la finalidad de georreferenciar los productos. Mediante restitución fotogramétrica se generaron los Modelos Digitales de Elevación (DEM's) y las ortofotos para cada par estereoscópico, los cuales se validaron a través de los estándares de precisión establecidos por la American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Se establecieron para los pares fotográficos los siguientes valores de precisión relativa: para DETENAL se obtuvo en el DEM un RMSE de 4.28 m, en cuanto a la ortofoto el RMSEr fue 3.07 m. Para IMIP, el RMSE fue de 3.09 m y 3.22 m en DEM y ortofoto respectivamente. Los pares de INEGI, tienen un RMSE de 2.40 en DEM y en su ortofoto de 0.98 m. Y para CICESE, el RMSE 8 m en el DEM y 2.2 m en su ortofoto. Con el fin de darle una aplicación a la metodología y a los productos validados, se elaboraron curvas de nivel para estimar el volumen de corte y terraplén empleado para trabajos de despalme y terracería en un área de la zona de prueba en el campus CICESE. Este trabajo permite validar estadísticamente los levantamientos topográficos a partir de fotogrametría aérea, mejorando su utilidad para diversas aplicaciones y reduciendo el tiempo en comparación a otras técnicas convencionales.

Palabras clave: Fotogrametría aérea, cámara métrica, cámara no métrica, levantamientos topográficos, análisis multitemporal.

Abstract of the thesis presented by **Sergio Alvarado Soto** as a partial requirement to obtain the **Master of Science** degree in **Earth Sciences** with orientation in **Environmental Geosciences**.

Multi-temporal topographic surveys based on aerial photogrammetry techniques

Abstract approved by:

Dr. Jorge Torres Rodríguez
Thesis Director

Nowadays aerial photogrammetry has become a very useful technique in many different fields, even conventional topographic surveys can now be replaced by this technique. However, most surveys are not validated, which diminishes the reliability of this information. The objective of this thesis is to design, implement, and verify techniques for the generation and analysis of multi-temporal topographic products based on aero-photography. Four pairs of stereoscopic photos from different dates and institutions were analyzed in a test zone (campus CICESE – UABC); three of them were large format (metric camera): DETENAL 1973, IMIP 1994 and INEGI 2006 and one pair was small format (non-metric camera) of CICESE 2010. Running control points in the field allowed to locate and georeference the products. Using photogrammetric restitution techniques, digital elevation models (DEM's) and the orthophotos were generated for each stereoscopic pair, which were validated and certified by the precision standard established by the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). The following precision values for each photographic pair were established: for DETENAL an RMSE for DEM of 4.28 m, and for the orthophoto the RMSE was 3.07 m. For IMIP, the RMSE was 3.09 m and 3.22 m in DEM and orthophotos, respectively. The INEGI pairs have a RMSE of 2.40 in DEM and of 0.98 m for its orthophoto. For CICESE, the RMSE 8 m in the DEM and 2.2 m in its orthophoto. In order to give an application to the validated methodology of the products, contour lines were developed to estimate the cut and fill volume used for landfill work in a zone of the test area on the CICESE campus. This work allows to statistically validate topographic surveys from aerial photogrammetry in relatively less time, improving its usefulness for diverse applications compared to other conventional techniques.

Keywords: Aerial photogrammetry, metric camera, non-metric camera, topographic surveys, multi-temporal analysis.

Dedicatoria

A mis padres, por todo su apoyo y consejos...

Agradecimientos

Al Doctor Jorge Torres Rodríguez. Por su paciencia, consejos, tiempo y conocimientos que compartió durante mi estancia en el posgrado.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A los miembros del comité de tesis: Dr. Mario González Escobar y Dr. Rodrigo Méndez Alonzo por su tiempo.

A mis amigos Hebert, Gerardo, Mariana, Leydi, Julia, Mowgli, Abel, Hugo, Karina, Diego, Daniela, Marianggy, Estrella y su Jacinto, compañeros de generación y laboratorio Jesús y Daniel.

Al CICESE y a los departamentos de Ciencias de la Tierra y Ciencias de la Computación.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xi
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Organización del documento.....	6
Capítulo 2. Marco Teórico	
2.1 Fotogrametría.....	7
2.1.1 Fotogrametría terrestre.....	7
2.1.2 Fotogrametría aérea.....	8
2.2 Fotogrametría aérea.....	8
2.2.1 Fotogrametría aérea estereoscópica.....	10
2.2.2 Cámaras métricas profesionales.....	11
2.2.3 Cámaras no métricas.....	12
2.3 Estación fotogramétrica digital.....	12
2.4 Orientación de las imágenes.....	13
2.4.1 Orientación interna.....	13
2.4.2 Orientación externa.....	14
2.4.2.1 Orientación relativa.....	14
2.4.2.2 Orientación absoluta.....	14
2.5 Productos fotogramétricos.....	14
2.5.1 DEM.....	14
2.5.1.1 Malla regular.....	15
2.5.1.2 TIN.....	15

Capítulo 3. Materiales y métodos

3.1 Fotografía aérea y sitio de pruebas.....	16
3.1.1 Fotografía aérea de formato pequeño.....	17
3.1.2 Fotografía aérea de formato grande.....	18
3.1.2.1 Fotografía aérea de formato grande del año de 1973.....	19
3.1.2.2 Fotografía aérea de formato grande del año de 1994.....	20
3.1.2.3 Fotografía aérea de formato grande del año de 2006.....	21
3.2 Puntos de control en el terreno.....	23
3.3 Restitución fotogramétrica.....	28
3.3.1 Orientación (interior y exterior).....	30
3.3.2 Restitución (Vectorización).....	31
3.3.3 Triangulación.....	32
3.3.4 Ortorectificación.....	32
3.4 Generación de DEM y georreferenciación de ortofotos.....	33
3.4.1 Generación del DEM.....	34
3.4.2 Georreferenciación de ortofotos.....	34

Capítulo 4. Análisis de los resultados

4.1 Análisis del DEM 2006.....	36
4.1.1 Análisis del DEM de 1973.....	38
4.1.2 Análisis del DEM de 1994.....	40
4.1.3 Análisis del DEM de 2010.....	43
4.2 Validación de resultados.....	45
4.2.1 Validación de resultados para el DEM de referencia 2006.....	45
4.2.2 Validación de resultados para el DEM de 1973.....	50
4.2.3 Validación de resultados para el DEM de 1994.....	54
4.2.4 Validación de resultados para el DEM de 2010.....	57
4.2.5 Comparación de los valores obtenidos.....	60
4.3 Análisis multitemporal.....	61

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

5.1 Discusión.....	66
5.2 Conclusiones.....	67

Literatura citada.....	70
-------------------------------	-----------

Lista de figuras

Figura		Página
1	Geometría de una fotografía aérea vertical.....	9
2	Secuencia de fotografías verticales a lo largo de la línea de vuelo.....	10
3	Proceso de adquisición de un bloque de fotografías aéreas.....	11
4	Marcas fiduciales.....	13
5	Tipos de DEM a) Malla regular b) TIN.....	15
6	Zona de levantamiento fotogramétrico que incluye al sitio de pruebas en el campus de CICESE (polígono rojo).....	17
7	Fotografías de formato pequeño con traslape de 60% sobre el CICESE.....	18
8	Par de fotografías aéreas del año 1973 de formato grande, con una orientación de vuelo que va de oeste a este sobre la ciudad y bahía de Ensenada.....	19
9	Parámetros internos y ocho marcas fiduciales calculadas (encerradas en rojo) para orientar los pares de fotografías del año 1973.....	20
10	Pares de fotografías del año de 1994 a blanco y negro obtenidas por el IMIP.....	21
11	Par de fotografías a color, adquiridas por INEGI con una escala de 1:40, 000.....	22
12	Distribución de puntos de control en el terreno (GCP) y puntos de verificación (checkpoints).....	24
13	GPS colectando datos sobre el GCP ubicado.....	24
14	Distribución de los GCP recolectados para las fotografías de 1973.....	25
15	Flujo de trabajo.....	29
16	Zona de estereoscopia asignada en los pares de DETENAL e INEGI.....	30
17	Ejemplo de una malla triangular irregular (TIN) para la zona de levantamiento topográfico. Nótese la densificación del TIN en la zona del campus de CICESE.....	32

18	Ejemplo de ortofoto en la que se ha eliminado el efecto de distorsión por la óptica de la lente y el desplazamiento por relieve.....	33
19	Ejemplo de un DEM representado con una malla regular (en coordenadas UTM) con un espaciado de 11.45 m entre celdas.....	34
20	Ejemplo de un DEM con su respectiva ortofoto sobrepuesta.....	35
21	Malla regular con un espaciado de 17.16, que representa los pares fotográficos de 2006.....	37
22	Modelo digital del terreno del año 2006.....	37
23	DEM de 2006 con su ortofoto sobrepuesta.....	37
24	DEM de 2006 con curvas de nivel.....	37
25	Malla regular con un espaciado de 11.45 m asignado para el año de 1973, con coordenadas UTM.....	38
26	Modelo digital de elevación del año 1973.....	39
27	DEM de 1973 con curvas de nivel.....	39
28	DEM de 1973 con su ortofoto sobrepuesta en coordenadas UTM.....	39
29	Malla regular con un espaciado de 1 m que representa los pares fotográficos de 1994.....	41
30	Modelo digital del terreno del año 1994.....	41
31	DEM de 1994 con su ortofoto sobrepuesta.....	41
32	DEM de 1994 con curvas de nivel.....	41
33	DEM de 1994 generado a partir de una malla regular con un espaciado de un metro aproximadamente.....	42
34	Malla regular con separación entre celdas de aproximadamente un metro.....	42
35	Acercamiento del DEM de 1994.....	42
36	Malla regular con un espaciado de 2.8 m que representa los pares fotográficos de 2010.....	43

37	Modelo digital del terreno del año 2010.....	44
38	DEM de 2010 con curvas de nivel.....	44
39	DEM de 2010 con su ortofoto sobrepuesta.....	44
40	Distribución de los checkpoints verticales utilizados para la evaluación y validación del DEM del año 2006.....	46
41	Distribución de los checkpoints horizontales para la ortofoto de 2006.....	49
42	Distribución de los checkpoints para el DEM de 1973.....	51
43	Checkpoints horizontales en la ortofoto de 1973.....	53
44	Checkpoints verticales utilizados para las fotografías de 1994.....	54
45	Checkpoints horizontales para la evaluación del RMSE.....	56
46	Distribución de checkpoints verticales para el DEM de 2010.....	57
47	Distribución de los checkpoints horizontales en la ortofoto de 2010 (CICESE).....	59
48	Secuencia temporal de ortofotos en el campus de CICESE, A) DETENAL (1973), B) IMIP (1994), C) INEGI (2006), D) CICESE (2010).....	62
49	Resolución espacial y visualización de calidad en las ortofotos A) IMIP 1994, B) INEGI 2006, C) CICESE 2010.....	63
50	Trazo del eje principal del proyecto con estaciones marcadas a 5 metros y con secciones de 60 m, en la imagen izquierda se observa el perfil trazado sobre la ortofoto de 1973, mientras que en la derecha se tiene el mismo trazo sobre la ortofoto de 2006.....	64
51	Perfiles representando el cálculo de volúmenes de tierra, en color amarillo se muestra el perfil trazado sobre la fecha de 1973, correspondiente a una sola sección indicada en la figura 50, en cuanto al perfil de color rojo se indica en la fecha de 2006, este perfil se ubica justo en lo que actualmente corresponde al estacionamiento del edificio administrativo del campus de CICESE.....	65

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Parámetros de calibración de cámara EOS 500D.....	18
2	Parámetros de calibración de la cámara Zeiss RMK.....	22
3	Parámetros de calibración para las fotografías de INEGI.....	23
4	Coordenadas UTM de rasgos distintivos identificados en las fotografías adquiridas por CICESE (2010).....	26
5	Coordenadas UTM de rasgos distintivos observados en las fotografías de IMIP (1994).....	27
6	Coordenadas UTM de los rasgos distintivos en los pares fotográficos utilizados para las fechas de 1973 y 2006.....	27
7	Coordenadas UTM de puntos de verificación (checkpoints) adquiridos dentro del campus CICESE (2015).....	28
8	Estándar de precisión vertical para datos geospaciales establecidos por la ASPRS.....	45
9	Estándar de precisión horizontal para datos geospaciales establecidos por la ASPRS.....	45
10	Evaluación del RMSE vertical en el DEM de 2006.....	47
11	Ejemplos de clases de acuerdo al estándar de precisión vertical para datos geospaciales de la ASPRS.....	48
12	RMSE obtenido de la ortofoto de 2006 (todas las unidades están en metros).....	49
13	Clasificación de las ortofotos de acuerdo a su umbral de RMSE.....	50
14	Extracción de las alturas de checkpoints en el DEM de 1973 (unidades están en metros).....	52

15	RMSE resultante para la ortofoto de 1973 (unidades en metros).....	53
16	RMSE vertical para el año de 1994.....	55
17	RMSE para datos planimétricos de 1994.....	56
18	RMSE vertical para el DEM de 2010.....	58
19	RMSE horizontal para la ortofoto de 2010.....	60
20	Especificaciones de los valores obtenidos para cada uno de los resultados.....	61
21	Especificaciones de las fotografías utilizadas y sus productos resultantes.....	63

Capítulo 1 Introducción

Un levantamiento topográfico convencional consiste de dos etapas; la primera requiere de un levantamiento altimétrico, el cual se describe como las operaciones necesarias para obtener las alturas respecto a un plano de referencia. Eventualmente se generarán mapas de curvas de nivel y de puntos acotados con las lecturas registradas. La segunda etapa es un levantamiento planimétrico, que consisten en todo el conjunto de operaciones necesarias para obtener los puntos, que darán como resultado la cartografía que se proyecta en el plano horizontal (García-Martín et al., 1994).

Estos levantamientos se realizan generalmente con equipos tradicionales y apegados a una metodología convencional; las herramientas empleadas tradicionalmente son: teodolito, nivel, taquímetro, GPS y cinta. Estos procesos son muy laboriosos y tediosos, los resultados de estas mediciones se hacen con el objetivo de mapear - cartografiar el terreno, es decir, son un conjunto de puntos con coordenadas "X", "Y" y "Z". Basándose en los puntos capturados y almacenados en el equipo topográfico se obtiene un Modelo Digital de Elevación (DEM – Digital Elevation Model). El DEM se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie terrestre (Felicísimo, 1994). Los mapas derivados de estos trabajos son creados generalmente utilizando softwares de la familia CAD es decir dibujo asistido por computadora (por sus siglas en inglés Computer Assisted Drawing), éstos son la solución a los problemas de datos e información geoespacial (Kršák et al., 2016). Se debe mencionar que la calidad del DEM depende directamente de la precisión del equipo y el número de puntos medidos. Para lograr un levantamiento preciso y detallado es necesario recopilar el mayor número de puntos sobre la superficie, lo que consume tiempo y requiere de mucho esfuerzo. Por lo general estos productos no alcanzan un buen nivel de detalle ni la calidad de la superficie es suficiente realista para describir el terreno mapeado. Las aplicaciones más comunes de estos levantamientos en ingeniería son en estudios para proyectos de rutas, autopistas, presas, canales, acueductos, oleoductos, gasoductos, obras de arquitectura, relajamientos catastrales, estudios geológicos, predios agrícolas, caracterización de uso de suelo, entre otras (Sánchez et al., 1995; Fernández-López, 1998; Contreras-Medina et al., 2010).

En este trabajo se propone hacer uso de técnicas de restitución fotogramétrica digital para generar información altimétrica mediante el uso de DEMs, así como de información planimétrica mediante la generación de ortofotos digitales. Estos levantamientos se apoyan en el uso de la fotografía aérea

vertical y en la implementación de procesos de restitución fotogramétrica digital. Los modelos 3D obtenidos mediante fotogrametría aérea pueden ser varias veces más detallados que los modelos generados a partir de un levantamiento con métodos convencionales como el taquímetro electrónico (Kršák et al., 2016).

Por otra parte, recientemente la Sociedad Americana de Fotogrametría y Percepción Remota (ASPRS – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) (ASPRS, 2015) ha elaborado los nuevos estándares de exactitud posicional para datos geospaciales digitales, con el fin de asegurar que los resultados obtenidos mediante el uso de las nuevas tecnologías digitales sean confiables y se pueda evaluar su precisión y exactitud. Los productos generados en este trabajo se apegarán a estos nuevos estándares de precisión. Son pocos los estudios que se enfocan a la evaluación de los errores inherentes a los DEM (Pérez-Vega & Mas, 2009), por esta razón se evaluarán los errores de cada uno de los DEM obtenidos y dependiendo del umbral de error se le asignará una clasificación.

1.1 Antecedentes

La fotogrametría es una disciplina que permite obtener información métrica de un objeto a partir de su fotografía. Básicamente consiste en establecer relaciones geométricas entre un objeto, su posición y su imagen, apoyándose en la formación de modelos 3D generados a partir de fotografías en 2D (McGlone et al., 2004). Fundamentalmente consiste en establecer relaciones matemáticas de la geometría proyectiva apoyándose en el sentido de visión estereoscópica que posee el ser humano (Schenk, 1999).

Desde sus inicios, hasta la actualidad, la fotogrametría ha evolucionado a la par con la tecnología, empezando desde la fotogrametría analógica, pasando posteriormente a la fotogrametría analítica y llegando a lo que conocemos actualmente como fotogrametría digital (Blachut & Burkhardt, 1989).

La fotogrametría se clasifica en dos tipos; terrestre y aérea (McGlone et al., 2004):

La fotogrametría terrestre tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología, mientras que en la fotogrametría aérea se utilizan fotografías tomadas mediante cámaras abordo de una aeronave o plataforma orbital. Las fotografías se clasifican de acuerdo al ángulo de inclinación de la cámara, pueden ser oblicuas o verticales (Lillesand et al., 1987). En una fotografía oblicua el plano de la imagen está

inclinado, mientras que en una fotografía vertical el plano de la imagen es aproximadamente horizontal, éstas últimas son las más utilizadas en fotogrametría aérea.

La información generada a partir de una restitución fotogramétrica, se representa como datos de elevación en un formato digital (DEMs), los cuales son la representación digital del terreno y existen en diferentes formatos, los más comunes son: redes irregulares trianguladas (TIN – Triangular Irregular Network), mallas regulares, curvas de nivel, entre otros. Un DEM suele describirse como una matriz de imagen en la cual el valor de cada píxel es asociado a una altura topográfica específica (Sulebak, 2000). Generalmente los DEM sirven como base de referencia en los sistemas de información geográfica (SIG).

Hoy en día existen diferentes tecnologías capaces de adquirir información del relieve del terreno, entre éstas se cuentan, por ejemplo, la tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging) y la interferometría de radar (IFSAR), así como el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV – Unmanned Aerial Vehicles) los cuales pueden estar equipados con cámaras digitales no calibradas y tecnología GPS (Fagua et al., 2011; DeWitt et al., 2015; Uysal et al., 2015). Sin embargo algunas de estas tecnologías presentan desventajas en cuanto a costos de operación y limitaciones en su aplicación.

Uysal et al. (2015) realizaron estudios y encontraron que los datos derivados de UAV pueden alcanzar mayores resoluciones espaciales en el terreno, así como una precisión adecuada y muy cercana a la obtenida por el método GPS Tiempo Real Cinemático (RTK). Los autores concluyen que es posible utilizar los datos fotogramétricos de UAV para producir mapas topográficos de gran escala, teniendo las ventajas de un bajo costo, menor tiempo y reduciendo el trabajo de logística en campo.

Los métodos de análisis digital del terreno se han desarrollado para extraer parámetros y características del relieve (hidrológicos o morfológicos) incluyendo parámetros medibles en la superficie, tales como elevación, pendientes, aspecto, curvatura y área. Algunas características del terreno pueden ser clasificables como cima, cuenca, faldas, laderas, entronques de ríos, terrazas, colinas entre otros (Wilson & Gallant, 2000).

Por otra parte, es posible realizar un análisis multitemporal utilizando fotografías actuales de una zona en particular y compararlas con imágenes tomadas en diferentes fechas. Esto nos permite observar, por ejemplo: cambios en el uso del suelo, interpretar rasgos geomorfológicos e hidrológicos, calcular volúmenes de tierra en deslizamientos, calcular áreas, así como generar cartografía a escalas grandes

para poder llevar a cabo un análisis con mejor detalle (Aschenwald et al., 2001; Martínez-Casasnovas et al., 2004; Chapa Bezanilla et al., 2008; Avtar et al., 2012)

La ASPRS al igual que la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS – International Society of Photogrammetry and Remote Sensing) son instituciones dedicadas al estudio de la fotogrametría y las ciencias afines a esta rama. Fundada en 1934 la ASPRS es una asociación científica, cuya misión es promover la aplicación ética de sensores activos y pasivos, las disciplinas de la fotogrametría, teledetección, sistemas de información geográfica y otras tecnologías geoespaciales de apoyo. Es decir, los estándares más aceptados y utilizados internacionalmente para la cartografía han sido desarrollados por la ASPRS. En 1990 se dieron a conocer los estándares de exactitud para mapas impresos de gran escala. En 2013 se publicó un borrador para mapas digitales, y fue hasta marzo de 2015 que se obtuvo la versión final de los estándares de exactitud para la posición de datos digitales geoespaciales, sustituyendo a los estándares de 1990. Los nuevos estándares son más rigurosos, más completos y son más adecuados a las capacidades de mapeo de las tecnologías en la actualidad, tales como ortofotos digitales y DEMs.

1.2 Planteamiento del problema

El aumento en el uso de los DEMs ha llevado a mayores requerimientos en cuanto a la precisión y resolución de los datos digitales de elevación. Los DEM son el insumo principal en aplicaciones de SIG, tales como: modelación hidrológica, gestión de recursos, determinación de uso y cubierta del suelo, clasificación y evaluación del impacto ambiental, registro de mapas base, gestión de aguas pluviales y evaluación de riesgo por inundaciones (Ubalde et al., 1999; Davis & Wang, 2000; Taubenbock et al., 2007; Loaiza & Valentijn, 2011; Avtar et al., 2012; Fuentes et al., 2012). Mediante el uso y la comparación multitemporal de los DEM se ha podido estimar de manera precisa el área deforestada y los cambios en las alturas de la vegetación (Avtar et al., 2012). En geomorfología, el análisis morfométrico se basa en cambios topográficos calculados a partir de una diferenciación de DEMs (Martínez-Casasnovas et al., 2004). Por otra parte, como la actividad antropogénica en la superficie de la Tierra continúa cambiando drásticamente el paisaje y el ambiente, existe una creciente demanda de información para los estudios que implican la detección del cambio topográfico (Gesch, 2014).

Sin embargo, la mayoría de los DEMs son intrínsecamente diferentes debido a la naturaleza de sus datos de origen, así como su pre-procesamiento y los procedimientos de interpolación. Esto producirá errores que estarán parcialmente correlacionados con la situación topográfica local, como por ejemplo la pendiente, el aspecto y la elevación de un lugar determinado (DeWitt et al., 2015). Esto implica la necesidad de una estandarización rigurosa basada en métodos estadísticos precisos. En México, son pocos los estudios donde se sigue este procedimiento de evaluación, por lo cual no se cuentan con estándares rigurosos para establecer las bases de levantamientos topográficos basados en fotogrametría. Por tanto, entre los principales problemas que este proyecto pretende atacar, destaca la utilización de fotografías aéreas tomadas en diferentes fechas y con diferentes tipos de cámaras, así como diferentes alturas y escalas de vuelo, lo cual implica trabajar con imágenes de diferente resolución espacial. En algunos casos no se cuenta con información sobre los parámetros de vuelo y de la cámara, y además se dificulta la toma de puntos de control terrestre debido a cambios en la cubierta del terreno. Lo anterior implica la necesidad de desarrollar métodos adecuados para estimar los errores en el proceso de restitución y técnicas de comparación para poder llevar a cabo un análisis multitemporal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar, implementar y validar técnicas para la generación y análisis de productos topográficos multitemporales mediante fotogrametría aérea.

1.3.2 Objetivos específicos

- Implementar procedimientos para estimar la precisión vertical en modelos digitales de elevación.
- Implementar procedimientos para estimar la precisión planimétrica de ortofotos digitales.
- Implementar técnicas para la intercomparación temporal de modelos de elevación y ortofotos digitales.
- Validar las técnicas desarrolladas con base en su aplicación a un sitio de prueba predeterminado.

1.4 Organización del documento

En el capítulo siguiente se describen los conceptos básicos y tecnologías empleados en este trabajo. También se presentan los productos típicos generados a partir de restitución digital como los modelos digitales de elevación. El capítulo 3 describe el flujo de trabajo realizado para poder llevar a cabo la restitución fotogramétrica digital. En el capítulo 4 se presenta el análisis de los resultados que se lograron en este proyecto y finalmente en el capítulo 5 se describe la discusión y las conclusiones alcanzadas en este trabajo.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Fotogrametría

Se define a la fotogrametría como la ciencia, tecnología y el arte de obtener información precisa de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar imágenes fotográficas obtenidas de diversas fuentes de energía electromagnética y otros fenómenos (ASPRS, 1990; McGlone et al., 2004). Etimológicamente la palabra “fotogrametría” se deriva de las palabras griegas φως (fotos), que significa luz; γραμα (gram), que significa lo que está dibujado o escrito; y μετρον (metrón), que significa medir. Usando en conjunto esas palabras, fotogrametría significa medir gráficamente por medio de la luz.

Desde sus inicios y hasta la actualidad la fotogrametría ha evolucionado a la par de la tecnología. Empezando con la fotogrametría analógica, que surge en la década de los años treinta basada en restitución de tipo óptico o mecánico, y pasando a la fotogrametría analítica, la cual aparece en 1957 como un desarrollo natural de la interrelación entre restituidores analógicos y el surgimiento de las primeras computadoras. Posteriormente ha llegado a lo que conocemos actualmente como la fotogrametría digital, la cual se encuentra en auge, desarrollándose a la par con las nuevas tecnologías de la información geoespacial (Blachut et al., 1989).

La fotogrametría es una disciplina que resulta de la convergencia de la óptica, la fotografía, las matemáticas aplicadas (geometría proyectiva), para realizar levantamientos de carácter cartográfico principalmente. A lo largo de su evolución ésta ha desarrollado métodos ópticos que se adaptaban a los diferentes campos de aplicación en los que se requería. Esto ha conllevado al desarrollo de equipos diseñados para realizar tareas específicas. Las técnicas y equipos en torno a su aplicación, clasifican a la fotogrametría en terrestre y aérea (McGlone et al., 2004).

2.1.1 Fotogrametría terrestre

Es la categoría de la fotogrametría que utiliza fotografías tomadas a partir de un soporte terrestre; así la posición y los elementos de orientación externa de la cámara son conocidos. Tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología.

2.1.2 Fotogrametría aérea

Es la categoría de la fotogrametría que utiliza fotografías tomadas mediante cámaras ubicadas a bordo de una aeronave o plataforma orbital. De acuerdo a la inclinación de la cámara su eje óptico debe de estar en posición vertical, ya que el plano de la imagen será aproximadamente horizontal, siendo estas imágenes las más utilizadas en fotogrametría aérea (Lillesand et al., 1987). Las cámaras más usadas son de un formato grande (23 x 23 cm), pues éstas son apropiadas para trabajos cartográficos a escalas medianas y pequeñas. En la actualidad la fotografía aérea de formato pequeño (FAFP) está cobrando importancia, debido a sus ventajas logísticas y económicas. Algunas aplicaciones son en estudios geomorfológicos relacionados con procesos de erosión-degradación de suelos y mapeo a escalas que caen en el orden local o una escala grande (planos) (Henry et al., 2002; Harintaka & Susanto, 2009).

2.2 Fotografía aérea

La fotografía aérea es una imagen o conjunto de imágenes de la superficie terrestre, obtenidas mediante cámaras especiales montadas sobre una plataforma aérea. Entre las primeras cámaras específicamente construidas para su empleo desde el aire, destacan las construidas en 1885 por los franceses Tissandier y Ducom, con focal de 360 mm. En 1911 se construyeron en Francia cámaras con focales de hasta 120 mm y formato de 18 x 24 cm, las cuales se empleaban en reconocimientos militares, éstas seguían en funcionamiento al comienzo de la Primera Guerra Mundial. Durante esta guerra, se emplearon además las cámaras alemanas Ememann (focal de 250 mm, formato 13 x 18 cm, peso de 5,8 kg) y Goerz (focal de 1,200 mm, capaz de obtener fotos desde 4 000 m de altura, a escala de 1/1,333).

Las fotografías aéreas se clasifican en función del campo angular de la lente. Los ángulos de observación tienen valores típicos de 60°, 90° y 120° (Sifuentes & Vásquez, 1997). También, las fotografías aéreas se clasifican en tres tipos, de acuerdo con la inclinación de la cámara respecto al horizonte: **oblicuas-altas**, con vista lateral y un ángulo de depresión menor a los 20° (en éstas el horizonte es visible); **oblicuas-bajas**, con vista lateral y un ángulo de depresión típico entre los 20° y los 87° (en ellas el horizonte no es visible); y las **verticales**, apuntando directo hacia el nadir y cuyo ángulo de depresión varía entre los 87° y 90°. En tareas de fotointerpretación es muy común utilizar fotografía oblicua, mientras que en fotogrametría se usa preferentemente la fotografía vertical, ya que éstas son ideales para los propósitos

de medición y mapeo, debido a que su geometría puede ser calculada con mayor precisión. (Lillesand et al., 1987).

El vuelo fotográfico se realiza a una altitud determinada, la cual debe calcularse de acuerdo a una escala deseada y la distancia focal de la cámara. La escala es una propiedad fundamental de las fotos aéreas, y es muy importante en procedimientos fotogramétricos de mapeo y medición. La escala (S) de una foto es la relación entre la altitud promedio sobre el terreno (H) y la distancia focal de la cámara (f).

$$S = \frac{f}{H} \quad (1)$$

En la figura 1 se muestra la relación que existe entre los parámetros f y H para el caso de terreno con altura constante.

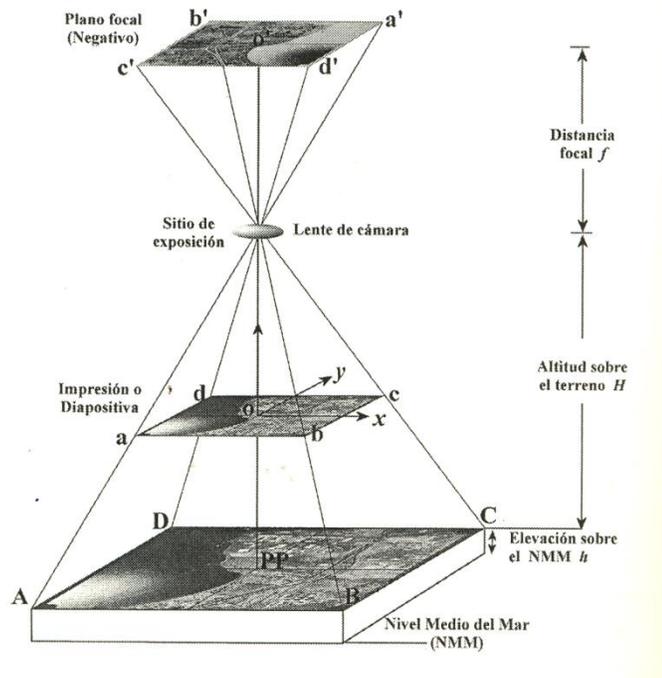


Figura 1. Geometría de una fotografía aérea vertical. H es la altitud de la plataforma sobre el terreno, h es la elevación del terreno sobre el nivel del mar y f la distancia focal de la cámara. El punto principal PP está desplazado una cantidad (x_0, y_0) del origen de coordenadas O de la imagen (Torres-Rodríguez, 2013).

2.2.1 Fotografía aérea estereoscópica

La fotografía aérea estereoscópica es adquirida mediante disparos consecutivos de la cámara a lo largo de la línea de vuelo. Cada fotografía tiene una parte en común con la anterior, a esta parte se le llama “zona de traslape”, es necesario que el traslape lateral sea mayor del 30%. Por lo general el traslape delantero debe ser de 60%, de tal manera que cada foto-centro aparezca en al menos tres fotografías consecutivas (figura 2).

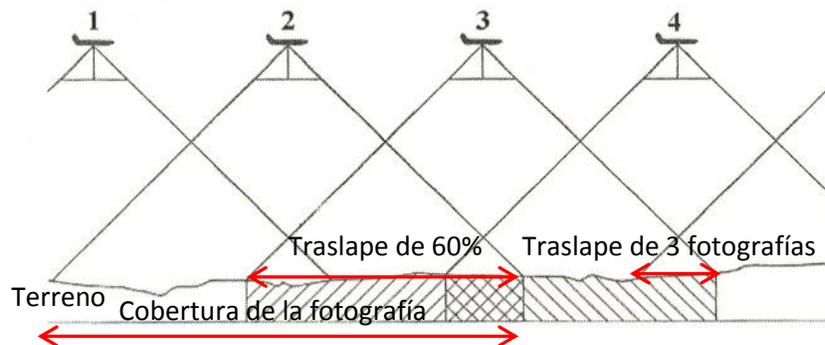


Figura 2. Secuencia de fotografías verticales a lo largo de la línea de vuelo. Se observa el sitio de exposición con un traslape de 60%.

El traslape es fundamental para poder generar la visualización estereoscópica. Se le denomina estereoscopia a la capacidad humana de percibir el relieve y la distancia, mediante la visión duplicada de los objetos a través de nuestros ojos. Esas imágenes de un mismo objeto son enviadas al cerebro donde se fusionan y forman una imagen tridimensional. De esta manera se pueden apreciar distancias, espesores, profundidades, etc. Si la visión se efectúa a través de un solo ojo, este sentido de dimensión desaparece.

Cuando se toman fotografías del mismo terreno desde dos posiciones diferentes en el aire y las dos fotografías obtenidas son observadas simultáneamente con un estereoscopio, se puede ver un modelo aparentemente sólido del terreno. A esto se le conoce como modelo estereoscópico. Para lograr el par estereoscópico las fotografías consecutivas deben de estar solapadas por lo menos un 60%. También, se puede posicionar sobre un sistema de referencia topográfico a cualquier punto del terreno cuya imagen aparezca por lo menos en dos fotografías consecutivas, siempre y cuando se conozcan las coordenadas de cada uno de los puntos en las capturas sobre el mismo sistema de referencia.

El cubrimiento estereoscópico puede adquirirse en bloques (serie de imágenes consecutivas) mediante múltiples líneas de vuelo adyacentes (figura 3). El porcentaje típico de traslape lateral entre líneas de vuelo es entre un 20% y 40% (para evitar zonas sin cobertura).

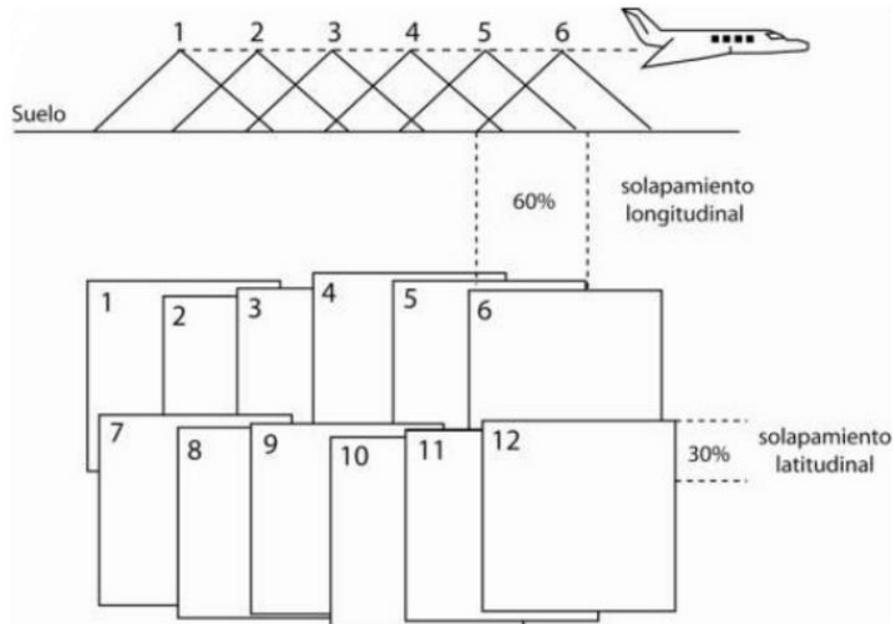


Figura 3. Proceso de adquisición de un bloque de fotografías aéreas. Los valores típicos para el porcentaje delantero y lateral son del 60% y 30%, respectivamente.

2.2.2 Cámaras métricas profesionales

La cámara métrica de gran formato es una cámara fotográfica calibrada cuyos elementos de orientación interna son conocidos, así como su calidad geométrica, la cual se puede considerar como una proyección central ideal (Schenk, 1999).

En la actualidad, el uso de cámaras digitales dedicadas al mapeo aéreo va en incremento día a día, anteriormente la fotografía se obtenía mediante cámaras analógicas, estas utilizaban rollo de película sensible y los formatos típicos iban desde 18 x 18 cm a 23 x 23 cm. La precisión y desempeño de estas

cámaras se dio a partir de muchos años de desarrollo y refinamiento en la óptica, en su mecánica y en la calidad de la película empleada (McGlone et al., 2004).

2.2.3 Cámaras no métricas

Pueden ser cámaras con formato de película de 35 mm y 70 mm, o cámaras digitales de aficionados. Sus productos se conocen como fotografías aéreas de formato pequeño (FAFP). En este tipo de cámara la geometría interna y su óptica son desconocidos, como consecuencia de sus características no métricas la información extraída no es aceptada, para ello es necesario la calibración de este tipo de cámaras. La calibración consiste en la determinación de su distancia focal, la estimación de sus coeficientes de distorsión y de la posición del punto principal en el plano de la imagen (Seedahmed et al., 2016).

En la actualidad la FAFP se basa en cámaras digitales de peso ligero, incluyendo desde los modelos comerciales tipo point and shot orientados al consumidor, hasta los modelos profesionales tipo DSLR (Digital Single Lens Reflex) en sus versiones de formato APS-C y de formato completo (Torres-Rodríguez, 2013).

2.3 Estación fotogramétrica digital

La estación de trabajo fotogramétrica digital procesa fotografías aéreas u otras imágenes digitales para obtener mapas, ortofotos, fotomosaicos, DEMs y permite la visualización de esta información en 3D. El propósito es obtener a partir de un conjunto de coordenadas planas “x” y “y” de un objeto presente en una fotografía, las coordenadas espaciales “x, y, z” de ese mismo objeto.

El sistema se basa en la correlación automática de la imagen (Fabris & Pesci, 2005). En un principio esta instrumentación consistía de dispositivos opto-mecánicos que ayudaban al fotogrametra a seguir los contornos de los objetos en un modelo estereoscópico 3D. Las medidas obtenidas a partir de este proceso eran transferidos simultáneamente a un lápiz montado en la parte superior de la mesa de dibujo, con esto se lograba crear un mapa con una escala predefinida con anterioridad. Esto se conocía

como transferoscopio y permitía la extracción de características, siendo la principal herramienta para mapeo topográfico en la década de los 70's (Coelho, 2004).

2.4 Orientación de las imágenes

En el procedimiento para generar un DEM, se requiere de la orientación de las imágenes. En este proceso se determinan los parámetros empleados para realizar la asignación de la geometría primitiva (puntos, líneas y áreas) de un sistema de coordenadas de cámara a otro de mundo real (Schenk, 1999). Los pasos fundamentales consisten en las orientaciones interna y externa, consistentes en un registro en un sistema de referencia definido.

2.4.1 Orientación interna

Este es el primer paso fundamental, la orientación interna se lleva a cabo para definir la posición del marco dentro de la cámara (columna-línea a coordenadas de imagen), utilizando el certificado de calibración de la cámara (proporcionado por la fábrica y se expresa en milímetros) para corregir la distorsión y para asignar valores conocidos en puntos específicos de coordenadas, es decir, marcas de referencia o marcas fiduciales. Las marcas de referencia son esenciales en las fotografías, regularmente se encuentran en las esquinas y lados de las imágenes (figura 4).



Figura 4. Marcas fiduciales

2.4.2 Orientación externa

La orientación externa describe la transformación entre los sistemas de coordenadas de la cámara con las coordenadas del objeto. Esta se obtiene por dos pasos: orientación relativa y orientación absoluta.

2.4.2.1 Orientación relativa

Tiene como objetivo crear el modelo estereoscópico en un sistema de relación arbitraria usando puntos en común (puntos conjugados) en ambas imágenes. También se le conoce como zona de traslape.

2.4.2.2 Orientación absoluta

Esta orientación, es la transformación del modelo estereoscópico generado en un marco de referencia externa (por ejemplo UTM) definido por las coordenadas de varios puntos de control en tierra (GCP – Ground Control Point), reconocidos en las imágenes.

2.5 Productos fotogramétricos

Los productos fotogramétricos es toda aquella información resultante o generada mediante restitución fotogramétrica. Es representada como datos de elevación en un formato digital (DEMs), el cual es la representación digital del relieve del terreno y existen en diferentes formatos, los más comunes son: redes irregulares trianguladas (TIN – Triangular Irregular Network), mallas regulares, curvas de nivel y conjuntos de puntos acotados.

2.5.1 DEM

Un DEM es una representación digital de la superficie de la tierra, suele describirse por una matriz de imagen en la cual el valor de cada pixel es asociado a un altura topográfica específica (Sulebak, 2000) y

que generalmente sirve como base de referencia en un sistema de información geográfico (SIG). Por lo general está representado en dos formatos: TIN (Triangulated Irregular Network), o Malla regular (GRID) (Wang et al., 2006).

2.5.1.1 Malla regular

Un modelo digital de elevación o DEM puede ser la representación digital de la variación continua del relieve de la superficie del terreno. Al ser un modelo digital del terreno (DTM – Digital Terrain Model), tiene una estructura numérica de datos que representa la distribución de la altitud en la superficie del terreno, mediante un arreglo de puntos en malla (figura a) con coordenadas (x, y, z) en un sistema de coordenadas arbitrarias (figura 5) (Zhu et al., 2005).

2.5.1.2 TIN

Las redes irregulares trianguladas (TIN - Triangular Irregular Network) son una representación de una superficie a partir de un conjunto de puntos irregularmente distribuidos. Cada uno de los puntos y líneas de quiebre representa el vértice de al menos un triángulo que conforma esa red (figura b).

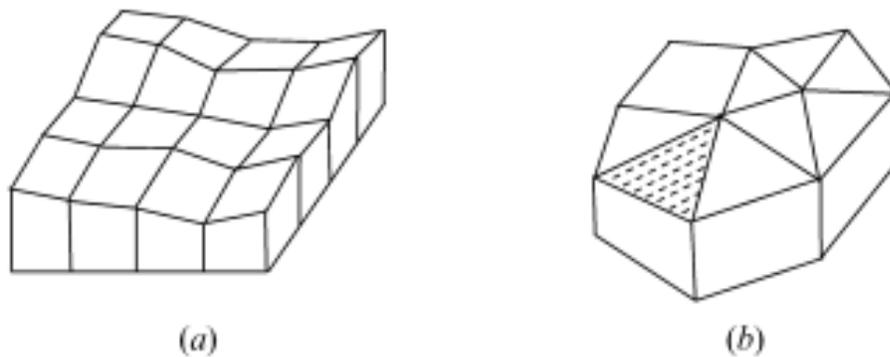


Figura 5. Tipos de DEM a) Malla regular b) TIN

Capítulo 3 Materiales y Métodos

Esta sección describe los insumos utilizados y el procedimiento del flujo de trabajo realizado para la obtención de los DEM y ortofotos del sitio de prueba (campus CICESE). En todos los pares de fotografías se aplicaron las técnicas de restitución fotogramétrica y posteriormente se aplicó el método de validación de acuerdo a los estándares establecidos por la ASPRS 2015.

3.1 Fotografía aérea y sitio de pruebas

Las imágenes obtenidas con la cámara no métrica (fotografías de formato pequeño) utilizadas en este estudio fueron adquiridas por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Las imágenes de formato grande (obtenidas con cámaras métricas) fueron adquiridas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) y por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada (IMIP).

El sitio de prueba seleccionado para probar la calidad y precisión de los modelos digitales del terreno obtenidos con las técnicas propuestas fue el campus de CICESE. El campus tiene un área aproximada de 14.41 hectáreas y se encuentra incluido dentro de la zona de levantamiento fotogramétrico delimitada por un cuadrilátero con coordenadas UTM que van de: 530757.4 m a 532889.4 m en Este y 3525120.0 m a 3527588.0 m en Norte respectivamente (figura 6). El área de trabajo abarca una porción de la línea de costa al norte de la bahía de Ensenada y tiene una configuración del terreno que va desde el nivel del mar hasta cotas que rebasan los 220 m de altura. En cuanto a la vegetación, existe un área del campus que incluye todavía cobertura de vegetación nativa en el cerro que se encuentra al norte del campus y al oeste del edificio de Telemática. Esta área tiene una superficie aproximada de 1.93 Ha. La comunidad es matorral costero con una cobertura de 80.5% y está compuesta por 28 especies. 7 de estas son arbustivas leñosas; 2 suculentas; 4 cactáceas. Las especies dominantes en términos de cobertura son: *Bahiopsis laciniata* 30.57%, *Eriogonum fasciculatum* 19.9%, *Artemisia californica* 17.13 %, *Simmondsia chinensis* 9.87%, *Euphorbia misera* 1.5% y *Mirabilis laevis* 1.46% (Mario Salazar, información sin publicar).



Figura 6. Zona de levantamiento fotogramétrico que incluye al sitio de pruebas localizado en el campus de CICESE (polígono rojo).

3.1.1 Fotografía aérea de formato pequeño

Se utilizó una cámara digital Canon EOS 500D con una distancia focal nominal de 18 mm para obtener las fotografías de formato pequeño. La adquisición de las fotos se hizo durante un vuelo en septiembre del 2010 utilizando un avión Cessna 402 como plataforma aérea. La línea de vuelo se realizó de norte a sur, manteniendo una altura aproximada de 840 m sobre el nivel medio del mar, cubriendo una sección

transversal en el terreno de 700 y dando el equivalente en la fotografía de una escala nominal 1:30,000. En la tabla 1 se muestran los datos de calibración correspondientes a esta cámara. En la figura 7 se muestra la serie de fotografías con un traslape frontal aproximado de 60% sobre el sitio de prueba.

Tabla 1. Parámetros de calibración de cámara EOS 500D.

Vuelo CICESE 2010	
Cámara	EOS 500D
Distancia Focal	18.803 mm
Xo	0.1469 mm
Yo	0.0728 mm
k1	4.71E-04
k2	-8.04E-07
k3	-1.85E-09
t1	8.31E-05
t2	-1.97E-05



Figura 7. Fotografías de formato pequeño con traslape de 60% sobre el CICESE.

3.1.2 Fotografía aérea de formato grande

Se cuenta con un acervo de fotografía histórica de gran formato, obtenida a través de instituciones federales y municipales:

- Fotografía aérea a color con escala de 1:25,000 adquirida por DETENAL en el año de 1973

- Fotografía aérea en blanco y negro con escala de 1:4,500 adquirida por el IMIP en el año de 1994
- Fotografía aérea a color con una escala de 1:40,000 adquirida por INEGI en el año de 2006

3.1.2.1 Fotografía aérea de formato grande del año de 1973

Para este par de fotografías se conoce que la orientación en su línea de vuelo fue de oeste a este (figura 8). La altura de vuelo es desconocida y las coordenadas de sus marcas fiduciales son desconocidas. En el reporte de calibración, solo se mencionan los parámetros de distorsión de la lente y la distancia existente entre cuatro de las ocho marcas fiduciales (dadas en milímetros). A partir de esta geometría y apoyándose de AutoCAD se calcularon las coordenadas de las ocho marcas fiduciales para ese par de fotografías (figura 9).



Figura 8. Par de fotografías aéreas del año 1973 de formato grande, con una orientación de vuelo que va de oeste a este sobre la ciudad y bahía de Ensenada.

```

.GENERAL
$VERSION 6.0
.CAMCOR00
$NAME UAGII3018
$DATE 1973-1-16
$FOCAL 153.000000
$XP_OFFSET 0.0058
$YP_OFFSET 0.0091
$MARK 1 -106.0092744 -106.0072187
$MARK 2 106.0087795 106.0067237
$MARK 3 -106.0084966 106.0064409
$MARK 4 106.0090623 -106.0070065
$MARK 5 -0.00051393 -106.0063
$MARK 6 0.00051393 106.0068
$MARK 7 -106.0087 0
$MARK 8 106.0093 -0
$DISTORTION_TYPE 2
$DISTORTION 20 0
$DISTORTION 40 0.001
$DISTORTION 60 0.001
$DISTORTION 80 0.003
$DISTORTION 100 0.001
$DISTORTION 120 -0.002
$DISTORTION 140 -0.004
$DISTORTION 148 -0.001
.END

```

Figura 9. Parámetros internos y ocho marcas fiduciales calculadas (encerradas en rojo) para orientar los pares de fotografías del año 1973.

3.1.2.2 Fotografía aérea de formato grande del año de 1994

El vuelo realizado para la obtención de los pares de 1994 por el IMIP se hizo en dirección sur a norte cubriendo todo el campus y parte de la línea de costa norte de la bahía (figura 10).



Figura 10. Pares de fotografías del año de 1994 a blanco y negro obtenidas por el IMIP.

En la tabla 2 se muestran los parámetros de calibración de la cámara utilizada por el IMIP. Se conoce que el vuelo se efectuó en septiembre de 1994, a blanco y negro, con una escala de 1:4,500, a una altura de vuelo aproximada de 700 m.

3.1.2.3 Fotografía aérea de formato grande del año de 2006

Estas fotografías fueron adquiridas por el INEGI, tienen una escala nominal de 1:40,000, y fueron tomadas en agosto de 2006 a color. La línea de vuelo es de norte a sur y con un traslape de 60% (figura 11). Los parámetros de calibración para esta cámara se muestran en la tabla 3.

Tabla 2. Parámetros de calibración de la cámara Zeiss RMK.

IMIP 1994	
Cámara	Zeiss RMK
Distancia Focal	153.629 mm
Xo	-0.005 mm
Yo	0.012 mm
k1	7.33E-05
k2	-1.53E-08
k3	6.63E-13
t1	-1.00-12
t2	-2.15E-07

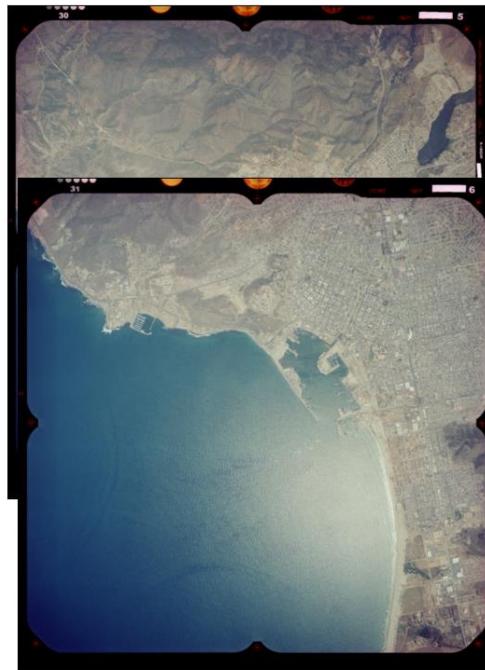
**Figura 11.** Par de fotografías a color, adquiridas por INEGI con una escala de 1:40, 000.

Tabla 3. Parámetros de calibración para las fotografías de INEGI.

INEGI 2006	
Cámara	Jena LMK
Distancia Focal	152.192 mm
Xo	-0.005 mm
Yo	0.010 mm
k1	1.82E-05
k2	-7.42E-09
k3	4.24E-13
t1	-1.84-07
t2	-2.09E-07

3.2 Puntos de control en el terreno

Cada uno de los pares fotográficos necesita de una georreferenciación indirecta con el terreno. Por lo tanto se necesitan puntos de control en el terreno (GCP – Ground Control Point) así como puntos de verificación (checkpoints), donde la posición de cada uno de estos, será conocida por sus tres coordenadas (figura 12). Todos los puntos de control y checkpoints se midieron con un GPS Trimble Pathfinder modelo ProXH. El tiempo de captura para cada punto fue de 5 minutos (con una triangulación satelital ideal). Posteriormente estos datos pasaron por un postproceso donde alcanzaron una corrección diferencial de grado sub-pie (< 30 cm). Geométricamente bastan 3 puntos para determinar un plano, sin embargo para trasladar la figura cuadrada de la fotografía a su proyección plana correspondiente se deben utilizar al menos 4 GCP, preferentemente cerca de las esquinas.

Los puntos pueden marcarse antes del vuelo, con el fin de indicar sus posiciones de manera que aparezcan en las fotografías. Sin embargo, para el caso de fotos históricas el procedimiento consiste en identificar los rasgos en las fotografías analógicas y posteriormente verificar que esos rasgos fisiográficos o marcas sobre el terreno existieran.

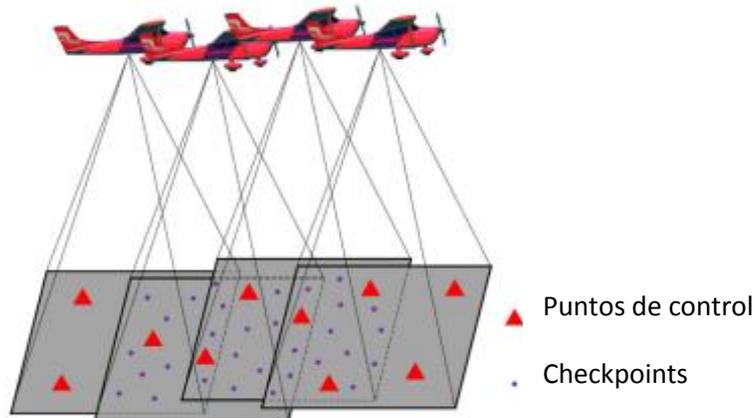


Figura 12. Distribución de puntos de control en el terreno (GCP) y puntos de verificación (checkpoints).

Los GCP necesarios para la orientación absoluta de las fotografías de 1973 fueron los más complicados para ubicar y medir, ya que estos se tuvieron que identificar sobre marcas sobresalientes, estructuras o rasgos fisiográficos en el terreno existentes a la fecha de toma de la foto. Se hizo una salida de campo para corroborar que estos rasgos aún existieran (figura 13) y se diseñó una distribución adecuada de puntos en el área de traslape en ambos pares fotográficos. En la figura 14 se muestran alrededor de 16 GCP ubicados sobre rasgos, estructuras y marcas que sirvieron para la orientación absoluta de este par fotográfico.



Figura 13. GPS colectando datos sobre el GCP ubicado.

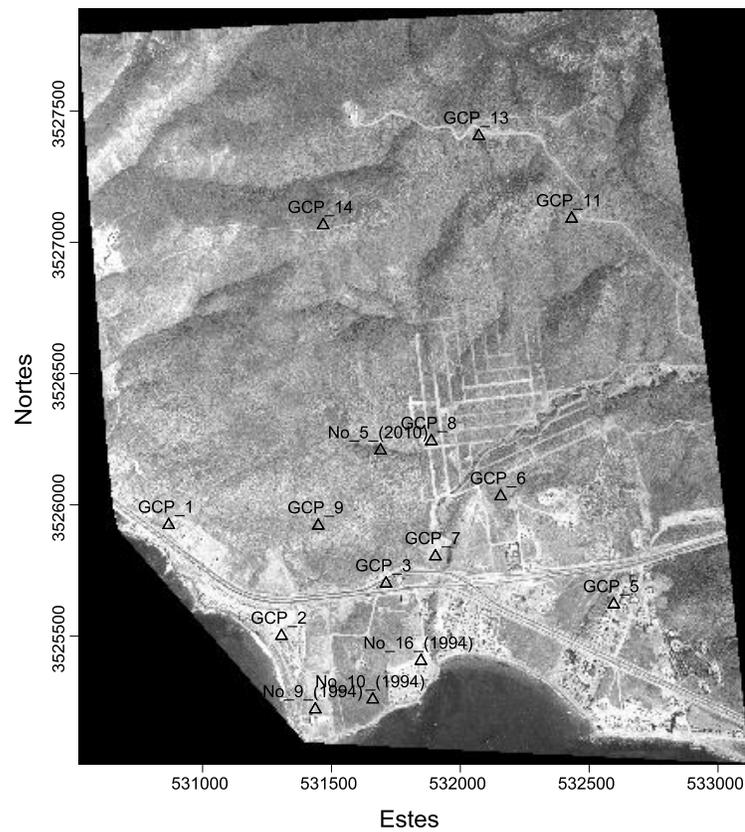


Figura 14. Distribución de los GCP recolectados para las fotografías de 1973.

Para el resto de los pares fotográficos (INEGI, IMIP, CICESE) se tomaron los puntos GPS del acervo de datos (cédulas) obtenidos por el laboratorio de Geomática, como se muestran en las tablas 4, 5 y 6. En la tabla 7 se muestran los puntos de verificación (checkpoints) tomados dentro del campus.

Tabla 4. Coordenadas UTM de rasgos distintivos identificados en las fotografías adquiridas por CICESE (2010).

PUNTO	ESTE	NORTE	Z
1	531403.369	3526285.79	127.962
2	531492.553	3526253.04	119.364
3	531523.975	3526230.18	115.635
4	531595.335	3526216.16	105.348
5	531690.415	3526214.16	85.289
6	531709.752	3526173.31	82.388
7	531792.59	3526134.68	57.725
8	531217.294	3525890.68	39.078
9	531270.604	3525885.8	36.318
10	531153.27	3525698.99	14.667
11	531235.308	3525544.13	7.922
12	531279.094	3526029.44	68.798
13	531459.651	3525913.31	41.381
14	531522.802	3525884.69	40.343
15	531504.6	3526020.08	76.274
16	531499.651	3526109.8	96.51
17	531622.419	3526096.68	88.898
18	531618.344	3526002.25	62.405
19	531385.683	3526115.53	109.454
20	531780.851	3525945.01	34.382
21	531516.837	3525768.11	22.487
22	531735.733	3525734.89	22.827
23	532055.032	3525693.07	15.268
24	531750.036	3525945.59	45.085

Tabla 5. Coordenadas UTM de rasgos distintivos observados en las fotografías de IMIP (1994).

PUNTO	ESTES	NORTES	Z
1	531428.823	3526160.118	116.139
2	531731.219	3526083.476	68.75
3	531582.126	3525903.03	44.875
4	531720.541	3525824.597	32.803
5	531405.961	3525763.733	21.294
6	531570.568	3525678.271	12.494
7	531394.247	3525559.022	23.764
8	531389.622	3525379.239	9.982
9	531437.412	3525227.659	6.488
10	531660.214	3525265.43	6.249
11	532239.924	3526196.382	58.729
12	531836.372	3526242.831	46.637
13	531921.064	3526052.461	29.251
14	532167.761	3526025.19	41.03
15	532293.155	3525784.351	14.017
16	531847.094	3525412.47	8.838
17	532324.45	3525326.837	8.836

Tabla 6. Coordenadas UTM de los rasgos distintivos identificados en los pares fotográficos utilizados para las fechas de 1973 y 2006.

PUNTO	ESTE	NORTE	Z
1	530868.304	3525930.17	13.031
2	531306.052	3525507.54	8.652
3	531711.583	3525707.15	22.134
4	532364.836	3525296.75	5.153
5	532595.295	3525627.89	16.043
6	532156.704	3526039.54	41.136
7	531903.356	3525810.74	20.915
8	531887.731	3526249.56	39.006
9	531448.743	3525927.77	47.162
10	531375.938	3526067.26	91.492
11	532431.918	3527097.3	175.247
12	532389.786	3527480.74	201.493
13	532071.704	3527412.35	203.329
14	531468.048	3527072.34	188.047
15	531581.324	3527489.52	226.45
16	531339.266	3525701.42	15.47

Tabla 7. Coordenadas UTM de puntos de verificación (checkpoints) adquiridos dentro del campus CICESE (2015).

PUNTO	ESTES	NORTES	Z
1	531397.851	3526267.45	127.214
2	531506.406	3526194.898	122.473
3	531604.168	3526187.258	103.064
4	531725.636	3526190.228	79.564
5	531710.716	3526105.371	76.962
6	531563.213	3526004.843	72.989
7	531483.419	3526124.318	101.469
8	531297.083	3526121.75	105.158
9	531303.726	3526041.343	73.173
10	531317.375	3525909.117	48.014
11	531479.123	3525931.007	54.078
12	531700.394	3525960.965	47.293
13	531579.254	3525842.361	33.014
14	531720.286	3525824.802	32.97
15	531326.923	3525736	17.86
16	531456.039	3525733.156	18.287
17	531609.439	3525742.061	22.291
18	531777.946	3525741.797	23.893

3.3 Restitución fotogramétrica

El primer paso para iniciar con el flujo de trabajo establecido es tener cada uno de los pares estereoscópicos con sus respectivos GCP y también sus parámetros de calibración para cada uno de los tiempos. Para llevar a cabo el procesamiento de los datos se utilizó una estación fotogramétrica digital con el software DVP-GS (versión 5.5.0.19, con vigencia de 1989 – 2003), perteneciente a Groupe Alta un grupo norteamericano. Este software nos permite generar DEM's y ortofotos dados en un sistema de coordenadas; a su vez, éste también está integrado por varios módulos para llevar a cabo las distintas operaciones necesarias en este proyecto, tales como: orientación (interna y externa), vectorización, triangulación, ortorectificación y mosaico.

En la figura 15 se muestra el flujo de trabajo que se siguió en el proceso de restitución fotogramétrica.



Figura 15. Flujo de Trabajo.

Los productos generados a partir de este flujo de trabajo fueron: DEMs, mapas de contornos y ortofotos para las distintas fechas. Para realizar esto se definió una zona de trabajo de 577.14 hectáreas (figura 16) en las fotos de DETENAL e INEGI. Esta área permitió generar una geometría adecuada tanto en los DEMs como en las ortofotos. Posteriormente se densificó con puntos y líneas de quiebre (breaklines). Todos los pares fotográficos pasaron por un flujo de trabajo como el de la figura 15.

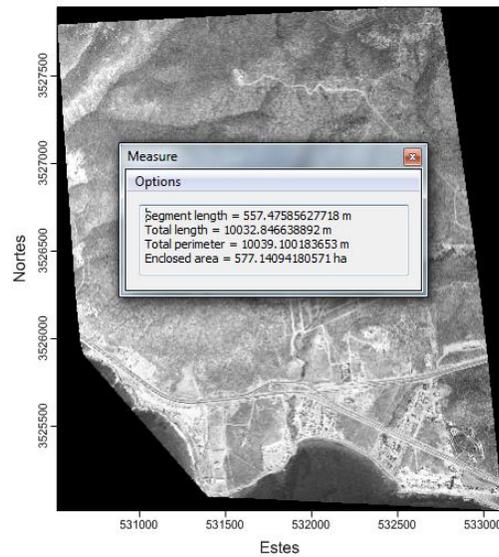


Figura 16. Zona de estereoscopia asignada en los pares de DETENAL e INEGI.

3.3.1 Orientación (interior y exterior)

La orientación de las imágenes se hace con la intención de establecer un modelo que implica la relación métrica entre el terreno y la imagen formada por la cámara. Para esto se utilizan los GCP tomados en campo y los datos de calibración interior de las distintas cámaras.

Es un proceso manual y se inicia con la orientación interior, en esta primer etapa se permite reconstruir el haz de rayos de una imagen, básicamente consiste en establecer la primera transformación de coordenadas del píxel (columna, línea) a coordenadas de imagen, y está expresada en milímetros, referido a un sistema cartesiano donde el origen está en el centro de proyección de la cámara. Posteriormente, se tienen que identificar y localizar las marcas fiduciales localizadas en las esquinas y lados de los pares fotográficos. Se debe tener en cuenta que las imágenes dependen directamente de los factores como la distancia focal y todos los parámetros dados por la hoja de calibración. Una vez que la orientación interna se cumple, se inicia el primer paso de la orientación externa (orientación relativa), es decir, pasamos a formar el modelo estereoscópico ubicando puntos conjugados, estos juegan un papel importante pues serán la relación geométrica de las imágenes y formarán la zona de traslape o sea nuestra zona de trabajo. El segundo paso de la orientación externa es la orientación absoluta, en esta etapa se utiliza la técnica de georreferenciado indirecto, es decir, se orienta a un sistema de

coordenadas del modelo con respecto a las coordenadas de los GCP, apoyándose en la relación imagen – objeto.

3.3.2 Restitución (Vectorización)

Al finalizar la etapa de orientación podemos iniciar con el proceso de vectorización. Teniendo el modelo estéreo creado a partir de dos fotografías aéreas orientadas podemos dar lugar a la digitalización de los elementos u objetos, rasgos geomorfológicos y características existentes en el terreno. Las coordenadas o elementos vectorizados en puntos o líneas de quiebre (breaklines) se van almacenando como unidades de terreno, por lo tanto es posible exportar cualquier archivo de vectores.

El objetivo es producir una nube densa de puntos 3D georreferenciados que cubran toda la zona traslapada. La restitución tiene como propósito acelerar el método de ejecución y la calidad con que se lleva a cabo un levantamiento topográfico tradicional. El restituidor nos permite mapear puntos del terreno indefinidos y con precisión.

El principio del funcionamiento de los instrumentos digitales es similar al de los analíticos. La transformación de la proyección cónica de la fotografía (x, y), a la proyección ortogonal (x, y, z) del terreno se hace matemáticamente. La marca flotante permanece siempre en el campo visual, de modo que el operador puede desplazar la marca flotante sobre el terreno, elevarla o hundirla, como se desee. El operador decide en que momento dibujar un punto o trazar una línea. Cuando se empieza a dibujar se va registrando y almacenando la coordenada de cada punto o trazo. Es necesario tener un buen trazo en la configuración del terreno, debemos de incluir todos los detalles como pueden ser caminos, ríos, hoyos, barrancos (figura 17). Cabe mencionar que mientras más abrupta es la topografía mayor será el número de puntos y breaklines que colocaremos para densificar la zona y no perder detalle, mientras que en zonas con topografía más plana o con pendientes suaves, la configuración o densificación de puntos será menor.

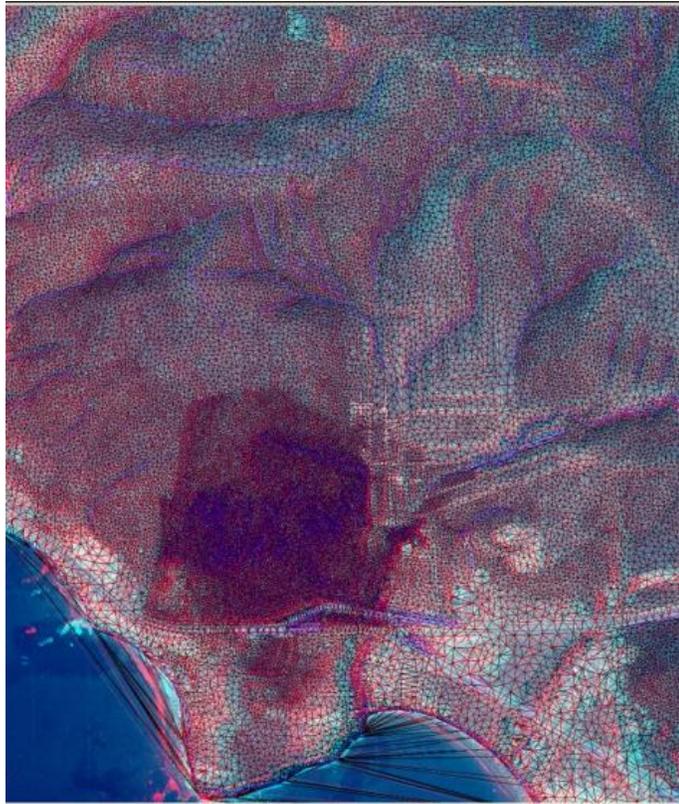


Figura 17. Ejemplo de una malla triangular irregular (TIN) para la zona de levantamiento topográfico. Nótese la densificación del TIN en la zona del campus de CICESE.

3.3.3 Triangulación

Este procedimiento consiste en interpolar cada uno de los puntos y líneas restituidos, generando así una malla triangular irregular (TIN). Para generar la triangulación debemos alimentar el modulo con un archivo de vectores (generado por restitución) y una imagen del par, preferentemente la que tenga mejor color y esté menos dañada (ya que las fotografías históricas en su mayoría tienen desperfectos en su acetato).

3.3.4 Ortorectificación

En esta etapa se eliminan las distorsiones geométricas y de escala ocasionada por el lente en las fotografías, la topografía del terreno y la inclinación del sensor también son removidos. Como resultado nos da una imagen con la precisión cartográfica y escala de un mapa, pero con el detalle o resolución de

la fotografía (figura 18). En esta etapa se utilizan la fotografía y la triangulación realizada en los pasos anteriores.

En algunos casos el proceso de ortorectificación no empata con su marco de referencia, para este caso solo basta con georreferenciar la imagen utilizando puntos de control y finalmente se tendrá una ortofoto georreferenciada.



Figura 18. Ejemplo de ortofoto en la que se ha eliminado el efecto de distorsión por la óptica de la lente y el desplazamiento por relieve.

3.4 Generación de DEM y georreferenciación de ortofotos

Se utilizó el programa Surfer versión 12.0 (de la empresa Golden Software, Inc. Ubicada en Colorado) salido al mercado en Enero de 2014. Para llevar a cabo el proceso de generación del DEM se importaron los vectores restituidos en la estación fotogramétrica al igual que la Ortofoto correspondiente.

3.4.1 Generación del DEM

Para la creación del DEM, se requiere crear una malla, esta se generará a partir de los vectores exportados en formato ASCII de la estación fotogramétrica digital (figura 19).

3.4.2 Georreferenciación de ortofotos

Una vez generado el DEM se sobrepone la ortofoto como una capa exportada por la estación fotogramétrica para facilitar la asignación del sistema de coordenadas, como se muestra en la figura 20.

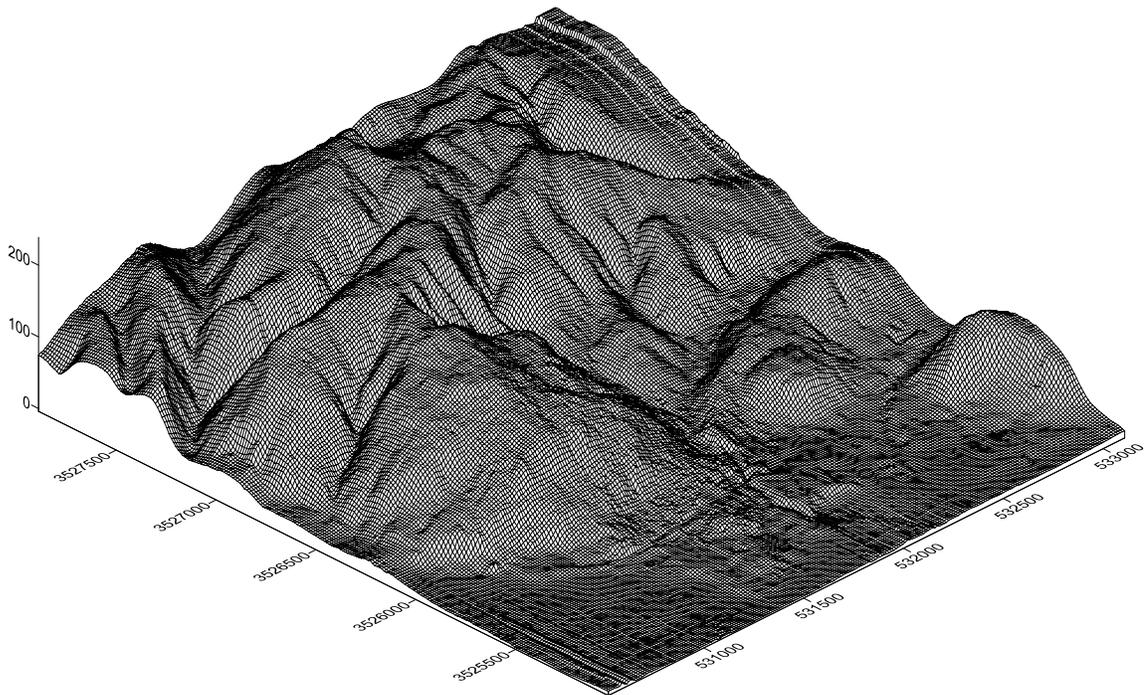


Figura 19. Ejemplo de un DEM representado con una malla regular (en coordenadas UTM) con un espaciado de 11.45 m entre celdas.

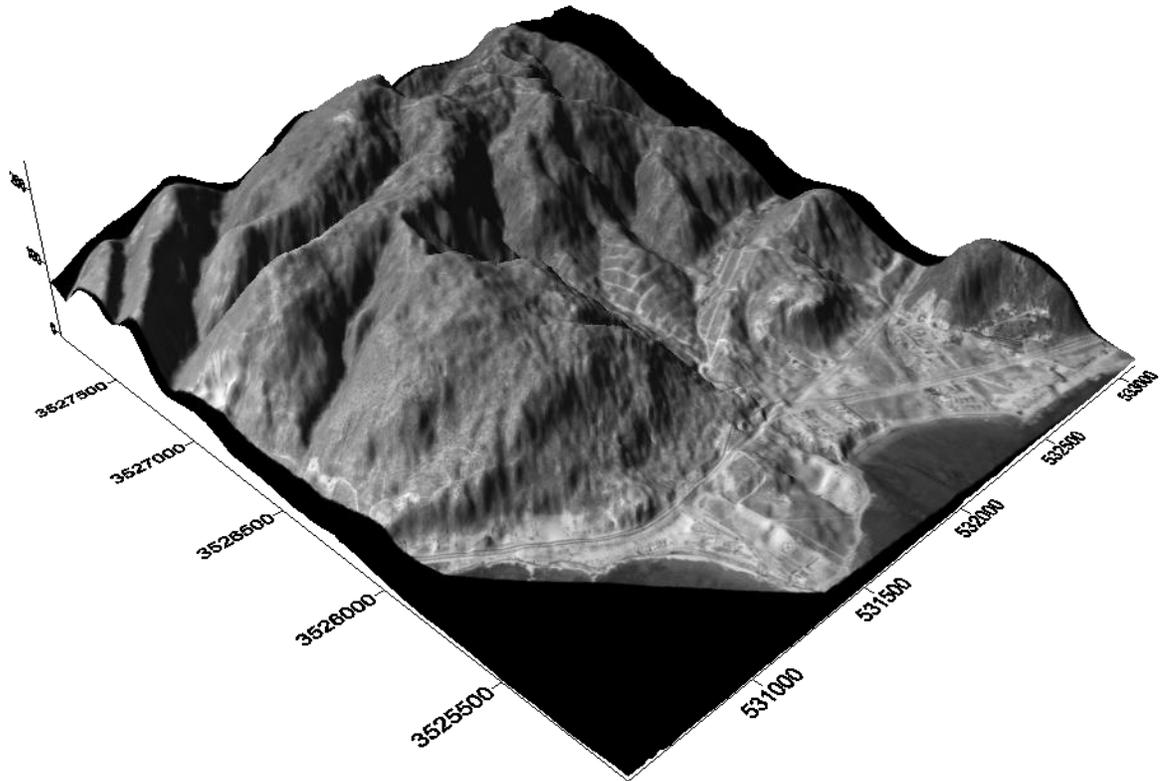


Figura 20. Ejemplo de un DEM con su respectiva ortofoto sobrepuesta.

Capítulo 4 Análisis de los Resultados

4.1 Análisis del DEM 2006

Con base en la metodología se decidió primeramente elegir un DEM de referencia pues el análisis de los resultados es comparativo. El DEM de INEGI del año 2006 se tomó como base de referencia, debido a que cuenta con las siguientes características: los parámetros de calibración interna se tienen bien documentados, las fotografías cubren un área de aproximadamente 580 hectáreas (mayor a cualquier otro par utilizado), éstas fueron adquiridas por INEGI mediante una cámara métrica a color y de buena resolución, se tiene una mayor densificación y distribución tanto de GCP como de checkpoints (horizontales y verticales) debido a que su fecha es relativamente reciente.

A partir de las fotografías de 2006 se generó un DEM, utilizando la estación fotogramétrica digital se vectorizaron y densificaron puntos y breaklines con una separación menor a 17 metros en la zona de trabajo y de aproximadamente 4 metros en el sitio de prueba (campus CICESE). Se propuso saturar con puntos y breaklines el campus y alrededores de CICESE ya que mientras mayor sea la densificación, mayor será el detalle que alcanzará el DEM. Se deben de tomar precauciones en las zonas donde existe vegetación pues se debe tener certeza y precisión al restituir un punto sobre esta zona, siempre se busca mapear solamente el terreno. También en zonas donde existen cañadas se observan sombras, a estas zonas se les denomina “zonas baja confianza” que será necesario considerar al momento de validar la precisión del DEM.

Posteriormente se generó una malla regular con un espaciado de 17 metros (figura 21). Con esta misma interpolación se procedió a generar los productos resultantes: DEM, curvas de nivel y DEM con su ortofoto sobrepuesta (figuras 22, 23 y 24).

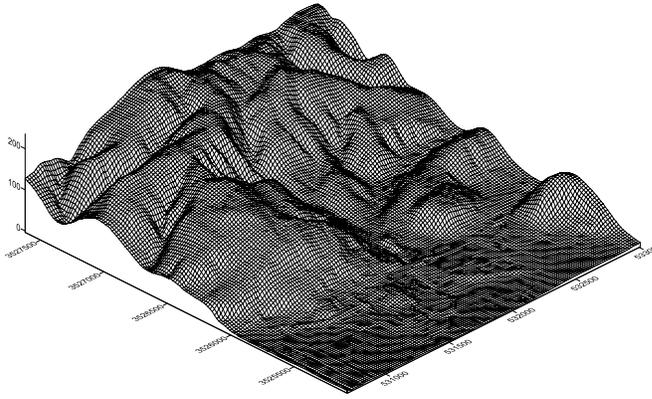


Figura 21. Malla regular con un espaciado de 17.16 m que representa los pares fotográficos de 2006.

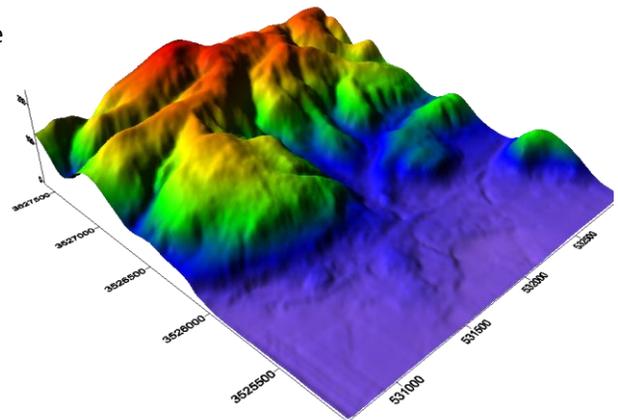


Figura 22. Modelo digital del terreno del año 2006.

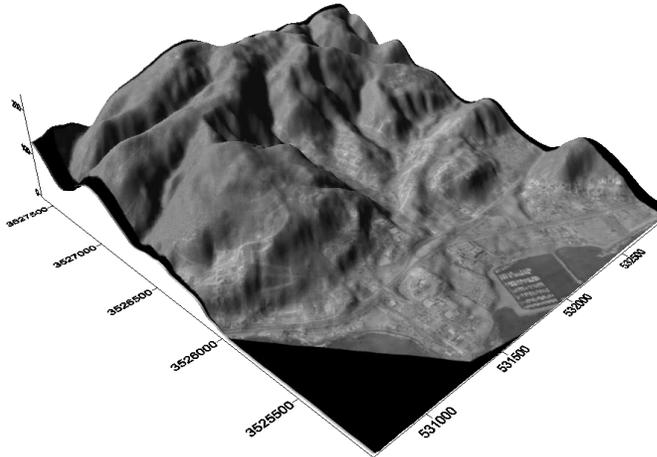


Figura 23. DEM de 2006 con su ortofoto sobrepuesta.

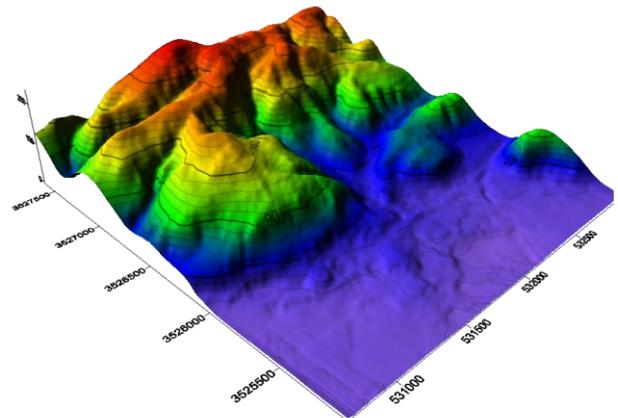


Figura 24. DEM de 2006 con curvas de nivel.

4.1.1 Análisis del DEM de 1973

Siguiendo la metodología descrita anteriormente se continuó a generar el DEM de 1973 a partir de las fotografías obtenidas por DETENAL, estas fotografías carecían de parámetros internos de calibración, estos parámetros se calcularon de acuerdo a lo descrito en la metodología. Posteriormente se realizó la vectorización, esta llevó una densificación entre puntos de aproximadamente 10 metros en la zona de traslape y se saturó en el sitio de prueba con una separación entre puntos menor a 4 metros. La malla regular se hizo con un espaciado de 11.45 metros (figura 25), y usando esta interpolación se generaron el resto de los productos (figuras 26, 27 y 28).

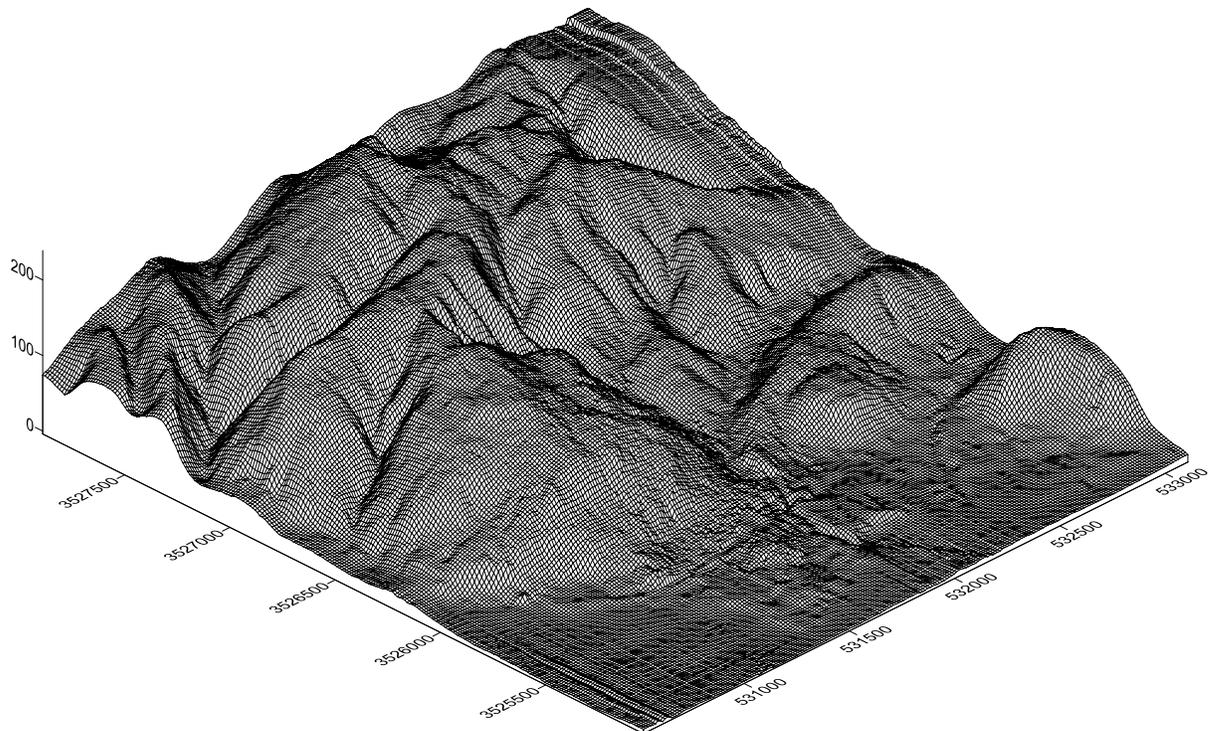


Figure 25. Malla regular con un espaciado de 11.45 m asignado para el año de 1973, con coordenadas UTM.

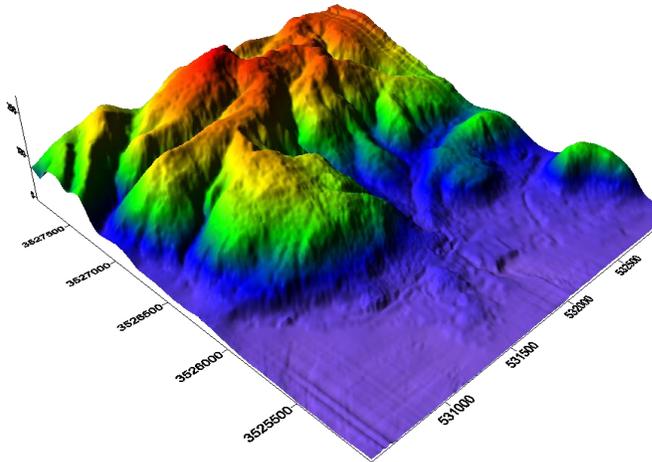


Figura 26. Modelo digital de elevación del año de 1973.

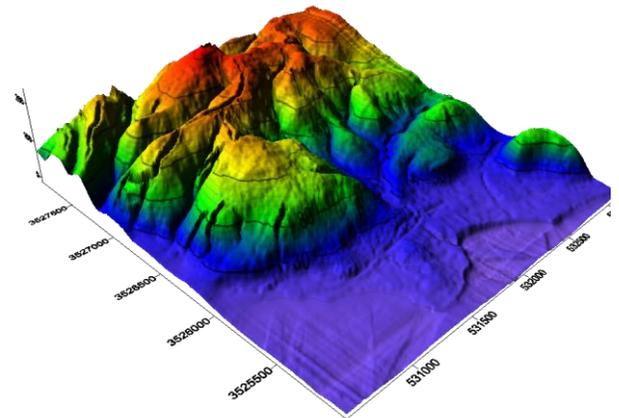


Figura 27. DEM de 1973 con curvas de nivel.

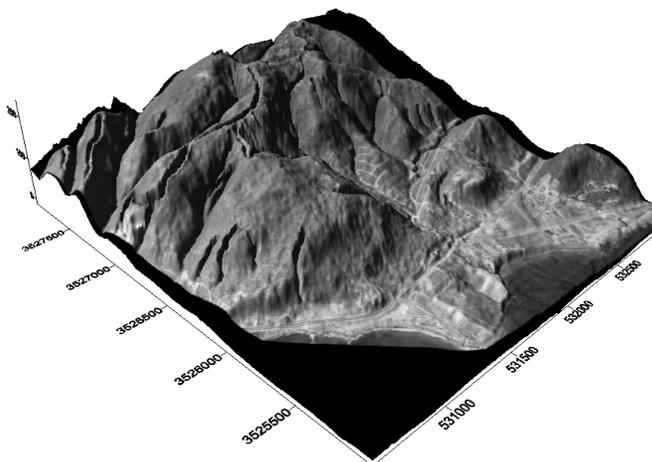


Figura 28. DEM de 1973 con su ortofoto sobrepuesta en coordenadas UTM.

4.1.2 Análisis del DEM de 1994

Los resultados para las fotografías obtenidas por el IMIP a blanco y negro fueron generadas a partir de una malla regular con un espaciado de 1.03 metros debido a que la densificación fue menor a un metro para toda la zona de trabajo. Esto se debe a que era un vuelo más bajo, por lo tanto la escala es más grande y tiene mayor resolución espacial, permitiendo densificar a una distancia entre puntos menor al metro.

En la figura 29, se representa el DEM de 1994 con muy buen detalle, esto debido a la saturación de puntos menor a un metro. La figura 30 muestra el DEM generado a partir de la malla regular, en la que se puede apreciar la calidad y la buena configuración que presenta el terreno. En cuanto a la figura 31, se observa una excelente calidad en la resolución de la ortofoto sobrepuesta en el DEM. En cuanto a la figura 32 se observa al DEM con curvas de nivel.

La figura 33, indica un área en específico (rectángulo rojo) que está representando por las figuras 34 y 35, en éstas se observa un acercamiento al DEM, donde fácilmente pueden apreciarse los trabajos ingenieriles (despalme y terracería) como cortes y terraplenes realizados para la construcción de estacionamientos y distintos departamentos del campus. En la figura 34 se observa detalladamente la separación entre celdas, haciendo que el DEM esté muy cerca de la configuración real del terreno. Mientras que en la figura 35 se observa el gran detalle que tiene el relieve.

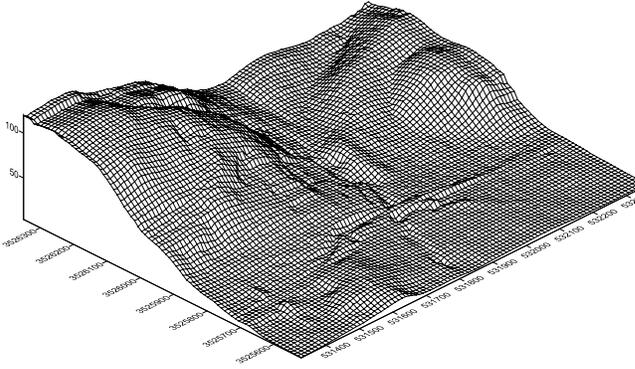


Figura 29. Malla regular con un espaciado de 1 m que representa los pares fotográficos de 1994.

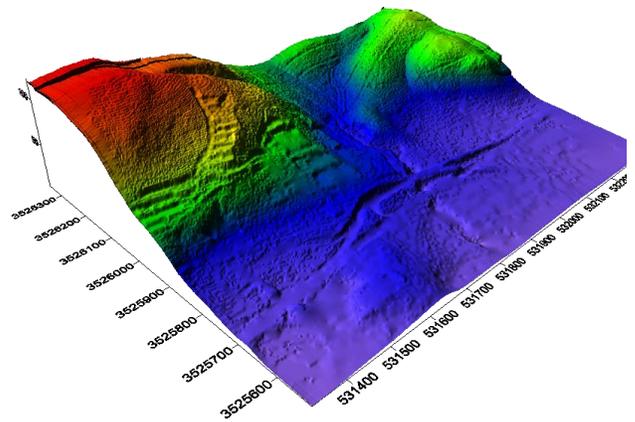


Figura 30. Modelo digital del terreno del año 1994.

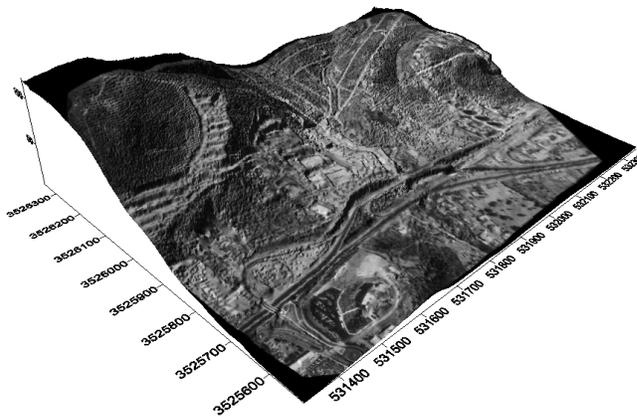


Figura 31. DEM de 1994 con su ortofoto sobrepuesta.

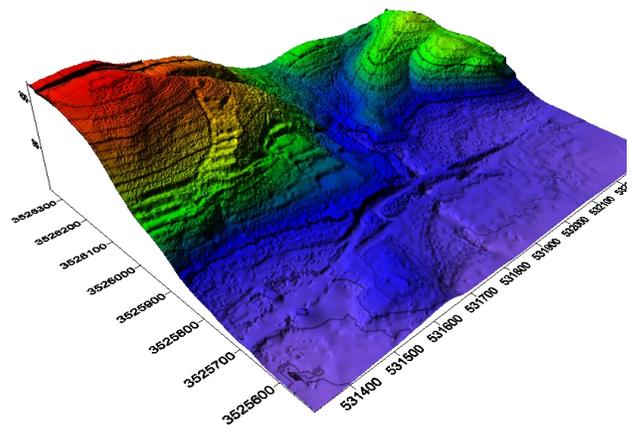


Figura 32. DEM de 1994 con curvas de nivel.

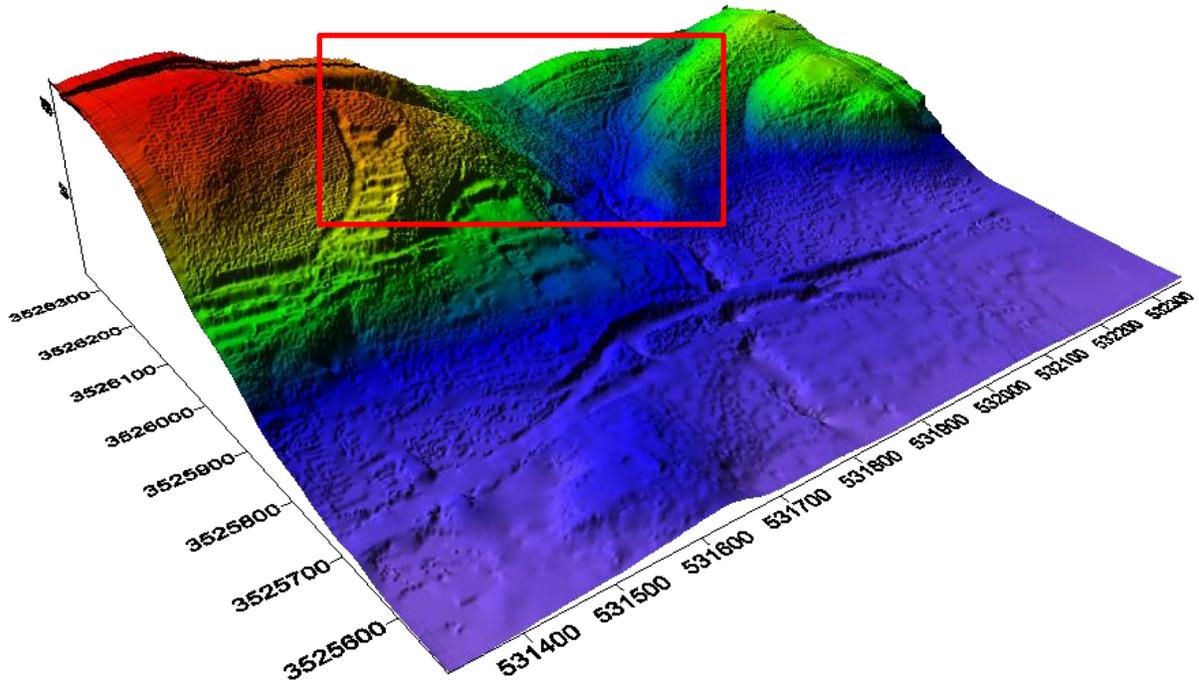


Figura 33. DEM de 1994 generado a partir de una malla regular con un espaciado de un metro aproximadamente.

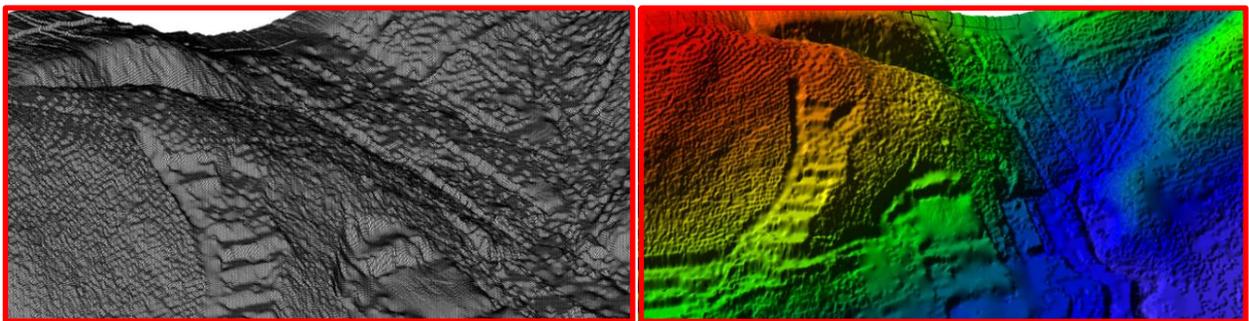


Figura 34. Malla regular con separación entre celdas de **Figura 35**. Acercamiento del DEM de 1994. aproximadamente un metro.

4.1.3 Análisis del DEM de 2010

Este análisis se enfoca a la parte más alta del campus, cubriendo la mayor parte de lo que se propone para una reserva de conservación. Son las fotos con mayor resolución, debido a la altura de vuelo bajo que fue de 480 metros aproximadamente. La escala nominal fue de 1:30,000 permitiendo así, que los productos resultantes de las FAFP tengan una malla con un espaciado de 2.8 metros (figura 36) y su densificación entre puntos sea de 2 metros aproximadamente. No se alcanzó una mayor densificación debido a los parámetros intrínsecos de la cámara, que no cumplen con la exigencia en resección e intersección que establece la estación fotogramétrica digital. En la figura 37 se muestra el DEM generado a partir de la malla antes descrita, en la figura 38 se observa el DEM con curvas de nivel mientras que en la figura 39 se representa el DEM con su ortofoto sobrepuesta.

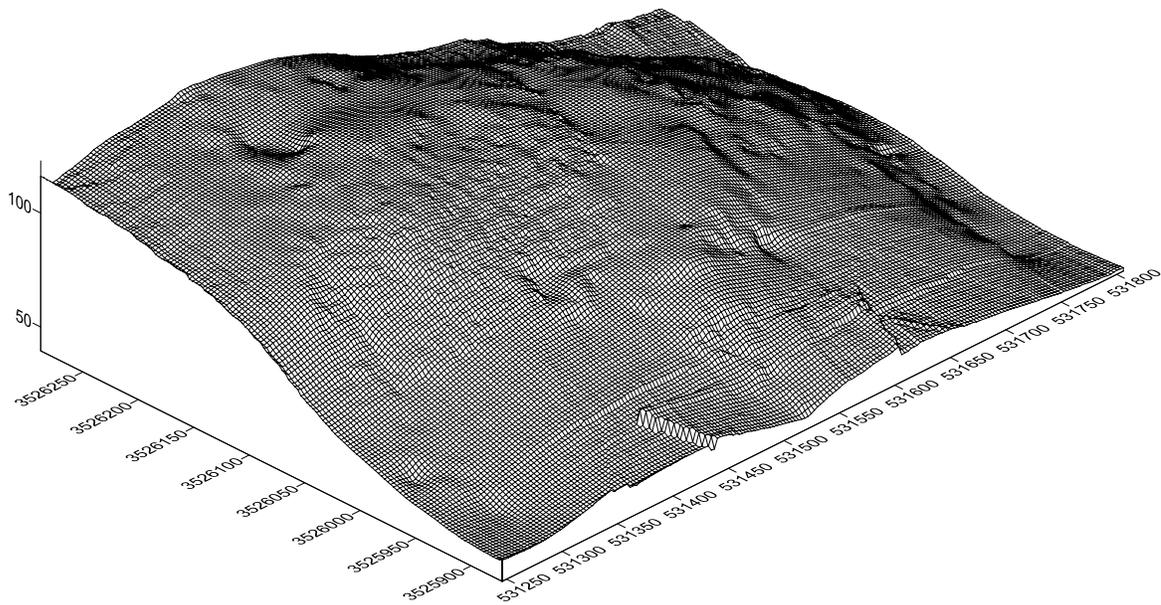


Figura 36. Malla regular con un espaciado de 2.8 m que representa los pares fotográficos de 2010.

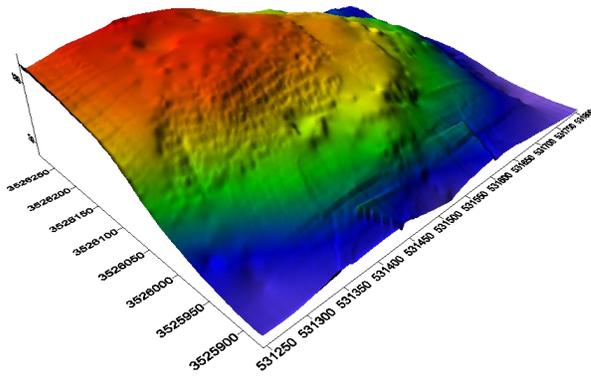


Figura 37. Modelo digital del terreno del año 2010.

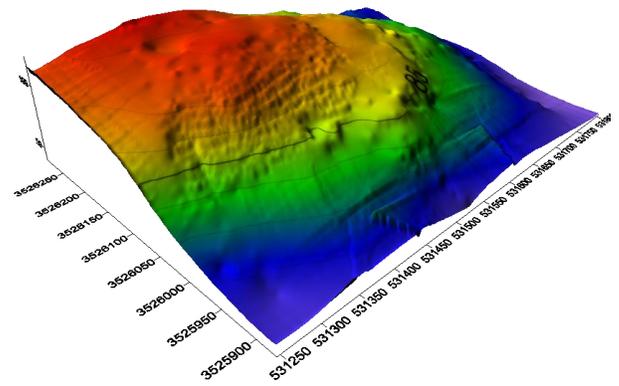


Figura 38. DEM de 2010 con curvas de nivel.

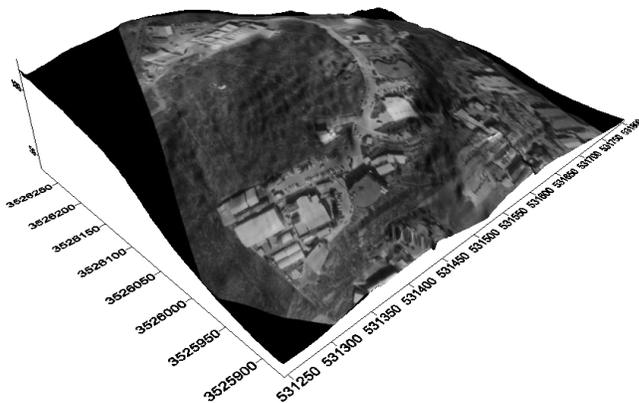


Figura 39. DEM de 2010 con su ortofoto sobrepuesta.

4.2 Validación de resultados

La validación utilizada para el análisis de estos DEMs está basado en los estándares de la ASPRS, quienes en marzo de 2015 publicaron los estándares de precisión (ASPRS, 2015). De los estándares establecidos se evalúan los datos digitales geoespaciales altimétricos y planimétricos (DEMs y ortofotos) como se muestran en las tablas 8 y 9. Los estándares para datos digitales de elevación (verticales) se dividen en 3 grupos y se establecen clases de precisión en base al umbral del error como se indica en la tabla 8. Mientras que en la tabla 9 se observan los estándares para datos digitales planimétricos.

Tabla 8. Estándar de precisión vertical para datos geoespaciales establecidos por la ASPRS.

Clase de precisión vertical	Precisión absoluta		
	RMSEz Sin vegetación (cm)	SV al 95% de nivel de confianza (cm)	SV en el percentil 95 (cm)
X - cm	$\leq X$	$\leq 1.96 * X$	$\leq 3.00 * X$

Tabla 9. Estándar de precisión horizontal para datos geoespaciales establecidos por la ASPRS.

Clase de precisión horizontal	Precisión absoluta			Mosaico de ortoimagen con líneas de desajuste
	RMSEx y RMSEy (cm)	RMSEr (cm)	Precisión horizontal al 95% de nivel de confianza (cm)	
X - cm	$\leq X$	$\leq 1.414 * X$	$\leq 2.448 * X$	$\leq 2.00 * X$

4.2.1 Validación de resultados para el DEM de referencia 2006

Con base en los estándares anteriores se hizo una validación al DEM y ortofoto de 2006 evaluando sus umbrales de error, determinados por la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Con estos errores se clasifican los productos de tal manera que se les asigna un grado de incertidumbre a cada uno de ellos.

Ubicando el sitio de prueba sobre el DEM de 2006 y con la ayuda del acervo de puntos levantados con GPS (cédulas) se identificaron y eligieron los checkpoints que mejor distribución y densificación tenían respecto al área del campus, en la figura 40 se muestra la distribución de los checkpoints ubicados sobre rasgos fisiográficos que se utilizaron para extraer las alturas del DEM.

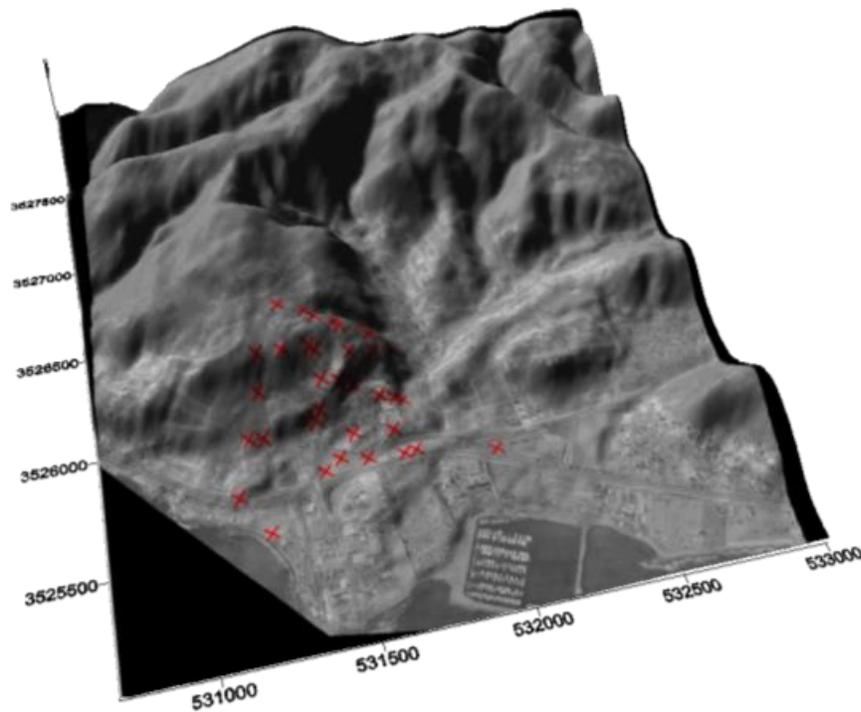


Figura 40. Distribución de los checkpoints verticales utilizados para la evaluación y validación del DEM del año 2006.

Una vez identificados los checkpoints sobre el DEM, se extrajo la elevación interpolada y la diferencia de alturas respecto al punto medido con el GPS es una discrepancia (d). Se sumaron todas las discrepancias, se elevaron al cuadrado (D^2), y se dividieron entre el número total de checkpoints utilizados (n). Con base en lo anterior se obtuvo la raíz. El RMSE resultante nos indica la clase y la precisión alcanzada para el DEM.

$$RMSE_z = \sqrt{D^2/n} \quad (2)$$

En la tabla 10 se observan las coordenadas, elevación, interpolación, discrepancias y el RMSE resultante de la validación, todos los datos están en metros. En las columnas *estes* y *nortes* se encuentran las coordenadas UTM de las puntos de verificación, la columna *elevación* es la altura de los anteriores. La columna *interpolación*, muestra las alturas de los puntos ubicados sobre el DEM. La *discrepancia* es la diferencia entre la elevación e interpolación. La columna siguiente es el cuadrado de la discrepancia y consecutivamente la columna siguiente es la división del valor resultante con el número de puntos usados. Finalmente la columna *RMSE* muestra el valor resultante en metros.

Tabla 10. Evaluación del RMSE vertical en el DEM de 2006.

Punto (n)	Estes (m)	Nortes (m)	Elevación (m)	Elevación DEM	Discrepancia (d)	D ²	D ² /36	RMSE (m)
3 (2015)	531604.168	3526187.26	103.06	101.022	2.04	4.169	5.50	2.40
4 (2015)	531725.636	3526190.23	79.56	79.029	0.53	0.285		
5 (2015)	531710.716	3526105.37	76.96	77.683	-0.72	0.520		
6 (2015)	531563.213	3526004.84	72.99	73.303	-0.31	0.098		
7 (2015)	531483.419	3526124.32	101.47	99.874	1.59	2.542		
8 (2015)	531297.083	3526121.75	105.16	103.254	1.90	3.622		
11 (2015)	531479.123	3525931.01	54.08	51.276	2.80	7.847		
12 (2015)	531700.394	3525960.97	47.29	44.828	2.46	6.074		
13 (2015)	531579.254	3525842.36	33.01	29.024	3.98	15.914		
14 (2015)	531720.286	3525824.8	32.97	30.979	1.99	3.963		
16 (2015)	531456.039	3525733.16	18.28	14.747	3.53	12.529		
17 (2015)	531609.439	3525742.06	22.29	20.710	1.58	2.497		
18 (2015)	531777.946	3525741.8	23.89	20.491	3.40	11.570		
24 (2010)	531750.036	3525945.59	45.08	41.002	4.08	16.670		
1 (2010)	531403.369	3526285.79	127.96	124.706	3.25	10.598		
2 (2010)	531492.553	3526253.04	119.36	116.779	2.58	6.679		
3 (2010)	531523.975	3526230.18	115.63	113.808	1.82	3.336		
4 (2010)	531595.335	3526216.16	105.35	102.518	2.82	8.005		
5 (2010)	531690.415	3526214.16	85.29	85.809	-0.52	0.270		
6 (2010)	531709.752	3526173.31	82.39	82.136	0.25	0.063		
7 (2010)	531792.59	3526134.68	57.72	58.460	-0.73	0.540		
8 (2010)	531217.294	3525890.68	39.08	37.525	1.55	2.409		
9 (2010)	531270.604	3525885.8	36.32	35.883	0.43	0.188		
10 (2010)	531153.27	3525698.99	14.67	11.171	3.49	12.218		
11 (2010)	531235.308	3525544.13	7.92	4.810	3.11	9.684		
12 (2010)	531279.094	3526029.44	68.79	67.510	1.28	1.658		
13 (2010)	531459.651	3525913.31	41.38	39.524	1.85	3.446		
15 (2010)	531504.6	3526020.08	76.27	71.968	4.30	18.541		
16 (2010)	531499.651	3526109.8	96.51	94.633	1.87	3.520		
17 (2010)	531622.419	3526096.68	88.90	86.436	2.46	6.060		
18 (2010)	531618.344	3526002.25	62.40	62.776	-0.37	0.138		
19 (2010)	531385.683	3526115.53	109.45	107.036	2.41	5.843		
20 (2010)	531780.851	3525945.01	34.38	35.135	-0.75	0.567		
21 (2010)	531516.837	3525768.11	22.48	19.952	2.53	6.423		
22 (2010)	531735.733	3525734.89	22.82	20.741	2.08	4.3487		
23 (2010)	532055.032	3525693.07	15.27	12.984	2.28	5.214		
						198.05		

El resultado de la tabla 10 nos indica que el umbral de error 2.4 metros se puede clasificar entre la posición 9 y 10 ubicado en la tabla 11, ya que el error límite permitido para posicionarse en este es de 333.3 cm. Sí se le quiere dar un 95% de confianza será necesario multiplicarse el RMSE por el factor 3 indicado en la tabla 8. Es decir el RMSE de 2.4 multiplicado por 3 arroja un nivel de confianza de 720 cm para el DEM a validar, esto establece los intervalos que se pueden tener entre curvas de nivel.

En cuanto a la precisión horizontal la manera de evaluarse será similar a la metodología usada para datos verticales, solo que se tomaron las direcciones “x” y “y” (tabla 9). Se identificaran las marcas sobre la ortofoto y apoyándose de los checkpoints se encontró la diferencia que existe en planimetría. Esa discrepancia se elevó al cuadrado y se dividió entre el número total de checkpoints analizados, posteriormente se sacó la raíz y se obtuvo el RMSE.

En la figura 41 se muestran los checkpoints horizontales utilizados para evaluar la ortofoto de 2006, mientras que en la tabla 12 se representa el cálculo y valor de RMSE para la ortofoto de 2006.

Tabla 11. Ejemplos de clases de acuerdo al estándar de precisión vertical para datos geospaciales de la ASPRS.

Clase de precisión vertical	Precisión absoluta		
	RMSEz Sin vegetación (cm)	SV al 95% de nivel de confianza (cm)	SV en el percentil 95 (cm)
1 - cm	1	2	3
2.5 - cm	2.5	4.9	7.5
5 - cm	5	9.8	15
10 - cm	10	19.6	30
15 - cm	15	29.4	45
20 - cm	20	39.2	60
33.3 - cm	33.3	65.3	100
66.7 - cm	66.7	130.7	200
100 - cm	100	196	300
333.3 - cm	333.3	653.3	1000

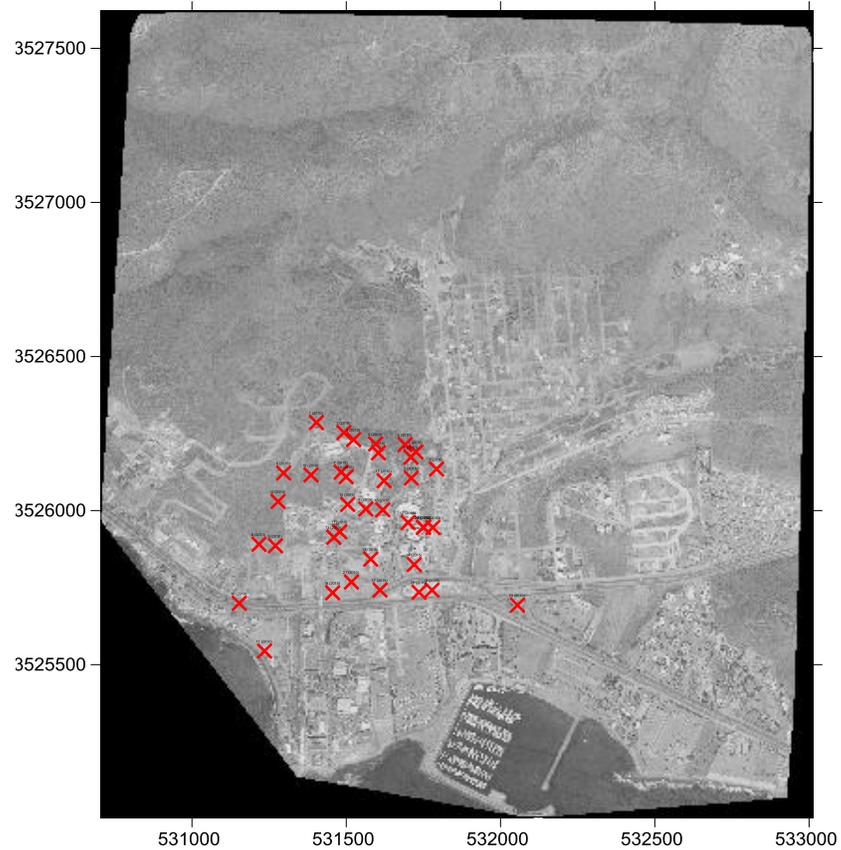


Figura 41. Distribución de los checkpoints horizontales para la ortofoto de 2006.

Tabla 12. RMSE obtenido de la ortofoto de 2006, (todas las unidades están en metros).

Punto (n)	X, (Checkpoints)	Y, (Checkpoints)	X, (Ortofoto)	Y, (Ortofoto)	Discrepancias		RMSE = $\sqrt{(x^2+y^2)}/n$
No. 1 (2015)	531397.851	3526267.45	531396.907	3526267.193	0.944	0.257	RMSE _x = 0.709
No. 2 (2015)	531506.406	3526194.898	531505.286	3526195.256	1.12	-0.358	RMSE _y = 0.688
No. 12 (2015)	531700.394	3525960.965	531700.179	3525961.385	0.215	-0.42	RMSE_r = $\sqrt{(x^2+y^2)}$
No. 6 (2015)	531563.213	3526004.843	531562.962	3526004.483	0.251	0.36	RMSE _r = 0.98
No. 11 (2015)	531479.123	3525931.007	531479.3	3525929.695	-0.177	1.312	
No. 13 (2015)	531579.254	3525842.361	531578.522	3525842.283	0.732	0.078	
No. 14 (2015)	531720.286	3525824.802	531720.38	3525824.955	-0.094	-0.153	
No. 16 (2015)	531456.039	3525733.156	531455.802	3525733.131	0.237	0.025	
No. 18 (2015)	531777.946	3525741.797	531777.7	3525740.869	0.246	0.928	
No. 13 (2010)	531459.651	3525913.309	531459.55	3525911.917	0.101	1.392	
No. 18 (2010)	531618.344	3526002.25	531618.354	3526002.779	-0.01	-0.529	
No. 15 (2010)	531504.6	3526020.084	531504.494	3526021.087	0.106	-1.003	
No. 24 (2010)	531750.036	3525945.585	531751.704	3525946.318	-1.668	-0.733	
No. 19 (2010)	531385.683	3526115.525	531384.654	3526116	1.029	-0.475	
No. 17 (2010)	531622.419	3526096.676	531621.566	3526096.72	0.853	-0.044	
					3.885	0.637	

El RMSEr horizontal calculado para la ortofoto de 2006 es de 98 cm, este resultado puede posicionarse entre las clases 60 y 75 cm indicados en amarillo en la tabla 13.

Tabla 13. Clasificación de las ortofotos de acuerdo a su umbral de RMSE.

Clase de precisión horizontal RMSE _x y RMSE _y (cm)	RMSE _r (cm)	Precisión horizontal al 95% de nivel de confianza (cm)	Tamaño de píxel aproximado de la imagen fuente (cm)
0.63	0.9	1.5	0.31 a 0.63
1.25	1.8	3.1	0.63 a 1.25
2.5	3.5	6.1	1.25 a 2.5
5	7.1	12.2	2.5 a 5
7.5	10.6	18.4	3.8 a 7.5
10	14.1	24.5	5 a 10
12.5	17.7	30.6	6.3 a 12.5
15	21.2	36.7	7.5 a 15
17.5	24.7	42.8	8.8 a 17.5
20	28.3	49	10 a 20
22.5	31.8	55.1	11.3 a 22.5
25	35.4	61.2	12.5 a 25
27.5	38.9	67.3	13.8 a 27.5
30	42.4	73.4	15 a 30
45	63.6	110.1	22.5 a 45
60	84.9	146.9	30 a 60
75	106.1	183.6	37.5 a 75
100	141.4	244.8	50 a 100
150	212.1	367.2	75 a 150
200	282.8	489.5	100 a 200
250	353.6	611.9	125 a 250
300	424.3	734.3	150 a 300
500	707.1	1223.9	250 a 500
1000	1414.2	2447.7	500 a 1000

4.2.2 Validación de resultados para el DEM de 1973

De los levantamientos realizados con GPS (cédulas) y tomando la misma secuencia realizada para la evaluación del anterior DEM de referencia, se eligieron los checkpoints que estuvieran distribuidos por toda el área del Campus (en su mayoría). En la figura 42 se muestra la distribución espacial de los checkpoints para los pares históricos de 1973, cada uno de ellos se ubicaron sobre rasgos fisiográficos o marcas sobresalientes en el terreno y que fueran identificables en este par.

Una vez identificados los checkpoints se les extrajo la elevación y la diferencia de alturas en cada uno de esos puntos fue una discrepancia, se sumaron todas las discrepancias, se elevaron al cuadrado y se dividieron entre el número de checkpoints utilizados, para obtener el valor RMSE (tabla 14).

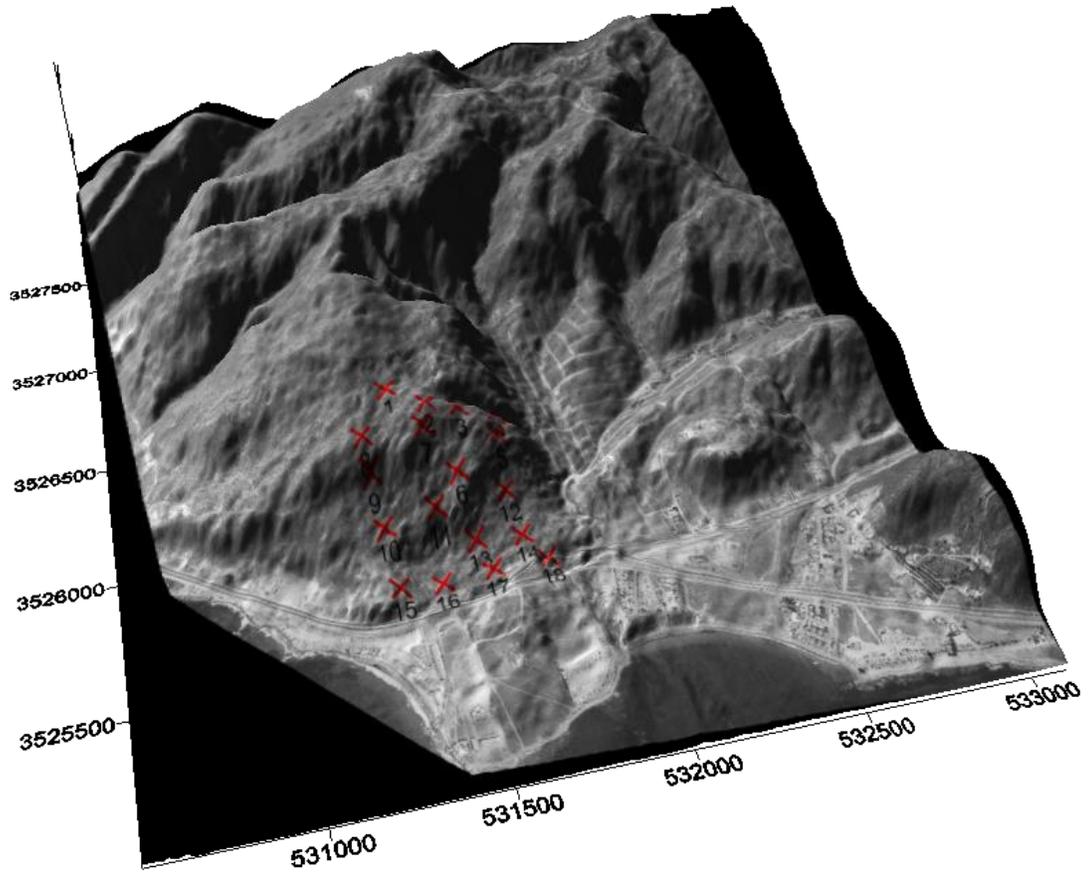


Figura 42. Distribución de los checkpoints para el DEM de 1973.

Tabla 14. Extracción de las alturas de checkpoints en el DEM de 1973 (unidades en metros).

Punto (n)	Estes (m)	Nortes (m)	Elevación (m)	Elevación DEM	Discrepancia (d)	D ²	D ² /17	RMSE (m)
4 (2015)	531725.636	3526190.228	79.56	84.69	-5.133	26.349	18.363	4.28
5 (2015)	531710.716	3526105.371	76.96	83.50	-6.538	42.747		
6 (2015)	531563.213	3526004.843	72.98	74.86	-1.879	3.532		
7 (2015)	531483.419	3526124.318	101.46	104.61	-3.143	9.879		
8 (2015)	531297.083	3526121.75	105.15	107.66	-2.502	6.260		
16 (2015)	531456.039	3525733.156	18.28	14.68	3.602	12.978		
17 (2015)	531609.439	3525742.061	22.29	17.83	4.459	19.884		
1 (2010)	531403.369	3526285.79	127.96	123.27	4.682	21.927		
2 (2010)	531492.553	3526253.039	119.36	119.05	0.305	0.093		
3 (2010)	531523.975	3526230.177	115.63	116.40	-0.769	0.592		
4 (2010)	531595.335	3526216.163	105.34	105.93	-0.590	0.348		
5 (2010)	531690.415	3526214.163	85.28	83.49	1.794	3.218		
6 (2010)	531709.752	3526173.314	82.38	87.95	-5.569	31.017		
13 (2010)	531459.651	3525913.309	41.38	51.15	-9.774	95.533		
20 (2010)	531780.851	3525945.006	34.38	38.97	-4.589	21.065		
21 (2010)	531516.837	3525768.106	22.48	20.04	2.437	5.938		
23 (2010)	532055.032	3525693.067	15.26	11.97	3.288	10.811		
						312.182		

El RMSE obtenido para el DEM de 1973 es de 4.28 m (428 cm) de acuerdo a la tabla 11 y con el resultado en la tabla 14, podemos posicionarlo y asignarle una clasificación.

El resultado de este umbral nos indica que no es posible clasificarlo en la posición 10, pues el error límite permitido para entrar es de 333.3 cm. Aun así podemos darle un 95% de nivel de confianza multiplicándolo por el factor de 3 indicado en la tabla 8. Esto nos da un valor de 12.84 m y también nos establece el grado de confianza que deben de tener los intervalos de curvas de nivel en los DEMs y mapas que se deriven de este modelo. Esta resolución comparada con la dimensión del DEM y la vegetación existente en el área es suficiente para aplicaciones de mapeo.

Los checkpoints horizontales que evaluaron a las ortofotos de 1973 se observan en la figura 43, de estos se obtuvieron discrepancias en el plano horizontal, estas diferencias se muestran en la tabla 15.

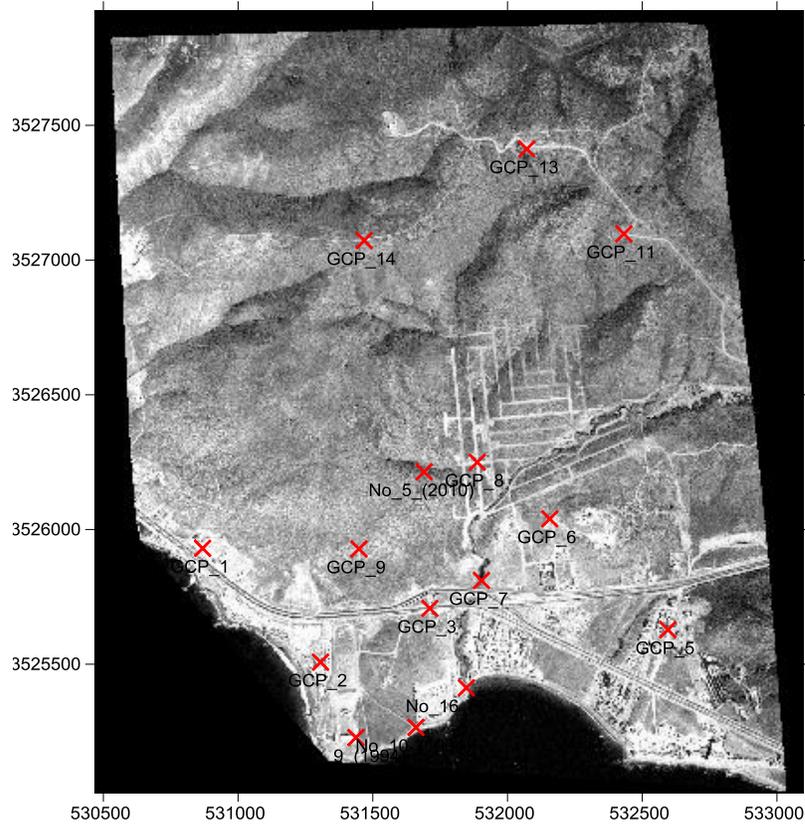


Figura 43. Checkpoints horizontales en la ortofoto de 1973.

Tabla 15. RMSE resultante para la ortofoto de 1973 (unidades en metros).

Punto (n)	X, (Checkpoints)	Y, (Checkpoints)	X, (Ortofoto)	Y, (Ortofoto)	Discrepancias		RMSE = $\sqrt{(x^2+y^2)/n}$
GCP_1	530868.304	3525930.167	530864.474	3525927.842	3.83	2.325	RMSE _x = 2.06
GCP_2	531306.052	3525507.542	531306.881	3525504.19	-0.829	3.352	RMSE _y = 2.27
GCP_3	531711.583	3525707.151	531711.544	3525706.456	0.039	0.695	RMSE _r = $\sqrt{(x^2+y^2)}$
GCP_5	532595.295	3525627.893	532597.28	3525628.92	-1.985	-1.027	
GCP_6	532156.704	3526039.538	532160.336	3526039.647	-3.632	-0.109	
GCP_7	531903.356	3525810.741	531905.599	3525808.185	-2.243	2.556	
GCP_8	531887.731	3526249.559	531887.134	3526249.538	0.597	0.021	
GCP_9	531448.743	3525927.769	531448.149	3525927.396	0.594	0.373	
GCP_11	532431.918	3527097.301	532431.839	3527099.164	0.079	-1.863	
GCP_13	532071.704	3527412.345	532071.195	3527415.519	0.509	-3.174	
GCP_14	531468.048	3527072.337	531464.079	3527072.419	3.969	-0.082	
No_9 (1994)	531437.412	3525227.659	531435.628	3525225.337	1.784	2.322	
No_10 (1994)	531660.214	3525265.43	531662.592	3525268.31	-2.378	-2.88	
No_16 (1994)	531847.094	3525412.47	531847.624	3525416.469	-0.53	-3.999	
No_5 (2010)	531690.415	3526214.163	531690.679	3526211.082	-0.264	3.081	
					-0.46	1.591	

El RMSEr para la horizontal es de 307 cm, con esto se puede clasificar la precisión de la ortofoto en la clase de 307 cm indicada en color rojo entre las clases 282.8 y 353.6 de la tabla 13 descrita anteriormente. Para darle un nivel de confianza del 95% se multiplica por el factor 2.448 indicado en la tabla 9.

4.2.3 Validación de resultados para el DEM de 1994

Para la validación del DEM de 1994 (fotografías obtenidas por IMIP) los checkpoints verticales utilizados se muestran en la figura 44. Mientras que el cálculo y resultado de su RMSE se muestra en la tabla 16.

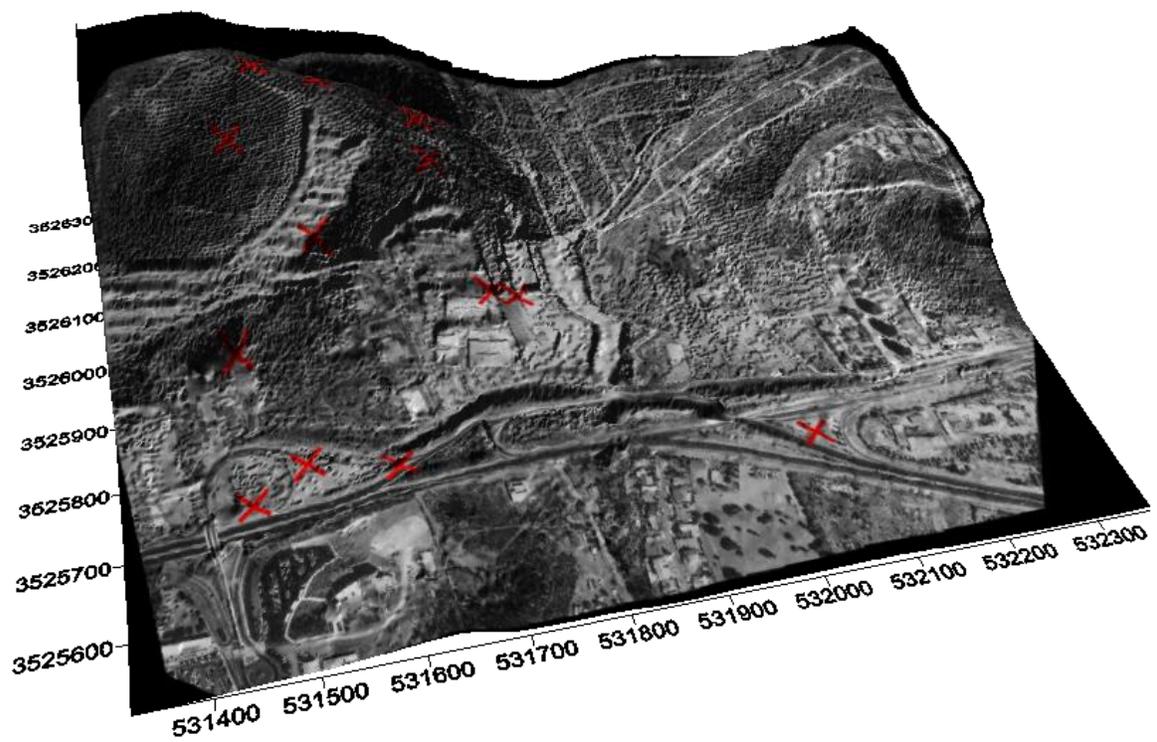


Figura 44. Checkpoints verticales utilizados para las fotografías de 1994.

Tabla 16. RMSE vertical para el año de 1994.

Punto (n)	Estes (m)	Nortes (m)	Elevación	Elevación DEM	Discrepancia	D ²	D ² /17	RMSE
4 (2015)	531725.636	3526190.23	79.564	78.12	1.43	2.06	9.57	3.09
5 (2015)	531710.716	3526105.37	76.962	77.02	-0.06	0.004		
6 (2015)	531563.213	3526004.84	72.989	71.05	1.93	3.73		
7 (2015)	531483.419	3526124.32	101.469	100.00	1.46	2.13		
16 (2015)	531456.039	3525733.16	18.287	12.66	5.62	31.63		
17 (2015)	531609.439	3525742.06	22.291	19.37	2.91	8.47		
24 (2010)	531750.036	3525945.59	45.085	41.04	4.04	16.35		
3 (2010)	531523.975	3526230.18	115.635	113.73	1.89	3.60		
4 (2010)	531595.335	3526216.16	105.348	102.62	2.72	7.41		
5 (2010)	531690.415	3526214.16	85.289	79.47	5.81	33.8		
6 (2010)	531709.752	3526173.31	82.388	82.05	0.32	0.108		
13 (2010)	531459.651	3525913.31	41.381	37.41	3.96	15.69		
20 (2010)	531780.851	3525945.01	34.382	32.68	1.70	2.89		
21 (2010)	531516.837	3525768.11	22.487	17.03	5.45	29.71		
23 (2010)	532055.032	3525693.07	15.268	13.00	2.26	5.13		
						162.76		

El resultado de este umbral fue de 309.4 cm, lo cual indica que es posible clasificarlo en la posición 10, ya que el error límite permitido para entrar es de 333.3 cm. Aun así se puede dar un 95% de nivel de confianza. Esto nos da un valor de 9.28 m y también establece el grado de confianza que deben de tener los intervalos entre curvas de nivel de los DEMs y mapas que se deriven de este modelo. Es decir, se pueden tener contornos con intervalos a 10 metros asegurando la precisión para el mapeo. Esta resolución comparada con la dimensión del DEM y la vegetación existente en el área es adecuada para aplicaciones de mapeo.

En la figura 45 se muestran los checkpoints horizontales utilizados para obtener el RMSE planimétrico. El RMSEr para la horizontal es de 322 cm (tabla 17), con esto se puede clasificar la precisión de la ortofoto en la clase de 322 cm indicada en la tabla 13 con color rojo.

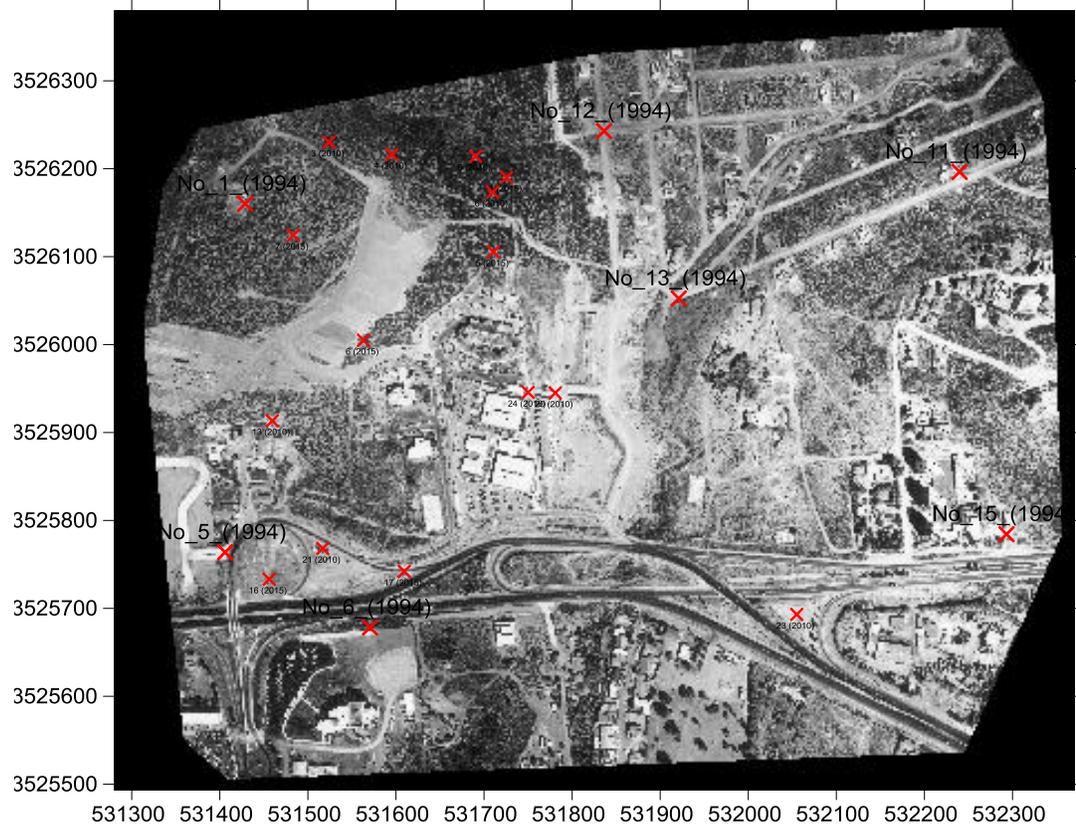


Figura 45. Checkpoints horizontales para la evaluación del RMSE.

Tabla 17. RMSE para datos planimétricos de 1994.

Punto (n)	X, (Checkpoints)	Y, (Checkpoints)	X, (Ortofoto)	Y, (Ortofoto)	Discrepancias		RMSE = $\sqrt{(x^2+y^2)/n}$
No. 1 (1994)	531428.823	3526160.118	531428.076	3526161.44	0.747	-1.322	RMSE _x = 1.12
No. 5 (1994)	531405.961	3525763.733	531406.045	3525764.155	-0.084	-0.422	RMSE _y = 3.03
No. 6 (1994)	531570.568	3525678.271	531570.609	3525676.8	-0.041	1.471	RMSE _r = $\sqrt{(x^2+y^2)}$
No. 11 (1994)	532239.924	3526196.382	532241.668	3526190.518	-1.744	5.864	RMSE _r = 3.22
No. 13 (1994)	531921.064	3526052.461	531921.106	3526051.665	-0.042	0.796	
No. 12 (1994)	531836.372	3526242.831	531835.915	3526242.853	0.457	-0.022	
No. 15 (1994)	532293.155	3525784.351	532293.557	3525775.872	-0.402	8.479	
No. 13 (2010)	531459.651	3525913.309	531459.626	3525914.41	0.025	-1.101	
No. 18 (2010)	531618.344	3526002.25	531618.015	3526002.408	0.329	-0.158	
No. 5 (2010)	531690.415	3526214.163	531689.964	3526214.228	0.451	-0.065	
No. 12 (2015)	531700.394	3525960.965	531700.084	3525960.991	0.31	-0.026	
No. 24 (2010)	531750.036	3525945.585	531753.461	3525942.991	-3.425	2.594	
No. 14 (2015)	531720.286	3525824.802	531720.048	3525824.717	0.238	0.085	
					-3.181	16.173	

4.2.4 Validación de resultados para el DEM de 2010

Para la validación del DEM de 2010 se realizó una distribución de checkpoints (figura 46) para determinar el umbral del RMSE. El resultado de este umbral fue de 800 cm (tabla 18), lo cual indica que no puede clasificarse dentro de los estándares, pues el error límite que se obtiene es de 8 m. Y si además aplicamos el factor de 3 para tener el 95% de nivel de confianza, esto dará un valor de 24 m. Es decir se pueden mapear con curvas de nivel a cada 24 metros. La resolución de esta ortofoto es muy buena en comparación con el resto de las ortofotos. Fácilmente se pueden detectar detalles mínimos, esenciales para el mapeo a escala grande.

En la figura 47 se muestra la distribución de los checkpoints horizontales utilizados para evaluar el RMSE horizontal en el modelo de 2010. El RMSE para la horizontal es de 220 cm (tabla 19), con esto se puede clasificar la precisión de la ortofoto entre las clases 150 y 200 cm indicadas en la tabla 13 con color rojo. Para darle un nivel de confianza del 95% se multiplica por el factor 2.448 indicado en la tabla 9.

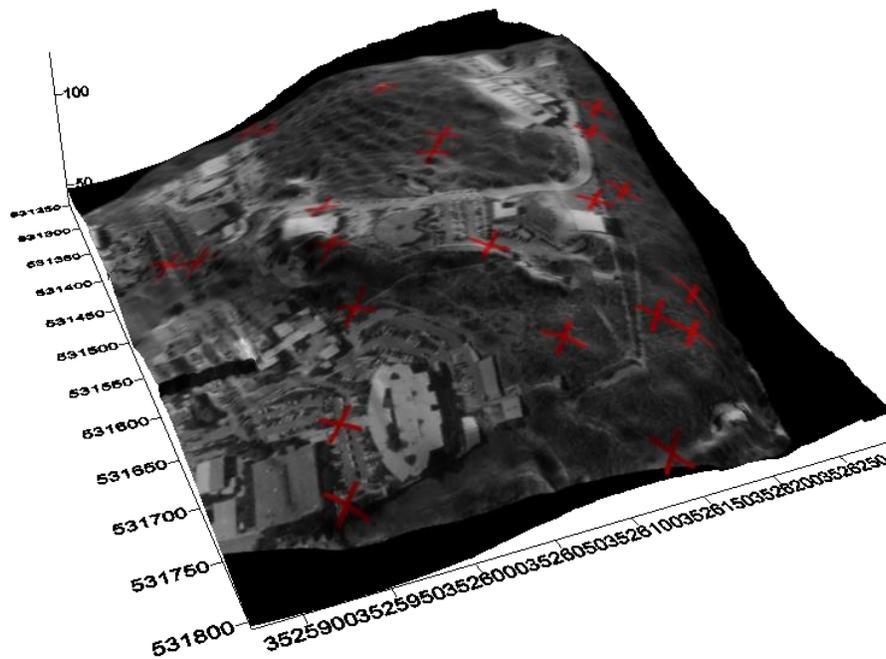


Figura 46. Distribución de checkpoints verticales para el DEM de 2010.

Tabla 18. RMSE vertical para el DEM de 2010.

Punto (n)	Estes (m)	Nortes (m)	Elevación	Elevación DEM	Discrepancia	D ²	D ² /20	RMSE		
3 (2015)	531604.168	3526187.26	103.06	99.35	3.71	13.79	63.90	8.0		
4 (2015)	531725.636	3526190.23	79.56	75.24	4.31	18.64				
5 (2015)	531710.716	3526105.37	76.96	80.52	-3.55	12.66				
7 (2015)	531483.419	3526124.32	101.46	107.99	-6.52	42.61				
9 (2015)	531303.726	3526041.34	73.17	79.06	-5.89	34.77				
11 (2015)	531479.123	3525931.01	54.07	65.93	-11.86	140.67				
12 (2015)	531700.394	3525960.97	47.29	61.74	-14.45	208.93				
2 (2010)	531492.553	3526253.04	119.36	111.44	7.92	62.74				
3 (2010)	531523.975	3526230.18	115.63	107.86	7.77	60.44				
4 (2010)	531595.335	3526216.16	105.34	98.30	7.04	49.56				
5 (2010)	531690.415	3526214.16	85.28	77.27	8.01	64.26				
6 (2010)	531709.752	3526173.31	82.38	80.44	1.94	3.78				
7 (2010)	531792.59	3526134.68	57.72	55.65	2.06	4.27				
12 (2010)	531279.094	3526029.44	68.79	73.27	-4.47	20.01				
15 (2010)	531504.6	3526020.08	76.27	89.08	-12.80	164.04				
16 (2010)	531499.651	3526109.8	96.51	105.06	-8.55	73.16				
17 (2010)	531622.419	3526096.68	88.89	94.27	-5.37	28.94				
18 (2010)	531618.344	3526002.25	62.40	78.02	-15.62	244.05				
19 (2010)	531385.683	3526115.53	109.45	111.54	-2.08	4.36				
24 (2010)	531750.036	3525945.59	45.08	50.21	-5.13	26.32				
									1278.08	

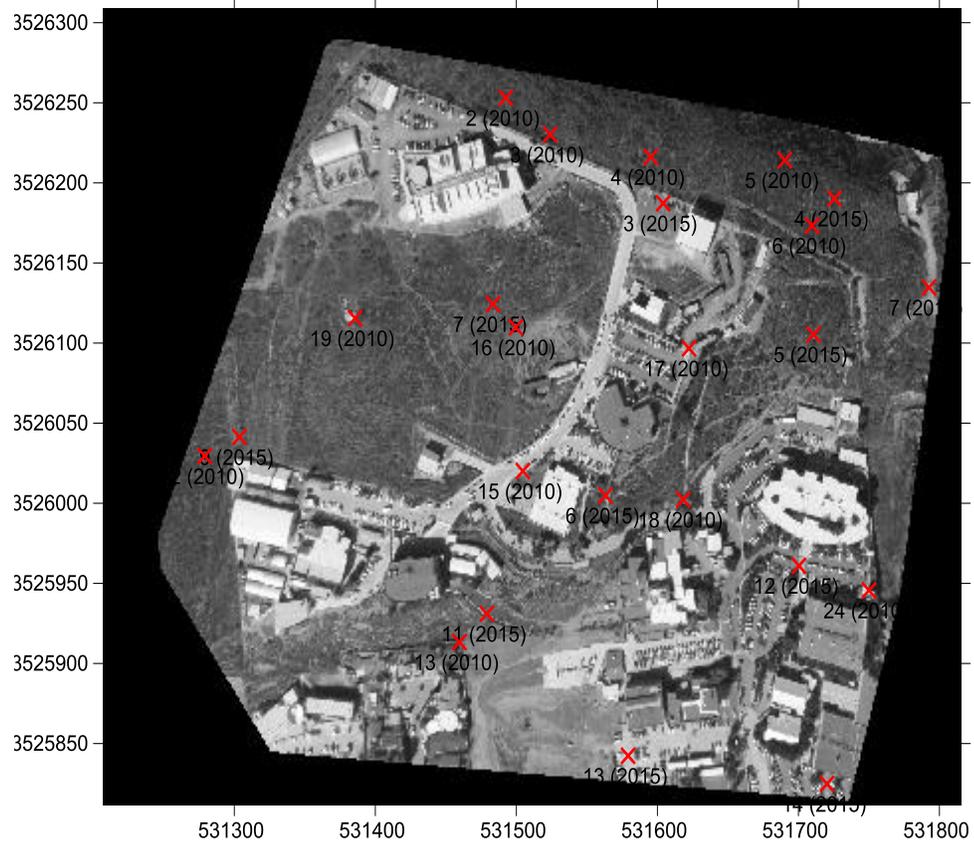


Figura 47. Distribución de los checkpoints horizontales en la ortofoto de 2010 (CICESE).

Tabla 19. RMSE horizontal para la ortofoto de 2010.

Punto (n)	X, (Checkpoints)	Y, (Checkpoints)	X, (Ortofoto)	Y, (Ortofoto)	Discrepancias		RMSE = $\sqrt{(x^2+y^2)}/n$
No. 1 (2015)	531397.851	3526267.45	531397.217	3526267.23	0.634	0.223	RMSE _x = 1.43
No. 2 (2015)	531506.406	3526194.9	531503.62	3526195.79	2.786	-0.896	RMSE _y = 1.66
No. 3 (2015)	531604.168	3526187.26	531604.144	3526187.28	0.024	-0.02	RMSE_r = $\sqrt{(x^2+y^2)}$
No. 12 (2015)	531700.394	3525960.97	531701.756	3525960.94	-1.362	0.022	RMSE _r = 2.20
No. 6 (2015)	531563.213	3526004.84	531564.551	3526003.72	-1.338	1.126	
No. 11 (2015)	531479.123	3525931.01	531479.092	3525929.98	0.031	1.03	
No. 13 (2015)	531579.254	3525842.36	531579.198	3525842.38	0.056	-0.023	
No. 14 (2015)	531720.286	3525824.8	531719.784	3525819.46	0.502	5.345	
No. 5 (2010)	531690.415	3526214.16	531692.61	3526213.21	-2.195	0.955	
No. 18 (2010)	531618.344	3526002.25	531619.993	3526002.15	-1.649	0.1	
No. 15 (2010)	531504.6	3526020.08	531507.377	3526020.73	-2.777	-0.649	
No. 24 (2010)	531750.036	3525945.59	531751.21	3525943.15	-1.174	2.437	
No. 13 (2010)	531459.651	3525913.31	531460.424	3525913.86	-0.773	-0.546	
No. 19 (2010)	531385.683	3526115.53	531384.627	3526116.01	1.056	-0.489	
No. 17 (2010)	531622.419	3526096.68	531621.764	3526095.25	0.655	1.424	
					-5.524	10.039	

4.2.5 Comparación de los valores obtenidos

En la tabla 20 se observa el resultado de cada uno de los productos validados. Se observa la precisión que tiene cada DEM y su respectiva ortofotos, así como también la clase a la que corresponden estos productos. La mejor precisión altimétrica es la del DEM generado a partir de fotografías de INEGI de 2006, mientras que para el DEM de CICESE es la menos precisa. Esto se debe a que la geometría de las fotografías no era tan buena como las de INEGI, haciendo que el sistema de intersección y resección interno de la estación fotogramétrica digital exija una geometría muy precisa. La precisión planimétrica para las fotografías de DETENAL es la mejor, mientras que las fotografías de IMIP alcanzan 1 metro de RMSE. Esto se atribuye a que la validación para 1973 consta de puntos de verificación muy escasos y para 1994 sus fotografías son a blanco y negro, restringiendo rasgos que puedan ser identificados sencillamente.

Tabla 20. Especificaciones de los valores obtenidos para cada uno de los resultados.

Modelos	DETENAL	IMIP	INEGI	CICESE
Escala	1:25,000	1:4,500	1:40,000	1:30,000
Resolución de píxel (Foto)	0.72 m	0.19 m	1.45 m	0.15 m
Resolución de píxel (Orto)	1.20 m	0.20 m	1.42 m	0.14 m
Cobertura (has)	577.14 has	70.94 has.	505.57 has.	20.60 has
Precisión en DEM (RMSE)	4.28 m	3.09 m	2.40 m	8.0 m
Precisión en ortofoto (RMSE)	0.27 m	1 m	0.55 m	0.55 m
Clase en el DEM	100 y 333.3 cm	333.3 cm	100 y 333.3 cm	No entra
Clase en la ortofoto	27.5 cm	100 cm	45 y 60 cm	45 y 60 cm

4.3 Análisis multitemporal

En base a las ortofotos resultantes y validadas anteriormente, se analiza la detección en el cambio y uso de suelo. En la figura 48 se observa una secuencia temporal de ortofotos sobre el campus de CICESE, en el inciso A se muestra la ortofoto resultante de las fotografías aéreas obtenidas mediante una cámara métrica, tomadas en el año de 1973 (DETENAL) que corresponden a una escala 1:25,000 y a color. El inciso B es la ortofoto resultado de las fotografías a blanco y negro tomadas por IMIP en el año de 1994, con un vuelo más bajo y con una escala correspondiente a 1:4,500. En el inciso C se observa el resultado de las fotografías a color adquiridas por INEGI en el año 2006 con un vuelo alto y a una escala de 1:40,000. Inciso D es el resultado de un vuelo bajo (840 m, snmm) mediante una cámara no métrica, donde las fotografías presentan color y una escala nominal de 1:30,000.



Figura 48. Secuencia temporal de ortofotos en el campus de CICESE, A) DETENAL (1973), B) IMIP (1994), C) INEGI (2006), D) CICESE (2010).

Cada una de las ortofotos cuenta con distinta resolución espacial (figura 49), la ortofoto generada a partir de las fotografías de formato pequeño adquiridas mediante una cámara EOS 500D (C) muestra mayor detalle, por lo tanto se pueden detectar características en el terreno con facilidad, en el caso de ortofotos A y B que son el resultado de fotografías aéreas de formato grande no se alcanza a observar el mismo detalle, pues la resolución es un poco más baja. Los productos tradicionales como los de INEGI y DETENAL son más bajos en resolución espacial pero cuentan con una mayor cobertura de terreno, los productos especiales como IMIP y CICESE, son limitados a esa área en específico contando con mayor

resolución en el resultado final. En la tabla 21 se muestran las especificaciones de cada una de las ortofotos resultantes.

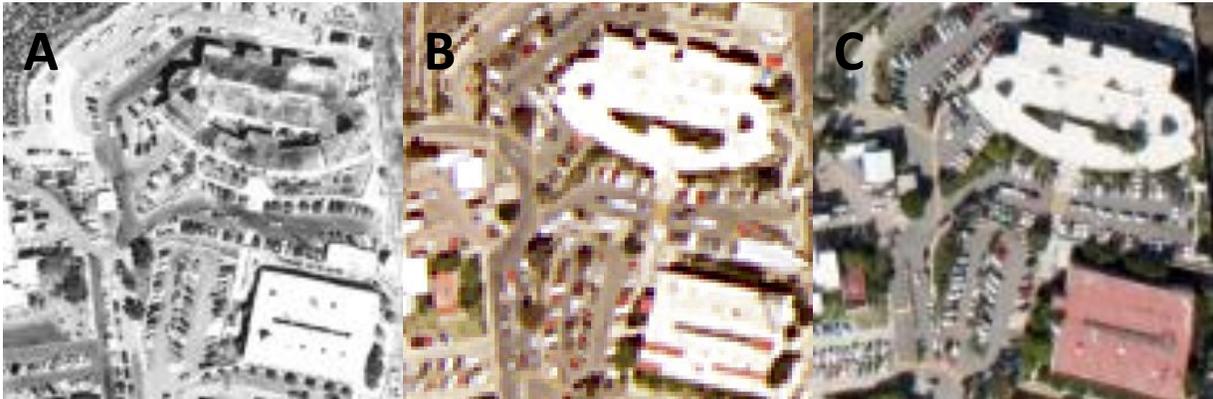


Figura 49. Resolución espacial y visualización de calidad en las ortofotos A) IMIP 1994, B) INEGI 2006, C) CICESE 2010.

Tabla 21. Especificaciones de las fotografías utilizadas y sus productos resultantes.

Modelos	DETENAL	IMIP	INEGI	CICESE
Escala	1:25,000	1:4,500	1:40,000	1:30,000
Resolución de píxel (Foto)	0.72 m.	0.19 m.	1.45 m.	0.15 m.
Resolución de píxel (Orto)	1.20 m.	0.17 m.	1.42 m.	0.14 m.
Cobertura (has)	577.14 has.	70.94 has.	505.57 has.	20.60 has.
Total de puntos vectorizados	39,536	88,425	21,900	3,514
Total de triángulos (TIN)	82,187	190,629	50,845	9,299
Método de interpolación	Kriging	Kriging	Kriging	Kriging

Analizando la secuencia temporal de la zona (figura 48), se trazó un perfil de interés para conocer el corte y terraplén total realizado sobre dicho trazo. Esto con el fin de dar una aplicación a la generación de curvas de nivel validadas y que pueden sustituir un levantamiento topográfico convencional utilizado en cualquier obra ingenieril civil.

Para calcular el volumen total (corte y terraplén) se utilizó una extensión de AutoCAD (descrito anteriormente). Se tomaron las curvas de 1973 y se les restó las curvas de nivel del año 2006, siendo la línea base en el proyecto. Posteriormente se obtuvieron las secciones tipo y longitudes de cada uno de los perfiles trazados a una distancia de 5 metros, cabe mencionar que en los levantamientos convencionales las estaciones se marcan a cada 20 metros debido a la poca saturación de puntos levantados en el terreno. En este caso podemos calcular de manera segura y precisa a cada 5 metros, pues las curvas de nivel son derivadas de productos con mayor densidad de puntos. Así se tendrá con certeza la estimación de esos volúmenes de tierra.

Una vez realizado el trazo del perfil longitudinal, secciones, estaciones y demás, se procede a calcular el volumen de terreno removido que se extiende 30 metros a la izquierda y derecha del perfil o eje principal del cálculo, como se representa en la figura 50 (línea roja). El cálculo de los volúmenes de tierra se representa en la figura 51, donde se grafica el perfil de 1973 en color amarillo restándose al perfil de 2006 en color rojo a lo largo de 60 metros por cada 5 metros. En la esquina inferior derecha se despliega el cálculo total para esa sección. El cálculo total será la sumatoria de cortes y terraplenes de cada uno de las secciones marcadas a cada 5 metros.



Figura 50. Trazo del eje principal del proyecto con estaciones marcadas a cada 5 metros y con secciones de 60 m, en la imagen izquierda se observa el perfil trazado sobre la ortofoto de 1973, mientras que en la derecha se tiene el mismo trazo sobre la ortofoto de 2006.

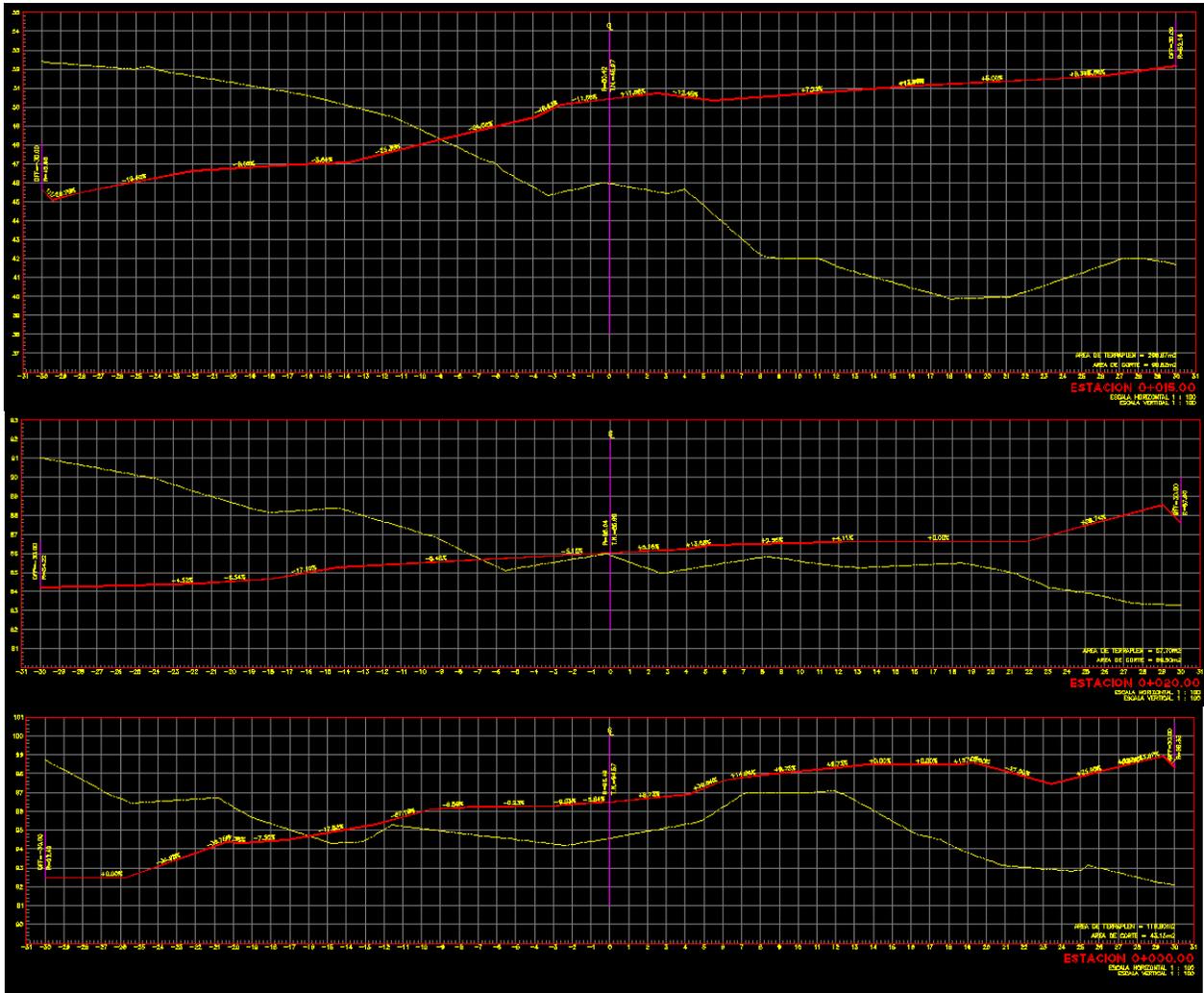


Figura 51. Perfiles representando el cálculo de volúmenes de tierra, en color amarillo se muestra el perfil trazado sobre la fecha de 1973, correspondiente a una sola sección indicada en la figura 50, en cuanto al perfil de color rojo se indica en la fecha de 2006, este perfil se ubica justo en lo que actualmente corresponde al estacionamiento del edificio administrativo del campus de CICESE.

El cálculo total de corte y terraplén sobre el eje trazado es de:

$$\text{Total de Corte} = 14,459.9 \text{ m}^3$$

$$\text{Total de Terraplén} = 31,771.92 \text{ m}^3$$

Capítulo 5 Discusión y conclusiones

5.1 Discusión

Las nuevas tecnologías como el GPS, LiDAR, Fotografía Aérea de Formato Pequeño (FAFP) y Fotografía Aérea de Formato Grande (FAFG) están revolucionando la manera de cartografiar a escala grande y mediana, y su uso se complementa con la revolución tecnológica para el procesamiento de datos, con el desarrollo de softwares que simplifican el flujo de trabajo fotogramétrico, para la producción de DEMs y ortofotos. Se realizó una restitución fotogramétrica multitemporal (distintas fechas), integrando y utilizando FAFG de 1973, 1994 y 2006 y FAFP de 2010. Demostrando que con la topografía convencional sería imposible poder realizar levantamientos para las fechas dadas anteriormente. También los productos de los trabajos convencionales llevan un proceso laborioso, pues para capturar un solo punto en el terreno se necesita la instalación del taquímetro electrónico, es decir, debe de estar centrado, con buena nivelación y una orientación, y mínimamente de una persona encargada de posicionarse sobre el punto a medir. Una vez que se toma y se guarda la lectura en el equipo, se prosigue a medir el siguiente punto, y así sucesivamente hasta lograr la cobertura del proyecto a configurar. En cuanto a los trabajos fotogramétricos, se puede densificar el terreno con los puntos que el usuario desee. Para lograr un levantamiento preciso y detallado es necesario recopilar la mayor cantidad de puntos medidos.

La validación de los resultados en este trabajo, permitió asignarles una clase de precisión a los productos digitales. En México, los estudios de validación en levantamientos convencionales y fotogramétricos son mínimos. Los productos validados en cada fecha fueron un DEM y una ortofoto. Para el DEM y ortofoto del año 2006, resultado de las fotografías adquiridas por INEGI se obtuvo que el DEM alcanzó un RMSE de 2.40 m, para su validación se utilizaron 36 checkpoints distribuidos en el sitio de prueba y alrededores. La cobertura del DEM es de alrededor de 580 hectáreas, lo cual nos indica que el valor de RMSE lo posiciona en la clase de 240 cm, y que podemos mapear curvas de nivel a cada 3 metros. En cuanto a su ortofoto, ésta alcanzó un RMSEr de 0.98 m, es decir en términos de pixel de la ortofoto, podemos utilizar un pixel para trabajos de precisión estándar. El uso recomendado es utilizar dos pixeles, con este RMSE se puede realizar un mapeo estándar y básicamente cualquier trabajo en sistemas de información geográfica (SIG).

El DEM y ortofoto de 1973, fueron el resultado de la restitución de dos pares fotográficos adquiridos por DETENAL. En el DEM se obtuvo un RMSE de 4.28 m, y se utilizaron 17 checkpoints para realizar su validación. La cobertura es similar al DEM de 2006 y clasificando el RMSE en 428 cm, se puede mapear

estrictamente curvas de nivel a cada 5 metros. La ortofoto alcanzó un RMSEr de 3.07 m, asignándole un uso recomendado para un mapeo estándar y trabajos en SIG. Cabe mencionar que la precisión alcanzada es adecuada debido a la calidad de las fotografías y se realizó el cálculo de las 8 marcas fiduciales que conllevan éstas, así como su punto principal de autocolimación y los offset en “x” y “y”, indispensables para la geometría interna de la estación fotogramétrica digital.

Las fotografías de 1994 adquiridas por IMIP, tuvieron un DEM resultante que alcanzó un RMSE de 3.10 m calculado a partir de 17 checkpoints. Este DEM tiene una dimensión de 75 hectáreas. En esta fecha se observan grandes cambios en la cobertura del suelo en el sitio de prueba, se encuentran grandes trabajos de despalme, terracería y relleno. La ortofoto tiene un RMSEr de 3.22 m, de igual manera a las ortofotos anteriores se recomienda su uso para trabajos de SIG. A estas fotografías se les calculó 4 marcas fiduciales.

En cuanto a los productos resultantes de las FAFP adquiridas en 2010 por CICESE, se les calculó un RMSE de 8 m. Esto se debió a la mala geometría interna de la cámara no métrica utilizada, también las líneas de vuelo no contaban con una ruta de apoyo, así como su altura no fue constante. La ortofoto de 2010 tiene la mayor resolución de todas las ortofotos descritas anteriormente y alcanzó un RMSEr de 2.20 m. La buena resolución de las fotografías se debe a la altura de vuelo que llevaba la cámara (vuelo bajo).

5.2 Conclusiones

Este estudio muestra cómo los estándares establecen el grado de confiabilidad sobre los levantamientos realizados con técnicas de fotogrametría aérea, asignando una clase de precisión a los productos digitales resultantes, que en comparación con los levantamientos mediante equipo convencional (normalmente no se validan), se hubieran tomado ciertas medidas, primeramente por el área extensa (580 has), largas trazas, representación de elementos inaccesibles y la densificación de puntos, que conlleva a más horas máquinas (equipo topográfico, camionetas), horas hombres y con riesgo de no alcanzar un buen detalle en el producto final.

Se analizaron los resultados y se validaron de acuerdo a los estándares de ASPRS de 2015. Estos se utilizan para proporcionar el grado de confiabilidad del levantamiento topográfico multitemporal utilizando técnicas de fotogrametría aérea, asignando clases de precisión utilizando los umbrales de error RMSE para cada uno de esos productos. De acuerdo a lo anterior, se obtuvo lo siguiente:

Para el caso del DEM de INEGI de 2006 se tiene un RMSE de 2.40 metros, mientras que su ortofoto tiene un RMSEr de 0.98 m, de acuerdo a los estándares de precisión de la ASPRS.

Para el caso del DEM de IMIP de 1994, éste tiene un RMSE de 3.1 m, mientras que en la ortofoto se obtuvo un RMSEr de 3.22 m.

Para el caso del DEM de DETENAL de 1973, tuvo un RMSE de 4.28 metros, mientras que en la ortofoto el RMSEr fue de 3.07 metros.

Para el DEM de CICESE de 2010, éste tuvo un RMSE de 8 metros, mientras que en la ortofoto fue de 2.20 metros.

La precisión del DEM y la ortofoto de INEGI son las más altas, a pesar de tener la escala más pequeña (1:40, 000) cubriendo un área de 580 hectáreas aproximadamente. Esto puede deberse a que se tienen bien documentados los parámetros internos de la cámara métrica utilizada, son imágenes recientes a color y de buena resolución, existe una mejor densificación y distribución de GCP y checkpoints (verticales y horizontales) por ser fotografías relativamente más recientes. Por otro lado, el DEM de 1973 fue resultado de fotografías que carecían de parámetros internos de la cámara (los cuales se calcularon), tienen menor densificación de los GCP y checkpoints y las fotografías tienen menor calidad. Mientras que el error del DEM de 2010 depende principalmente del riguroso sistema que maneja la estación fotogramétrica digital, pues el método de intersección y resección exige tener bien definidos sus parámetros de calibración y orientación de la cámara, esto no se cumple debido a que se utilizó una cámara convencional tipo DSLR, la cual no alcanza la precisión de una de formato grande (métrica) y además las condiciones del vuelo no fueron óptimas.

Las ventajas de utilizar los estándares de la ASPRS en este trabajo son los siguientes:

Se pueden aplicar a datos con una amplia gama de resoluciones espaciales. Siendo ideales para toda la cartografía de alta resolución y a escalas grandes generada a partir de FAFP, hasta cartografía de escalas pequeñas obtenida de imágenes de satélite.

Proporcionan precisión medida y verificada estadísticamente a los DEMs y ortofotos, que pueden ser utilizadas en trabajos equivalentes a los de mapeo llevados a cabo con distintos métodos de estudio a

diferentes escalas. Esto puede ayudar a los usuarios a desarrollar expectativas razonables acerca de los niveles de precisión adecuados en proyectos específicos.

La tecnología es relativamente nueva y constantemente es difícil saber si las ortofotos y DEMs producidos a partir de estos estudios representan con precisión la configuración del terreno.

Los estándares permiten al usuario desarrollar una comprensión del nivel de precisión apropiado que se realizará a las diferentes condiciones y trabajos. Esto ayudará a la industria fotogramétrica y cartográfica para proporcionar un producto legítimo y de alguna manera a eliminar aquellos operadores con resultados pocos éticos.

Los levantamientos multitemporales que se describen en este documento, se llevaron a cabo utilizando FAFG de distinta fecha, escala, resolución, cámara y plataforma aérea. En cada uno de los casos, el número de checkpoints tanto verticales como horizontales tienen una calidad que va de buena a regular, lo que permite la precisión de los resultados en el proyecto, es decir, los productos evaluados son más realistas. Sin embargo, los checkpoints para las fotografías históricas (1973 y 1994) fueron más complicados de obtener, pues se realizaron varias salidas de campo, primeramente para hacer un reconocimiento del terreno y posteriormente tomar las lecturas en los checkpoints con el GPS.

Poder evaluar si los levantamientos utilizando fotogrametría aérea es el método más adecuado para obtener los datos requeridos, o si algún método alternativo como LiDAR, IFSAR u otro sería más apropiado.

Literatura citada

- Aschenwald, J., Leichter, K., Tasser, E., & Tappeiner, U. 2001. Spatio-temporal landscape analysis in mountainous terrain by means of small format photography: a methodological approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4), 885-893.
- ASPRS. 1990. ASPRS Accuracy standards for large-scale maps. Mayo 2016, de: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2012/01/1990_jul_1068-1070.pdf
- ASPRS. 2015. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Agosto, 2015, de: <http://www.asprs.org>
- Avtar, R., Sawada, H., & Suzuki, R. (2012). Use of DEMs data to estimate height changes due to Deforestation. Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium 2012 IEEE International, Munich, Germany.
- Blachut, T. J., & Burkhardt, R. 1989. Historical development of photogrammetric methods and instruments. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 75 (2), 169-177.
- Coelho, L. 2004. The development of a digital photogrammetric softcopy kit for educational purposes. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 35(B6), 95-100.
- Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I., & Ríos-Muñoz, C. A. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista chilena de historia natural*, 83(3), 421-433.
- Chapa Bezanilla, D., Sosa Ramírez, J., & de Alba Ávila, A. 2008. Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y bosques*, 14(1), 37-51.
- Davis, C. H., & Wang, X. (2000). High resolution DEMs for urban applications. Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, Honolulu, Hawaii.
- DeWitt, J., Warner, T., & Conley, J. 2015. Comparison of DEMs derived from USGS DLG, SRTM, a statewide photogrammetry program, ASTER GDEM and LiDAR: implications for change detection. *GIScience & Remote Sensing*, 52(2), 179-197.
- Fabris, M., & Pesci, A. 2005. Automated DEM extraction in digital aerial photogrammetry: precisions and validation for mass movement monitoring. *Annals of Geophysics*, Vol. 48, N. 6.
- Fagua, J., Campo, A., & Posada, E. 2011. Desarrollo de dos metodologías para la generación de modelos digitales de terreno (MDT) y superficie (MDS) empleando datos LiDAR y programas de licencia. *Análisis Geográfico*, 49, 83-95.
- Felicísimo, A. M., 1994. Modelos digitales del terreno. Pentalfa Oviedo, España
- Fernández-López, J. (1998). Ortofotografía digital: Aplicaciones a los proyectos de carreteras. Paper presented at the I Congreso Andaluz de Carreteras. Construcción de carreteras en Climas Semiáridos, Tomo 1, Palacios de Congresos de Granada.

- Fuentes, J. E., Bolaños, J. A., & Rozo, D. M. 2012. Modelo digital de la superficie a partir de imágenes de satélite ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia.. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 41, 2.
- García-Martín, A., Rosique-Campoy, M. F., & Segado-Vázquez, F. E., 1994. *Topografía básica para ingenieros*. EDITUM, Murcia
- Gesch, D. B. (2014). An inventory of topographic surface changes: the value of multi-temporal elevation data for change analysis and monitoring. Paper presented at the The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Suzhou, China.
- Harintaka, S., & Susanto, A. (2009). Assessment of Low Cost Small Format Aerial Photogrammetry for Cadastral Mapping (Case Study in Klaten Regency, Central Java, Indonesia). Paper presented at the Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment - Building the Capacity, Hanoi, Vietnam.
- Henry, J. B., Malet, J. P., Maquaire, O., & Grussenmeyer, P. 2002. The use of small-format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(12), 1339-1350.
- Kršák, B., Blišťan, P., Pauliková, A., Puškárová, P., Kovanič, L., Palková, J., & Zelizňáková, V. 2016. Use of low-cost UAV photogrammetry to analyse the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*, 91 (2016), 276–287. doi: Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.028>
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J., 1987. *Remote sensing and image processing*. John Wiley & Sons, New York
- Loaiza, J. C., & Valentijn, R. 2011. Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales Caso de estudio para vertientes de alta montaña. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 23-32.
- Martinez-Casasnovas, J., Ramos, M., & Poesen, J. 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*, 58(1), 305-321.
- McGlone, C., Mikhail, E., & Bethel, J., (5th ed.), 2004. *Manual of Photogrammetry*. McGlone, Maryland
- Pérez-Vega, A., & Mas, J. F. 2009. Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. *Investigaciones geográficas*(69), 53-67.
- Sánchez, A. M., Fito, J. M. E., & Marauri, P. 1995. Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: el mapa sintético de riesgos potenciales y el mapa de erosión. *Lurralde: investigación y espacio*(18), 257-291.
- Schenk, T., 1999. *Digital photogrammetry*. TerraScience, Ohio
- Seedahmed, G. H., Schenk, T., & Merchant, D. 2016. Experimental results of digital camera calibration. *ISPRS*, vol. 32, 91-96.
- Sifuentes, R. F. J., & Vásquez, A. R., 1997. *Introducción a la Fotogrametría*. Trillas, México, D.F.
- Sulebak, J. 2000. Applications of digital elevation models. DYNAMAP Project, 11.

- Taubenbock, H., Pengler, I., Schwaiger, B., Cypra, S., Hiete, M., & Roth, A. (2007). A multi-scale urban analysis of the Hyderabad metropolitan area using remote sensing and GIS. Paper presented at the 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, Francia.
- Torres-Rodríguez, J., 2013. Mapeo aéreo usando fotografía de formato pequeño. En Sánchez Flores, E. & Díaz Caravantes, R. Dinámicas locales del cambio ambiental global. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ciudad Juárez. (pp. 473-501).
- Ubalde, J., Rius, J., & Poch, R. 1999. Monitorización de los cambios de uso del suelo en la cabecera de cuenca de la Ribera Salada mediante fotografía aérea y SIG (El Solsonés, Lleida, España). Pirineos, 153, 101-122.
- Uysal, M., Toprak, A., & Polat, N. 2015. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. Measurement, 73, 539-543.
- Wang, P., Du, J., Feng, X., & Hu, S. (2006). Effect of DEM uncertainty on the distributed hydrological model TOPMODEL. Paper presented at the 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Beijing, China.
- Wilson, J. P., & Gallant, J. C., 2000. Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley & Sons, Inc., New York
- Zhu, C., Shi, W., Li, Q., Wang, G., Cheung, T. C. K., Dai, E., & Shea, G. Y. K. 2005. Estimation of average DEM accuracy under linear interpolation considering random error at the nodes of TIN model. International Journal of Remote Sensing, 26(24), 5509-5523. doi: 10.1080/10245330500169029