



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO
AMBIENTE

EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD DE MODELOS DIGITALES
DE ELEVACIÓN (DEMs), OBTENIDOS MEDIANTE IMÁGENES
ESTEREOSCÓPICAS SATELITALES PLEIADES, ASTER GDEM
Y SRTM EN UN PAISAJE FORESTAL.

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

DAVID HERNÁN PAVEZ MUÑOZ

Profesor Guía: Sr. Jaime Hernández Palma. Ingeniero Forestal,
Doctor Ingeniero de Montes

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y
DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO
AMBIENTE

EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD DE MODELOS DIGITALES
DE ELEVACIÓN (DEM_s), OBTENIDOS MEDIANTE IMÁGENES
ESTEREOSCÓPICAS SATELITALES PLEIADES, ASTER GDEM
Y SRTM EN UN PAISAJE FORESTAL.

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

DAVID HERNÁN PAVEZ MUÑOZ

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Jaime Hernández Palma	...7.0...
Prof. Consejero Sr. Patricio Corvalán Vera	...7.0...
Prof. Consejero Sr. Mauricio Galleguillos T.	...6.5...

A la vida,
A mi profesor guía; Jaime,
A mis padres; Rina y José,
A mis hermanos,
A mi familia,
A mis compañeros y amigos.

AGRADECIMIENTOS

El término de este ciclo no habría sido posible sin la colaboración de las personas a quienes dedico estas palabras.

Primero que todo agradecer a mi profesor guía Dr. Jaime Hernández, por sus valiosos comentarios, experiencia, paciencia y gran disposición en el desarrollo de este trabajo.

A mis padres; Rina y José quien me cuida desde los cielos. Ya que soy la cosecha de lo que ellos sembraron y cultivaron a lo largo de mis tiempos, pero sobre todo por su amor, comprensión, cuidado y consejos. Gracias por respetar mis tiempos y decisiones, los amo.

A mis hermanos; Erika y Patricio, quienes siempre me han apoyado en todo.

A toda mi familia, a mis tíos; Juan y Clelia, quienes siempre estuvieron presentes en este proceso brindándome su sabiduría y cariño.

A mis compañeros y amigos; Giannina, Ximena, Antonella, katy, Tania, Fernanda, Pancho, Sebastián, Carlo y Feña. Con quienes pasé innumerables horas de estudio y ocio. Compartimos la alegría de estar en tan maravilloso campus.

A Carolina, Ciro y Frederick, por su tremendo aporte a este trabajo con sus consejos y experiencia profesional.

A mis amigas y amigos; Carolaina, Coté, Naty, Lucho, Marcelo, Ernesto, Hernán y Titín. Gracias por la presión ejercida y los ánimos entregados.

Cada uno de ustedes apporto de distintas maneras en mi formación personal y profesional. Son los mejores, espero que a lo largo de esta nueva etapa que comienza estén siempre presentes.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 El Modelo Digital de Elevación	3
2.2 Construcción de Modelos Digitales.....	3
2.2.1 Métodos directos	3
2.2.1.1 LiDAR.....	3
2.2.2 Métodos indirectos	4
2.2.2.1 Restitución fotogramétrica	4
2.2.2.2 Aerotriangulación de imágenes satelitales	5
2.2.2.3 Generación de imágenes normalizadas o epipolares	5
2.2.2.4 Imágenes PLEIADES.....	7
2.2.2.5 ASTER GDEM	8
2.2.2.6 SRTM.....	8
2.3 Variables y elementos morfométricos básicos	9
2.4 Estimación del error en modelos digitales de elevación.....	11
2.5 Relevancia en el sector forestal.	12
3. OBJETIVOS	13
3.1 Objetivo general	13
3.2 Objetivos específicos.....	13
4. MATERIAL Y MÉTODO	14
4.1 Material	14
4.1.1 Lugar de estudio	14
4.2 Método.....	15
4.2.1 Evaluación de la exactitud.....	15
4.2.2 Evaluación espacial del error	17
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
5.1 Evaluación de productos a 1 m.....	18
5.2 Evaluación de productos a 30 m.....	20
5.3 Evaluación de la exactitud planimétrica.....	24
5.4 Evaluación del comportamiento espacial del error	25
5.5 Análisis de relación entre el error y las variables morfométricas.....	27
6. CONCLUSIONES	29
7. BIBLIOGRAFÍA	30
8. ANEXOS	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Geometría epipolar.....	6
Figura 2: Elementos de orientación exterior.....	7
Figura 3: Ubicación del predio Monte Oscuro.	14
Figura 4: Grilla de puntos de 100 m de espaciamiento sector Monte Oscuro.	16
Figura 5: Vista perspectiva 3D de DTM LiDAR y DTM PLEIADES.....	18
Figura 6: Histograma de alturas DTM LiDAR y DTM PLEIADES.....	19
Figura 7: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo PLEIADES sobre las alturas del modelo LiDAR.....	20
Figura 8: Modelos de elevación a evaluar.	20
Figura 9: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo ASTER sobre las alturas del modelo LiDAR.....	22
Figura 10: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo SRTM sobre las alturas del modelo LiDAR.....	22
Figura 11: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo PLEIADES sobre las alturas del modelo LiDAR.....	23
Figura 12: Gráficas de matriz de diagrama de dispersión entre los DEMs ASTER, LiDAR, PLEIADES y SRTM.	23
Figura 13: Puntos de árboles homólogos en imagen LiDAR y PLEIADES.	24
Figura 14: Reporte auto correlación espacial I de Moran (ARCGIS).	26
Figura 15: Análisis de puntos calientes.	26
Figura 16: Índices y modelos morfométricos.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones del modelo Global ASTER GDEM.	8
Tabla 2: Especificaciones del modelo Global SRTM.....	8
Tabla 3: Clasificación de la rugosidad del terreno.	10
Tabla 4: Clasificación de pendiente.....	10
Tabla 5: Clasificación de accidentes geográficos.	11
Tabla 6: Errores promedios de alturas y error medio cuadrático de DTM PLEIADES.	18
Tabla 7: Estadística descriptiva de alturas de DTM LiDAR y PLEIADES.	19
Tabla 8: Estadística descriptiva de altura de DEMs.	21
Tabla 9: Errores promedios de alturas y error medio cuadrático de DEMs ASTER, SRTM y DTM PLEIADES	21
Tabla 10: Errores residuales estandarizados y R^2 de DEMs a 30 m.....	22
Tabla 11: Matriz de correlaciones.	23
Tabla 12: Evaluación del error planimétrico.	25
Tabla 13: Matriz de correlación.....	28

Evaluación de la exactitud de modelos digitales de elevación (DEMs), obtenidos mediante imágenes estereoscópicas satelitales PLEIADES, ASTER GDEM y SRTM en un paisaje forestal.

RESUMEN

El aumento de la disponibilidad de sistemas de captura masiva de información geográfica, requiere la evaluación y validación de sus capacidades para su procesamiento automático. Su utilización se da en diferentes campos: civil, militar, forestal, obras civiles, hidrología, medio ambiente, agricultura. La siguiente memoria tiene por objeto evaluar la exactitud de modelos digitales de elevación (DEMs), obtenidos mediante imágenes estereoscópicas satelitales, proveniente de la constelación PLEIADES de la zona de Monte Oscuro, VII Región del Maule, contrastándolo con modelos digitales de elevación validados: LiDAR, SRTM y ASTER.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar la exactitud altimétrica de los DEMs derivados de imágenes PLEIADES, ASTER GDEM y modelo SRTM usando como referencia el DEM generado por datos LiDAR, en un paisaje forestal de la precordillera de Curicó.
- Evaluar el comportamiento espacial del error de los modelos obtenidos en función de la variación espacial de la topografía.

La metodología aplicada para cumplir estos objetivos primero fue homologar los sistemas de referencia y de resolución espacial, para posteriormente poder evaluar la exactitud altimétrica mediante una grilla de espaciamiento de 100 m x 100 m, extrayendo los valores de altura en cada punto, obteniéndose 1.125 puntos por cada uno de los modelos a evaluar.

Del modelo de referencia LiDAR se calcularon sus principales características morfométricas, con las cuales se evaluó el comportamiento espacial del error de los modelos.

Al comparar los modelos con resolución espacial de 1 m, el error estandarizado de las alturas entre LiDAR y PLEIADES es de 4,313 m y un R^2 de 0,9992. Por parte, al evaluar el error con una resolución espacial de 30 m, PLEIADES es el modelo con menor error promedio (3,838 m), seguido por el DEM SRTM con 6,068 m y finalmente el DEM ASTER con 9,868 m. De igual manera sus R^2 se ajustan linealmente y son buenos estimadores teniendo correlaciones en todo sus casos cercana a 1.

Al evaluar la matriz de correlación del error de las alturas del modelo LiDAR y PLEIADES contrastados con las variables morfométricas, existe una muy baja correlación entre las variables de convexidad, curvatura total, clasificación de accidentes geográficos y clasificación de pendiente al presentar valores muy cercanos a 0. Existe una correlación negativa tanto para la altura del dosel y la orientación, y presenta una correlación positiva para el índice de rugosidad, pendiente e índice de posición topográfica. Por lo tanto, el error entre los modelos evaluados se relaciona en mayor medida con la presencia de vegetación, sobre todo en terrenos más planos, que con la topografía (variables geomorfométricas básicas).

Palabras claves: Extracción de DEMs, exactitud altimétrica, ASTER GDEM, LiDAR, PLEIADES, SRTM, variables morfométricas.

Evaluation of the accuracy of digital elevation models (DEMs) generated with stereoscopic image-pairs obtained from the Space missions PLEIADES, ASTER GDEM and SRTM in a forest landscape.

ABSTRACT

The increased availability of systems for mass acquisition of geographic information requires evaluation and validation of its capabilities for an automatized processing of the data. Its use is given in different fields: civil, military, forestry, civil engineering, hydrology, environment, agriculture. The following study deals with the determination of accuracy of digital elevation models (DEMs), obtained by stereoscopic satellite imagery from the PLEIADES constellation of Monte Oscuro, VII Region of Maule, and contrasting this data with the following sources of already validated digital elevation models: LiDAR, SRTM and ASTER.

- Evaluate the altimetric accuracy of the DEMs derived from images PLEIADES, ASTER GDEM and SRTM using the LiDAR DEM as Ground Truth data generated in a forest landscape of the foothills of Curicó.
- Assess the spatial behavior of error of the digital elevation models obtained depending on the spatial variation of topography.

The methodology used to achieve these objectives consisted in first homologating their reference systems and spatial resolutions. Later to assess the altimetric accuracy, a grid with a spatial spacing of 100 m by 100 m was used and the height values of all sources of elevation data were extracted for comparison, obtaining a total of 1125 points with height information for each elevation model.

The principal morphometric characteristics were calculated using the LiDAR reference model and the behavior of the spatial error was evaluated later on through these morphometric characteristics.

When comparing the elevation models with spatial resolution of 1 m, the standardized error in height between LiDAR and PLEIADES is 4,313 m with a R^2 of 0.9992. While evaluating the error for the 30m spatial resolution models indicates a standardized error in height of 3,838 m between LiDAR and PLEIADES, whereas an error of 6,068 m and 9,868 m can be observed for the SRTM elevation model respectively ASTER elevation model. Their R^2 values are close to 1 and similar between each other and indicate therefore a linear behavior as well as demonstrate their capability as estimators for the real height value.

Evaluating the height-error correlation matrix between LiDAR and PLEIADES in contrast to the morphometric variables, it is shown a very low correlation between the variables of convexity, total curvature, and landform and slope classification with all variables indicating R^2 close to 0. A negative correlation was found for canopy height and orientation, as well as a positive correlation for roughness index, slope index, and topographic position index. Therefore, the error evaluated between the different elevation models relate more with the presence of vegetation, especially in flatter lands with topography (basic geomorphometric variables).

Keywords: DEM Extraction, altimetry accuracy, ASTER GDEM, LiDAR, PLEIADES, SRTM, morphometric characteristics.

1. INTRODUCCIÓN

Un Modelo digital de elevación (DEM) es una representación digital de la altitud como variable continua sobre una superficie bidimensional, a través de una red regular de valores Z referenciados a un DATUM común. Los DEMs son utilizados para representar el relieve de un terreno, por lo que puede ser interpretado como una forma digital y en formato *ráster* que representa las características topográficas de un paisaje determinado (Lobo y Ulrich, 2007).

Existen diversas maneras de obtener un DEM:

- A partir de curvas de nivel digitalizadas o generándolas con instrumentos topográficos (ej. Estación total).
- Generándolos desde pares estereoscópicos de fotografías aéreas o imágenes de satélite representadas por sistemas óptico-electrónicos procedentes de sensores remotos entre los más importantes destacan: SPOT (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) Y PLEIADES, a través de procedimientos fotogramétricos.
- Aplicando interferometría a partir de imágenes RADAR como los suministrados por el SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).
- Mediante imágenes LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

El uso de los DEM para el análisis visual y matemático de la topografía, paisaje y geoformas se ha incrementado, gracias a los datos e imágenes provenientes de sistemas satelitales y LiDAR que posibilitan la generación de DEMs a menor costo, mayor precisión y mayor accesibilidad. Sin embargo es necesario que represente la superficie terrestre de la manera más precisa posible.

La constelación de satélites PLEIADES de muy alta resolución espacial, es un sistema de observación de la tierra desarrollado por el CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) con uso militar y civil. Ofrece productos de muy alta resolución, con una disponibilidad comercial con revisita diaria de todos los puntos del globo. Brinda productos de 50 cm, con una huella de 20 km, los productos PLEIADES permiten disponer de la máxima información tanto del lugar de interés como de sus alrededores (Fernández, 2011; Kubik *et al.*, *ASPRS*).

El principio de los sistemas LiDAR consiste en la medición del tiempo entre la emisión de un pulso láser de haces infrarrojos y su retorno, luego de ser reflejado sobre la superficie. A partir de ese tiempo, se calcula la distancia entre el sensor y el objeto sobre el cual incide el pulso (Wehr y Lohr, 1999). Cualquier proyecto que se vea en la necesidad de utilizar el conocimiento preciso de la topografía o relieve del terreno se verá beneficiado al utilizar esta información digital.

La medición forestal incorporó nuevos enfoques por la aparición de estos sensores, los que permiten una recopilación masiva de datos de alta precisión (Nelson *et al.*, 1984; Maclean y Krabill, 1986), como son estudios relacionados con la conservación de suelos, planificación de cuencas hidrológicas, determinación de perfil de alturas, la densidad del rodal, determinación de especies y estimación de biomasa (Nilsson, 1996; Nelson *et al.*, 1997 y Holmgren, 2003) son algunos ejemplos de actividades que se verán favorecidas con la utilización de sensores láser e imágenes satelitales. Por lo tanto, es de real importancia validar estos modelos, comprobar su correspondencia con la realidad y ajustarlos mediante puntos de control para su uso en los distintos sectores aplicables.

El presente trabajo tiene por objeto evaluar la exactitud de modelos digitales de elevación (DEMs), obtenidos mediante imágenes estereoscópicas satelitales, proveniente de la constelación PLEIADES de la zona de Monte Oscuro, VII Región del Maule, contrastándolo con modelos digitales de elevación validados: LiDAR, SRTM y ASTER.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 El Modelo Digital de Elevación

Un DEM es una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, y es posible representarlo en forma genérica por la ecuación:

$$Z = f(X, Y)$$

Donde Z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (X, Y) suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema coordenado plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica (Felicísimo, 1994).

2.2 Construcción de Modelos Digitales

La captura de la información hipsométrica es el paso inicial en el proceso de construcción de un DEM e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos. Los métodos para la generación de un DEM se pueden agrupar de la siguiente manera (Ackermann, 1994; Felicísimo, 1994; Nelson *et al.*, 2009):

- i. Métodos directos (fuentes primarias)
 - Altimetría: altímetros LiDAR o RADAR transportados por plataformas aéreas o satelitales.
 - GPS: sistema de localización por triangulación.
 - Levantamiento topográfico: estaciones topográficas digitales.
- ii. Métodos indirectos (fuentes secundarias)
 - Restitución a partir de pares de imágenes
 - Estéreo imágenes digitales.
 - Estéreo imágenes analógicas.
 - Interferometría RADAR.
 - Digitalización de mapas topográficos
 - Automático.
 - Manual.

2.2.1 Métodos directos

2.2.1.1 LiDAR

LiDAR (*Light Detection and Ranging*), es un sistema activo de teledetección y medición de información a distancia a partir de un escáner láser, instalado sobre una plataforma aerotransportada, desarrollado para el modelamiento del terreno. Este sistema entrega como resultado una representación tri-dimensional de la superficie terrestre, quiere decir una cierta cantidad de puntos de medición con las dimensiones x , y , z , los cuales se emplean principalmente para representaciones detalladas del bosque, del terreno o construcciones. (Koch y Dees, 2008). El principio de los sistemas LiDAR consiste en la medición del tiempo entre la emisión de un pulso láser y su retorno, luego de ser reflejado sobre la superficie. Cabe mencionar que los LiDAR pulsan la energía principalmente en longitudes de onda correspondiendo al infrarrojo (LiDAR terrestre) o en longitudes perteneciendo al verde (LiDAR

batimétrico). A partir de ese tiempo y empleando la constante de la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s o 300.000 km/s) se calcula la distancia entre el sensor y el objeto sobre el cual incide el pulso, esto permite registrar las diferentes altitudes que hay en un terreno o estructura (Beltsavias, 1999; Hodgson *et al.*, 2005).

Los errores de un modelo LiDAR se encuentran en torno a los 15 cm en la vertical y entre 50 y 100 cm en la horizontal, destacando la dependencia directa de estos errores con la morfología del terreno y componentes del sensor (GPS/IMU y reloj) (Nelson *et al.*, 2009).

De un vuelo LiDAR a través de técnicas de interpolación de la nube de puntos, es factible extraer los siguientes modelos digitales, generalmente en formato *ráster*, de distintos tipos de elevaciones (Beltsavias, 1999; Liu, 2008; Lucas, 2008; Hernández *et al.*, 2013):

- **Modelo digital de terreno (MDT):** Resultado de la interpolación de los puntos correspondientes al último retorno o eco de un mismo pulso, que corresponden a los píxeles con la altura del suelo. En caso de la existencia de objetos sobre él, se aplican filtros especiales para eliminarlos.
- **Modelo digital de altura de objetos o superficie (MDS):** Obtenido a partir de la interpolación de todos los puntos (eliminando ruido). Donde cada pixel contiene el dato de elevación más alto, correspondiendo a un árbol, construcción o suelo en caso de no existir ningún objeto sobre él.
- **Modelo digital de objetos (MDO):** Corresponde a las alturas de los objetos por sobre el suelo, y su resultado se obtiene restando los dos modelos anteriores:

$$MDO = MDS - MDT$$

En sectores forestales se usa el nombre de modelo digital de copas (MDC).

- **Modelo de intensidades:** Que corresponde a la magnitud de la señal al regresar al avión luego de reflejarse en la superficie terrestre, se obtiene una imagen de intensidades, que permite hacer distinciones entre superficies, identificando vegetación, carreteras, puentes, suelo desnudo, entre otros.

2.2.2 Métodos indirectos

2.2.2.1 Restitución fotogramétrica

Pares estereoscópicos se han adquirido hasta hace pocos años exclusivamente mediante plataformas aéreas, capturadas utilizando cámaras de gran formato desde aviones en vuelo a diferentes altitudes, actualmente a estas fotografías se agregan las imágenes digitales capturadas con sensores pancromáticos o multi-espectrales mediante plataformas espaciales. El lanzamiento de diversos satélites como el SPOT, ASTER, y últimamente PLEIADES han permitido obtener imágenes estereoscópicas mediante variaciones en el ángulo de observación, programables desde la tierra. Los sensores pancromáticos de SPOT permiten una resolución de 1,5 m, ASTER de 30 m y PLEIADES 50 cm en el nadir. Examinando puntos homólogos en los pares estereoscópicos es posible deducir de su paralaje las cotas de referencia necesarias para reconstruir la topografía (Felicísimo, 1994; Fuentes, 2012).

Actualmente existen sistemas restituidores fotogramétricos automatizados que realizan este trabajo grabando los resultados directamente en un formato digital compatibles con un SIG

(Sistema de Información Geográfica). El acceso a la zona de estudio es necesario para establecer puntos de apoyo que permitan fijar valores de altitud en una escala absoluta. Este método se utiliza también en la elaboración de cartografía analógica y sólo se diferencia en el formato de salida de los datos. En la cartografía convencional, la salida se hace directamente sobre un soporte físico estable, mientras que en el otro caso se graba directamente en un soporte informático (Felicísimo, 1994).

2.2.2.2 Aerotriangulación de imágenes satelitales

Para algunas aplicaciones con requerimientos de baja precisión, se puede utilizar la herramienta de la aerotriangulación de imágenes satelitales. Se puede mencionar que para la cartografía topográfica a pequeña escala en regiones montañosas, se pueden utilizar imágenes pancromáticas SPOT. Imágenes de pares estereoscópicos SPOT de una región, pueden ser adquiridas a lo largo y ancho de la trayectoria del satélite. El análisis fotogramétrico de las imágenes se puede realizar mediante el uso de ecuaciones de colinealidad modificados (Cuartero y Felicísimo, 2003).

Sensores de empuje (*Pushbroom*) captan imágenes en forma de “escaneo” de la superficie terrestre, quiere decir que el sensor en sí está formado por detectores ubicados en una sola “línea” en forma paralela y la imagen se capta aprovechando el movimiento de la plataforma (de empuje), al contrario de las cámaras de tipo *frame* (trama), los cuales proyectan un área capturada a un plano compuesto por una determinada cantidad de detectores (*pixeles*). En consecuencia, cada línea escaneada por sensores de empuje, posee su propio punto principal en el centro de la línea y además requiere sus propios parámetros de la orientación externa para luego poder generar una imagen global y libre de errores geométricos a partir de la totalidad de las líneas capturadas. La trayectoria del satélite es muy estable durante la adquisición de las imágenes debido a la falta de turbulencias producidas por la atmósfera, los parámetros de orientación exteriores se puede suponer que varían de una manera sistemática (Wolf, 2000).

2.2.2.3 Generación de imágenes normalizadas o epipolares

Según Oñate, (2007) antes de la extracción del DEM, es necesario que el par estereoscópico sea transformado a un par de imágenes epipolares normalizadas, las cuales son paralelas al plano XY del espacio objeto. Al transformar las imágenes adquiridas en epipolares se produce exclusivamente el paralaje en una sola dirección y los puntos correspondientes se alinean en la misma fila o columna, por lo que el tiempo requerido para realizar el proceso de superposición de las imágenes, que permitirá luego el cálculo de la magnitud del paralaje y en base a ella la elevación, se reduce considerablemente. En dos imágenes normalizadas al tener un punto a de coordenadas (X_a, Y_a) en la imagen izquierda, el proceso de búsqueda de su punto conjugado a' en la imagen derecha para realizar la superposición, se realizará a lo largo de la línea:

$$Y' = Y_a; \text{ Debido a que ambos puntos poseerán igual coordenada } Y.$$

La normalización del par estereoscópico adquirido se realiza comúnmente aplicando criterios de geometría epipolar.

Se puede apreciar en la Figura 1, algunos elementos básicos a considerar en la geometría epipolar.

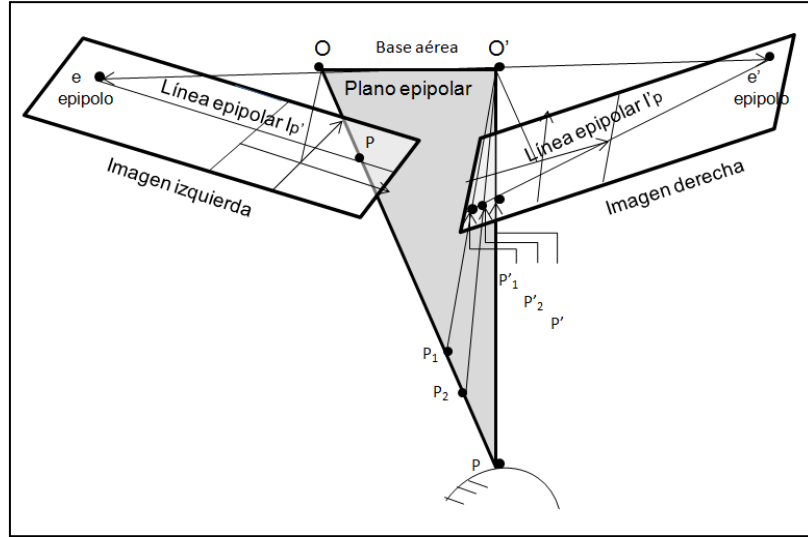


Figura 1: Geometría epipolar.

Fuente: Geometría epipolar (adaptado de Oñate, 2007).

Se tiene un par estereoscópico cuyas imágenes han sido tomadas desde las posiciones \$O\$ y \$O'\$; entonces la línea \$OO'\$ se denomina eje epipolar. El plano que pasa por los centros de proyección izquierda \$O\$ y derecha \$O'\$ y el punto \$P\$ sobre el terreno, es llamado plano epipolar. La línea de intersección de un plano epipolar y el plano de la imagen se denomina línea epipolar. Todas las líneas epipolares de una misma imagen intersectan en un punto llamado epipolo (\$e\$, \$e'\$ según el caso), definido por la intersección del eje epipolar con el plano de la imagen.

Las relaciones entre el sensor, la imagen y el suelo pueden determinarse en base a la condición de colinearidad que especifica que la posición del sensor, el punto en el terreno y su correspondiente punto en la imagen deben estar colocados sobre una línea recta, es decir deben ser colineales (Piong, 2003). Las ecuaciones que resumen la condición de colinearidad son las siguientes:

$$x_p = x_o - f \left[\frac{m_{11}(X_p - X_o) + m_{12}(Y_p - Y_o) + m_{13}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right]$$

$$y_p = y_o - f \left[\frac{m_{21}(X_p - X_o) + m_{22}(Y_p - Y_o) + m_{23}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right]$$

Donde:

$$m_{11} = \cos \varphi \cos \kappa; m_{12} = -\cos \varphi \sin \kappa; m_{13} = \sin \varphi$$

$$m_{21} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa; m_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa$$

$$m_{23} = -\sin \omega \cos \varphi; m_{31} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa$$

$$m_{32} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa; m_{33} = \cos \omega \cos \varphi$$

Las ecuaciones indicadas, consideran parámetros de orientación exterior e interior del sensor como se aprecia en la figura 2. Los parámetros internos de orientación son aquellos que permiten transformar la imagen de un sistema de coordenadas basado en píxeles al sistema espacial de coordenadas. Los parámetros externos de orientación, definen la posición y orientación del sensor cuando la imagen es capturada, es decir, las coordenadas \$X_o\$, \$Y_o\$, \$Z_o\$ de la

posición de captura de la imagen y los ángulos de rotación definidos por omega (ω) (rotación alrededor del eje fotográfico X), phi (ϕ) (rotación alrededor del eje fotográfico Y) y kappa (κ) (rotación alrededor del eje fotográfico Z). Todos estos elementos definen la posición del centro de proyección (O) con respecto al sistema general de coordenadas (X, Y, Z).

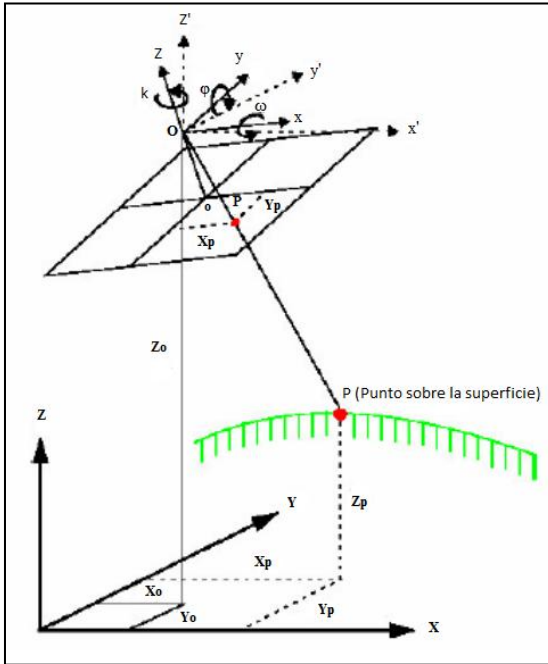


Figura 2: Elementos de orientación exterior.

Fuente: Elementos de orientación exterior (Adaptado de Piong, 2003).

2.2.2.4 Imágenes PLEIADES

La constelación de satélites PLEIADES, de muy alta resolución espacial, es un sistema de observación de la tierra desarrollado por el CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) con un doble uso: militar y civil. Está constituido por la puesta en órbita de dos satélites de las mismas características, dando lugar a un sistema con revisita diaria, estos requerimientos se cumplirán con dos satélites en constelación, con un desfase de 180° en la posición de su órbita y con ángulos de visión hasta de 45°. Los productos PLEIADES permiten disponer de la máxima información tanto del lugar de interés como de sus alrededores (Fernández, 2011; Kubik *et al.*, *ASPRS*).

Una de las principales características de PLEIADES, es su capacidad de tomar pares de imágenes estereoscópicas y tri-estereoscópicas para la captura de elementos en 3D y la generación de modelos digitales de elevación por técnicas fotogramétricas. Las imágenes de PLEIADES poseen una resolución nominal de captura de 50 cm en el nadir de la banda pancromática y 2 m en las bandas multiespectrales (4 bandas en el visible e infrarrojo cercano). El ancho de barrido es de 20 km con una órbita casi circular, heliosincrónica a una altura de 694 km y con el nodo a las 10h 30' hora local. Su ciclo de revisita orbital es de 26 días. La mejor posición absoluta que se podrá conseguir sin puntos de apoyo de campo será de 4,5 m CE90 (error circular al 90% de probabilidad) utilizando parámetros refinados en la órbita (Fernández, 2011).

2.2.2.5 ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*)

ASTER es un sensor de imágenes elaborado y construido por el METI de Japón (*Ministry of Economy, Trade and Industry*), e instalado en el satélite TERRA de la NASA. Las características de este sensor se describen a continuación: Cobertura mundial, con una resolución espacial nominal de 30 m. Su MDE se genera a partir de la estereoscopía de las bandas 3N (*Nadir-looking*) y 3B (*Backward-looking*) obteniendo un modelo digital relativo (sin puntos de control) y un modelo digital absoluto utilizando puntos de control. Los errores medios cuadráticos en la vertical fluctúan entre los 10 y 25 m (ERSDAC, 2003; Meti, 2009; Rozas, 2010).

Tabla 1: Especificaciones del modelo Global ASTER GDEM (intervalo de confianza del 90%).

<i>Parámetro</i>	<i>ASTER GDEM</i>
Sistema	VNIR/SWIR/TIR
Resolución temporal	16
Rango espectral (bandas 3N y 3B)	0,78-0,86 μm
Ancho de barrido	60 Km
Producto	
Precisión vertical relativo	10 m
Precisión vertical absoluto	7 m
Precisión horizontal relativa	10 m
Precisión horizontal absoluta	7 m
Resolución espacial	1" (~30 m)
DATUM	WGS84

Fuente: (ERSDAC, 2003).

2.2.2.6 SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

Fue un proyecto conjunto entre la *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y las agencias espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI). La misión tuvo como objetivo generar datos topográficos para el 80% de la superficie de la tierra (entre los 60°N y 56°S). Con puntos ubicados en una grilla de 1 arco-segundo (30 m aproximadamente) en latitud y longitud (Hirt, 2010). Utilizó un sistema en banda C en modo ScanSAR cubriendo un ancho de barrido de 225 km, otra banda X con un ancho de barrido de 50 km (Hoffman y Walter, 2006).

Tabla 2: Especificaciones del modelo Global SRTM (intervalo de confianza del 90%).

<i>Parámetro</i>	<i>Banda C</i>	<i>Banda X</i>
Sistema		
Longitud de onda	5,6 cm	3,1 cm
Frecuencia	5,3 GHz	9,6 GHz
Ancho de barrido	225 Km	50 Km
Producto		
Precisión vertical relativo	10 m	6 m
Precisión vertical absoluta	16 m	16 m
Precisión horizontal relativa	15 m	15 m
Precisión horizontal absoluta	20 m	20 m
Resolución espacial	1" (~30 m)	1" (~30 m)
DATUM Vertical	EGM96	WGS84
DATUM Horizontal	WGS84	WGS84

Fuente: (USGS, 2005b).

2.3 Variables y elementos morfométricos básicos

Las variables morfométricas corresponden a las que se derivan directamente del DEM, representando la forma topográfica, independiente de sus procesos formadores (Olaya, 2009). Se pueden clasificar en locales y regionales, donde los primeros se derivan de cálculos en un vecindario pequeño (matriz de 3x3 o 5x5 píxeles para el cálculo de la pendiente) y los últimos consideran el DEM completo o parte importante de él (delimitación de una cuenca hidrográfica).

La pendiente del terreno está relacionada con el espesor del suelo, encontrándose por lo general, en una toposecuencia, suelos de menor profundidad en áreas de mayor pendiente. De igual manera la fertilidad del suelo, así en una toposecuencia, los suelos de ladera con elevada pendiente son altamente lixiviados y de baja fertilidad, en contraste con los suelos de valle, en los cuales un nivel freático más alto reduce el lavado de nutrientes (Jaramillo, 2002).

La curvatura vertical caracteriza los cambios en la velocidad del flujo y en los procesos de transporte y sedimentación, la curvatura horizontal determina la propensión del agua a converger cuando fluye a través del terreno y por lo tanto es un indicador del contenido de agua en el suelo y de algunas características como textura, estructura y fertilidad (Suet y Lam, 2004). Los principales índices morfométricos son:

- **Modelo de pendiente:** Corresponde a la tasa de cambio máximo del valor de Z de cada celda.
- **Modelo de orientación:** Corresponde a la exposición de una superficie *ráster*. Identifica la dirección de la pendiente de la tasa máxima de cambio en el valor de cada celda para sus vecinos.
- **Modelo de curvatura total:** El cálculo de curvatura, utiliza la segunda derivada para la matriz de 3x3 píxeles. En teoría, esto es el cálculo de la pendiente de la pendiente para cada ubicación, donde los valores negativos indican que la superficie es cóncava hacia arriba en esa ubicación, y los valores positivos indican que por el contrario la superficie es convexa hacia arriba. Los valores de 0 indican áreas donde la superficie es plana y no existe ninguna curvatura. (ESRI, *Curvature, Spatial Analyst Tool*).
- **Índice de convergencia topográfico:** Este índice propuesto por Köthe *et al.* (1996), se basa en la orientación y es utilizado para distinguir áreas de flujo convergentes de las divergentes en el DEM. El índice se obtiene promediando la desviación de la dirección de la pendiente de la celda central de la ventana móvil con relación a la dirección de las celdas adyacentes, y restando 90 grados. Los posibles valores del índice varían de -100 (el flujo converge) hasta +100 (el flujo diverge). Las áreas con orientación nula son áreas planas sin curvatura (CONV=0). Este algoritmo es implementado por el software de información geográfica SAGA.
- **Índice de rugosidad de terreno:** El valor del índice de rugosidad se calcula para cada ubicación, resumiendo el cambio en la elevación dentro de una matriz de 3x3 píxeles. El índice se utiliza como una medida de la heterogeneidad del terreno tal como lo describe Riley (1998), posteriormente es clasificado en categorías para describir los diferentes tipos de terreno. Las clasificaciones son las siguientes:

Tabla 3: Clasificación de la rugosidad del terreno.

<i>Clasificación de la rugosidad del terreno</i>	<i>Valores de índice</i>
Nivel	[0, 0,5]
Próximo a nivel	(0,5, 6]
Ligeramente rugoso	(6, 12]
Rugoso intermedio	(12, 18]
Moderadamente rugoso	(18, 30]
Altamente rugoso	(30, 47]
Extremadamente rugoso	(47, 1489]

Fuente: (Riley, 1998).

- **Índice de posición topográfica (TPI):** Muchos de los procesos físicos y biológicos que actúan sobre el paisaje se encuentran altamente correlacionados con la posición topográfica (colina, fondo de valle, cresta expuesta, llanura, ladera superior o inferior. etc.), para ello se calcularán los TPI utilizando algoritmos inteligentes y simples. La TPI es la base del sistema de clasificación, y es simplemente la diferencia entre el valor de elevación de celdas y la elevación media del vecindario alrededor de esta celda.

Las características ecológicas de un sitio pueden ser afectadas por TPI en función de la escala de trabajo. El método planteado consiste en un algoritmo implementado como red, para generar una multi-escala TPI, clasificando este índice en función de la posición de la pendiente y tipos de accidentes geográficos (Guisan, *et al.*, 1999).

Valores de TPI positivos representan lugares que son más altos de la media de su entorno, como lo define su vecindad (cimas). Valores de TPI negativos representan ubicaciones que son más bajos que sus alrededores (valles). Valores de TPI cercanos a cero corresponde a aéreas planas (donde la pendiente es cercana a cero o constante) (Weiss, 2001).

- **Clasificación de la posición de pendiente (Jenness):** se utiliza el método propuesto por Jenness, (2006). Utilizando el TPI realiza una clasificación de la pendiente en seis categorías:

Tabla 4: Clasificación de pendiente.

<i>Clasificación de pendiente</i>	<i>Valor de índice</i>
Valle	1
Pie de montaña	2
Plano	3
Pendiente media	4
Laderas superiores	5
Cimas	6

Fuente: (Jenness, 2006).

- **Clasificación de accidentes geográficos (*Landform Classification*, Jenness):** valores de TPI calculados a partir de dos tamaños de vecindad, proporcionan más información acerca de la forma general del paisaje que los valores entregados por TPI desde una sola vecindad. Un punto en el paisaje con una pequeña zona de valor negativo de TPI y un gran barrio de valor TPI positiva es probable que represente un pequeño valle en una colina grande. Esta característica puede razonablemente ser clasificado como un drenaje de tierras altas. A la inversa, un punto con una pequeña zona de valor positivo TPI y una gran zona de valor negativo TPI probablemente representa una pequeña colina o

cresta en un valle más grande (Tagil y Jenness, 2008). Esta herramienta puede ser utilizada para obtener la siguiente clasificación de accidentes geográficos:

Tabla 5: Clasificación de accidentes geográficos.

<i>Clasificación de accidentes geográficos</i>	<i>Valor de índice</i>
Cañones, arroyos profundos	1
Drenajes de pendiente media, valles poco profundos	2
Drenajes de laderas altas, cabeceras	3
Valles en forma de U	4
Planos	5
Pendiente abierta	6
Laderas superiores, mesetas	7
Cimas locales, valle de colinas	8
Cimas de pendiente media, pequeñas colinas en llanuras	9
Cimas de las montañas, altas cordilleras	10

Fuente: (Weiss, 2001).

2.4 Estimación del error en modelos digitales de elevación

Los estándares del FGDC se apoyan en un reporte técnico de la Fuerza Aérea de los EE.UU. (Greenwalt y Schultz, 1962), donde se establecen las principales ecuaciones utilizadas para estimar exactitud planimétrica y altimétrica:

- Exactitud planimétrica u horizontal

$$error_{x,i} = x_{orto-imagen,i} - x_{ICP,i}; \quad error_{y,i} = y_{orto-imagen,i} - y_{ICP,i}$$

$$error_{r,i} = \sqrt{error_{x,i}^2 - error_{y,i}^2}; \quad RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum error_{x,i}^2}{n}}; \quad RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum error_{y,i}^2}{n}}$$

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum error_{r,i}^2}{n}}$$

Siendo ICP = punto de control independiente, error = diferencia longitudinal en el plano entre el punto independiente de control identificado en la ortoimagen y su respectiva coordenada en el terreno, x = Referido al eje ortogonal en dirección oeste-este, y = Referido al eje ortogonal en dirección sur-norte, r = referido a la magnitud del vector de error, n = número de ICP, i = rango de números enteros entre 1 y n.

- Exactitud altimétrica o vertical

$$error_{z,i} = z_{MDE,i} - z_{ICP,i}; \quad RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum error_{z,i}^2}{n}}$$

Siendo MDE = modelo digital de elevación, ICP = punto de control independiente, error = diferencia vertical entre el MDE y el ICP para una coordenada geográfica, n = número de ICP, i = rango de números enteros entre 1 y n.

2.5 Relevancia en el sector forestal.

La medición forestal ha incorporado nuevos enfoques debido a la utilización de los sensores actuales, los que permiten una recopilación masiva de datos de alta precisión (Nelson *et al.*, 1984; Maclean y Krabill, 1986). Estudios relacionados con la conservación de suelos, planificación de cuencas hidrológicas, determinación de perfil de alturas, la densidad del rodal, determinación de especies y estimación de biomasa (Nilsson, 1996; Nelson *et al.*, 1997), son algunos ejemplos de actividades que se verán favorecidas con la utilización de sensores LiDAR e imágenes satelitales. Por lo tanto, es de importancia validar estos modelos y comprobar su correspondencia con la realidad y ajustarlos mediante puntos de control para su uso en los distintos sectores aplicables.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la exactitud de modelos digitales de elevación (DEMs) obtenidos mediante imágenes estereoscópicas satelitales PLEIADES, ASTER GDEM y SRTM en un paisaje forestal.

3.2 Objetivos específicos

Evaluar la exactitud altimétrica de los DEMs derivados de imágenes PLEIADES, ASTER GDEM y modelo SRTM usando como referencia el DEM generado por datos LiDAR, en un paisaje forestal de la precordillera de Curicó.

Evaluar el comportamiento espacial del error de los modelos obtenidos en función de la variación espacial de la topografía.

4. MATERIAL Y MÉTODO

4.1 Material

4.1.1 Lugar de estudio

El estudio se realizó en el predio Monte Oscuro con una superficie de 1.295 ha, ubicado en la Comuna de Curicó, Provincia de Curicó, VII Región del Maule, a 45 km de Curicó al este por la ruta J-65 y J-685. Entre los $35^{\circ}08'20,55''$ y los $35^{\circ}05'53,60''$ de latitud sur y los $70^{\circ}57'06,99''$ y los $70^{\circ}53'38,78''$ de longitud oeste.

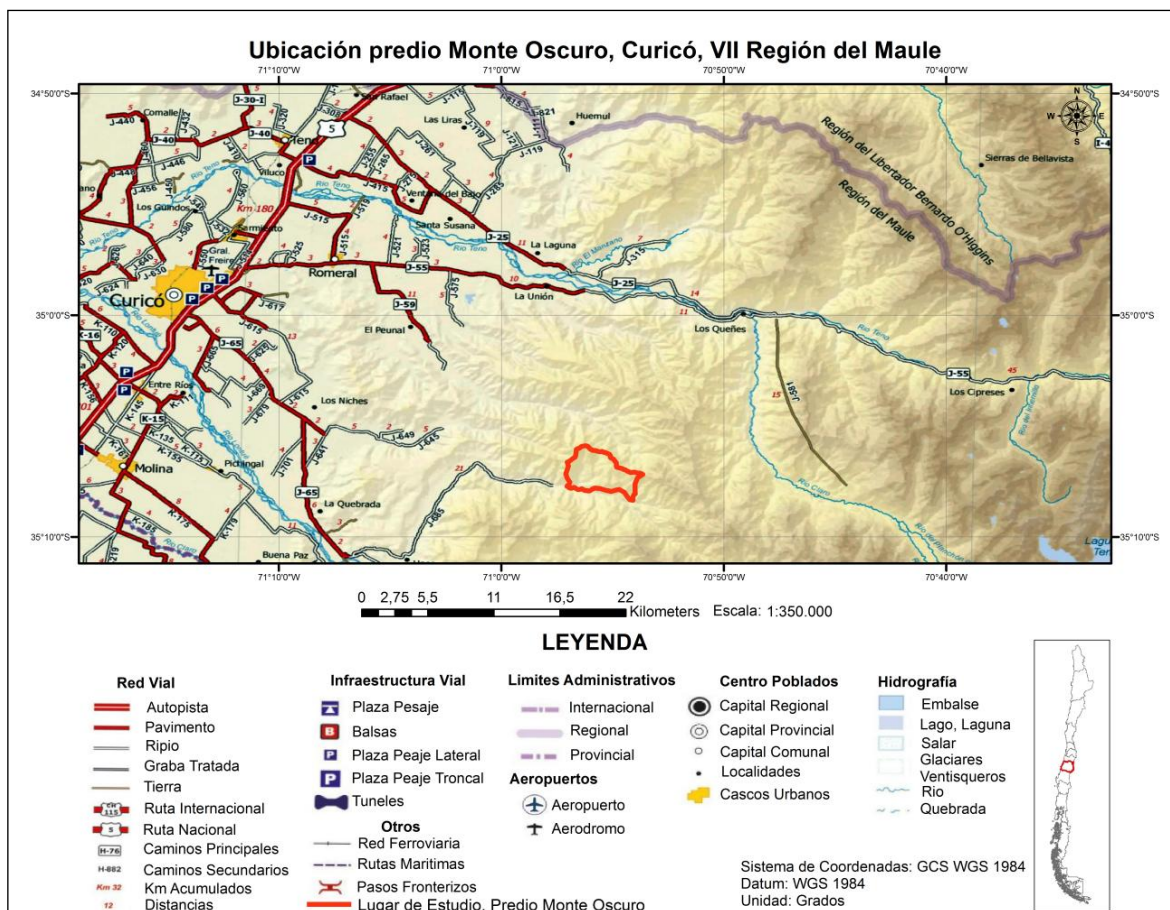


Figura 3: Ubicación del predio Monte Oscuro.

Fuente: Modificado, en base a cartográfica MIDEPLAN, división regional - Unidad de SIG (Actualización año 2009).

En cuanto a su vegetación podemos mencionar que sobre los 600 m de altura, encontramos los bosques de *Nothofagus*, en sectores húmedos, denominado "bosque Maulino" (Canelo, Lingue, Olivillo y Coigüe). También encontramos bosques de *Nothofagus* asociado con Canelo, Olivillo y Mañío entre los 800 y 1.000 m. Los bosques de *Nothofagus oblicua* (Roble) los encontramos presentes sobre los 1.200 m en la Cordillera de los Andes (Gajardo, 1994). Todas estas asociaciones se encontrarán en el sector de estudio de Monte Oscuro ya que su altitud varía entre los 600 y 1.700 msnm.

El área de estudio fue sobrevolada el 31/03/2011 utilizando un equipo LiDAR de la firma TRIMBLE modelo *Harrier56* propiedad de la empresa DIGIMAPAS CHILE Ltda. La altura

media de vuelo fue de 580 m del terreno, con un ángulo máximo de escaneo de aproximadamente 22,5°, una frecuencia de barrido 100 Hz y una densidad de puntos de 4,64 puntos/m².

Los productos resultantes previo procesamiento son: la nube de puntos, modelo digital de terreno, modelo digital de superficie, imágenes de alta resolución espacial *Trimble appplanix* DSS integrado en sistema *Harrier56*, imágenes de intensidad, modelos digitales de elevación ASTER Y SRTM de uso libre a una resolución de 30 m descargados de la página oficial del distribuidor y pares de imágenes estereoscópicas PLEIADES adquiridas por la constelación el 25 de enero de 2013 para la generación de DEMs.

4.2 Método

Para evaluar la exactitud de DEMs obtenidos mediante imágenes estereoscópicas satelitales PLEIADES, ASTER GDEM y SRTM en un paisaje forestal primero se homologaron las referencias de las superficies a comparar, utilizando los mismos orígenes tanto en sistema de coordenadas planimétrico como altimétrico. La comparación de los DEMs se sustenta en el sistema geodésico WGS84, llevado al plano con la proyección *Universal Transversal Mercator* (UTM) huso 19S. Para las alturas, se tomó como nivel de referencia unificando todas las elevaciones al DATUM EGM08. Posteriormente se abordaron los objetivos secundarios que se describen a continuación:

4.2.1 Evaluación de la exactitud

Para lograr este objetivo, primero se procesó el par estereoscópico de imágenes PLEIADES para obtener en primera instancia una nube de puntos en las dimensiones x, y, z, utilizando estereoscopia satelital (Wolf y Dewitt, 2000), con la cual posteriormente se generaron los DEMs del sector de Monte Oscuro. El proceso del par estereoscópico se ejecutó en:

- ERDASIMAGINE 2014 módulo LPS-DTM *Extraction*, el cual utiliza, la técnica definida como *Semi Global Matching* (SGM), consiste en un método de estéreo correlación basado en la correlación de píxeles (*pixel-wise matching*). Esta, utiliza una función de suavizado global por trayectorias múltiples (Hirschmüller, 2005 y 2006). Tiene una estructura algorítmica regular, y usa operaciones simples, para la extracción de la nube de puntos densa, para la posterior generación de los modelos precisos y con estos modelos generar ortorectificaciones precisas (Ernst y Hirschmüller, 2008).

Luego de extraer la nube de puntos y la generación de los DEMs, se procedió a capturar los valores de altura mediante una grilla de 100 m x 100 m de espaciamiento, puntos de control del modelo LiDAR acotados sólo a los puntos interiores del área de estudio, obteniéndose 1.125 puntos, donde cada punto tendrá la altura sobre el DTM LiDAR utilizado como alturas absolutas (ver Figura 4).

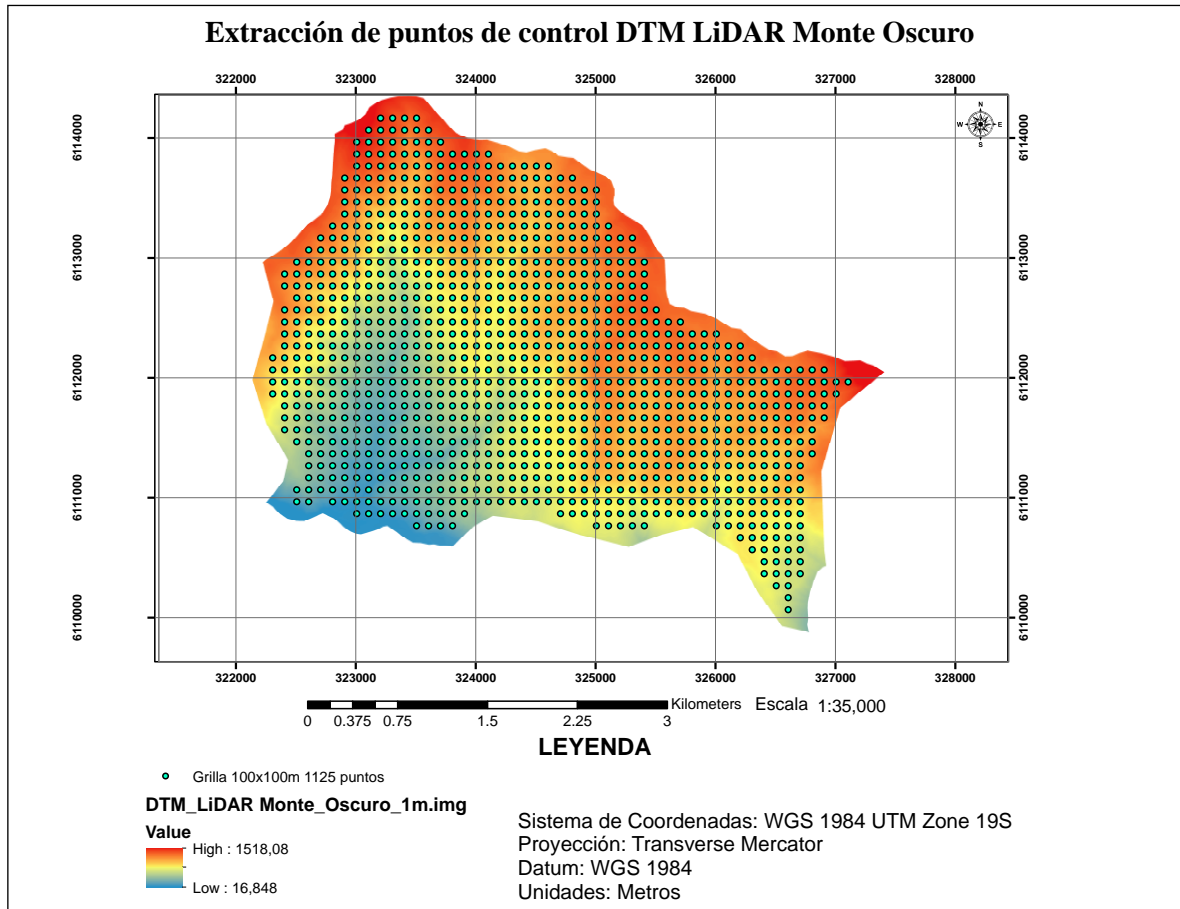


Figura 4: Grilla de puntos de 100 m de espaciamiento sector Monte Oscuro.

Con los puntos de control, imagen de alta resolución ortorectificada con DTM LiDAR, imagen de alta resolución PLEIADES ortorectificada con DTM PLEIADES, se calcularon los residuos para obtener la exactitud planimétrica y vertical mediante la obtención del error medio cuadrático tanto para posición y altitud del modelo (Greenwalt y Schultz, 1962).

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum(X_{obs}-X_{pred})^2}{N}}; RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum(Y_{obs}-Y_{pred})^2}{N}}; RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum(Z_{obs}-Z_{pred})^2}{N}}$$

En el cálculo de la exactitud planimétrica, es importante destacar que se digitalizaron puntos de los centros de copa de árboles distinguibles en ambas imágenes ortométricas, tanto de la imagen ortorectificada empleando el modelo LiDAR como con el modelo generado mediante las imágenes PLEIADES ya que el sector de Monte Oscuro, corresponde a una zona de media montaña sin sectores urbanizados, además las imágenes son de diferentes fechas de captura, por lo que existe una distorsión de las pocas construcciones existentes. Se decidió tomar como controles los centros de copas de árboles distinguibles en ambas imágenes.

Se compararon los DEMs a partir de LiDAR, PLEIADES, ASTER y SRTM previo corte del sector de estudio en GLOBAL MAPPER 15. La variable a comparar es la altura de cada uno de los modelos. Es necesario homogeneizar todos los modelos a la de menor resolución espacial mediante remuestreo espacial utilizando el algoritmo del vecino más cercano. Para comparar los modelos, se utilizarán:

- El coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj.) entre DEMs.
- El error medio cuadrático (RMSE_z).

4.2.2 Evaluación espacial del error

Para evaluar el comportamiento espacial del error de elevación de DEMs PLEIADES, se realizó:

- Un análisis de la correlación espacial del error de elevación, midiendo la autocorrelación espacial en base a las ubicaciones de entidades y los valores de atributo mediante la estadística I de Moran global en ARCGIS 10.1 (*Spatial Statistics Tools*). A partir de un conjunto de entidad y un atributo asociado (altura), esta herramienta estadística permite evaluar si el patrón expresado está agrupado, disperso o aleatorio (Goodchild, 1986).
- En función de los atributos topográficos, se realizó un análisis de las variables y elementos morfométricos básicos (corresponden a las que se derivan directamente del DTM LiDAR, SRTM Y ASTER) donde se describirá la relación entre las variables geomorfométricas y el RMSE_z PLEIADES.

Los algoritmos se seleccionaron al ser considerados en las referencias como los métodos más eficientes, por su disponibilidad en los *software* de análisis empleados, o por ser los más usados entre los *software* SIG libres o comerciales del ámbito geomorfométrico. Los *software* utilizados son: QGIS 2.5 (modulo SAGA 2.1.2) y ARCGIS 10.1.

El algoritmo a utilizar para el cálculo de pendiente, orientación y curvatura del terreno corresponde a la ecuación cuadrática de Zevenbergen y Thorne (1987) implementado por SAGA.

Una vez obtenidos los modelos de: Exposición, Pendiente, Rugosidad del terreno, Curvatura total, Índice de convergencia topográfico, Índice de posición topográfica (TPI), Clasificación de la posición de pendiente (Jeness) y Clasificación de accidentes geográficos (*landform classification, jeness*) se evaluaron los errores del modelo PLEIADES, determinando la correlación del error z con los índices y los modelos calculados, para esto se utilizara la plataforma estadística R 3.1.1 utilizando una tabla con la extracción de los puntos de control asociados a los atributos morfométricos calculados.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El DTM PLEIADES a utilizar en la evaluación de la exactitud, es el resultado de iteraciones del proceso descrito en el punto 4.2.1 modificando los valores de los parámetros de búsqueda, características del sector, densidad de puntos, tipo de suavizado, formatos de salida, generación de terreno original, parámetros para aplicación de filtro, entre otros. Los valores finales se muestran en los anexos 1, 2 y 3, estos permitieron la generación del DTM PLEIADES de resolución espacial de 1 m.

En cuanto a la diferencia de resolución espacial entre los modelos de elevación LiDAR, PLEIADES, ASTER y SRTM. Se estableció dos comparaciones, primero se comparó solamente los modelos con mayor resolución espacial de 1 m correspondientes a los modelos LiDAR y PLEIADES, Luego se estableció una única resolución común a las cuatro superficies de comparación adoptando a la mínima distancia entre píxeles de 30 m.

5.1 Evaluación de productos a 1 m

La tabla 6 muestra las diferencias de altura entre DTM LiDAR y PLEIADES con un error promedio de 1,1964 m; mientras que el error promedio absoluto es de 3,7548 m y el error medio cuadrático de 4,6125 m. Para disminuir estos errores se modificó la coordenada Z, sumándole el error promedio, así sus nuevos valores son de un error promedio de 0,0004 m; un error promedio absoluto de 3,5733 y un error medio cuadrático de 4,4547 m

Tabla 6: Errores promedios de alturas y error medio cuadrático de DTM PLEIADES. Delta Z = Diferencia entre las alturas del DTM LiDAR y PLEIADES; Delta Z *shift* = Diferencia entre las alturas del DTM LiDAR y PLEIADES con alturas incrementadas en 1,1964 m.

<i>DIFERENCIA DE ALTURAS DTM LIDAR - PLEIADES</i>	<i>Delta Z</i>	<i>Delta Z Shift</i>
<i>Error promedio</i>	1,1964	0,0004
<i>Error promedio ABS</i>	3,7548	3,5733
<i>RMSE</i>	4,6125	4,4547

La figura 5, muestra la visualización en perspectiva 3D del modelo LiDAR y el modelo PLEIADES.

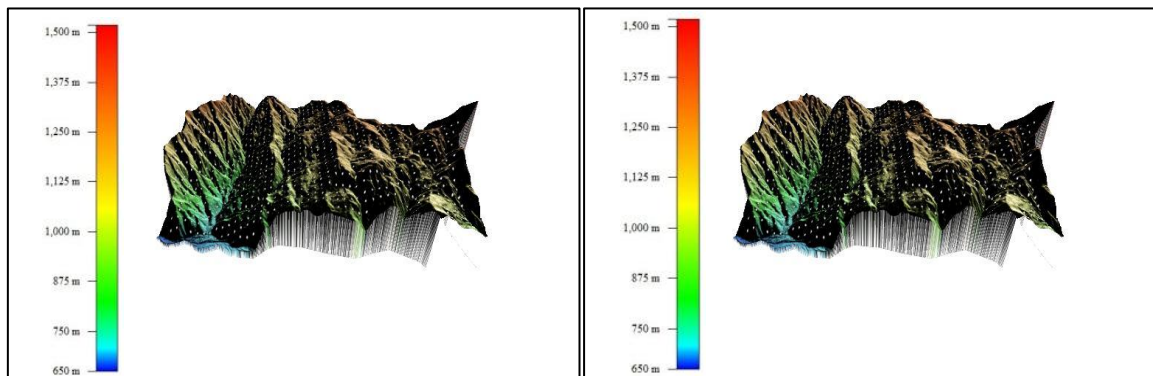


Figura 5: Vista perspectiva 3D de DTM LiDAR (izquierda) y DTM PLEIADES (derecha).

La Figura 6 muestra los histogramas de las alturas del DTM LiDAR y del DTM PLEIADES.

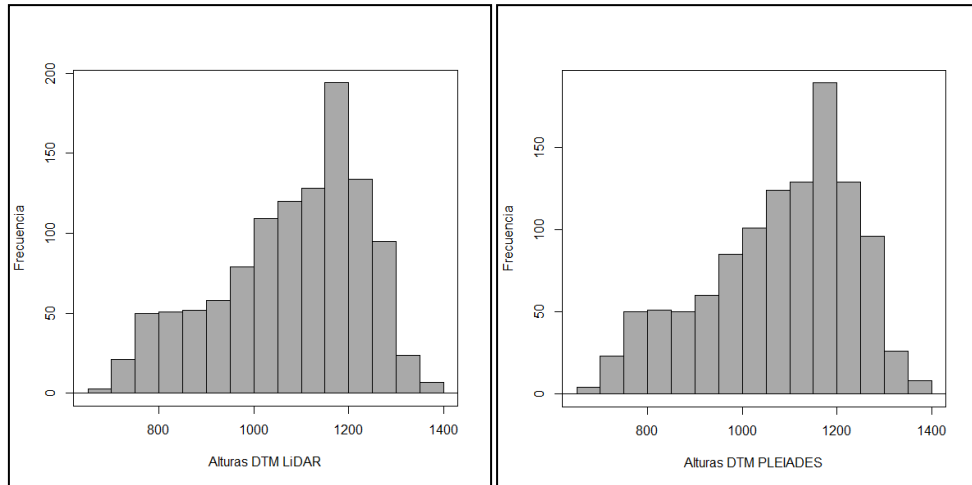


Figura 6: Histograma de alturas DTM LiDAR (izquierda) y DTM PLEIADES (derecha).

La tabla 7 presenta una comparación de las alturas del modelo de referencia LiDAR con respecto al modelo obtenido con PLEIADES. Se observa que las alturas promedio son 1078,22094 m y 1078,22055 m, los máximos de 1389,723 m y 1397,129 m, mínimos de 697,436 m y 692,074 m, las desviaciones estándar de 152,819 m y 153,887 m entre otros.

Tabla 7: Estadística descriptiva de alturas de DTM LiDAR y PLEIADES.

	<i>LiDAR</i>	<i>PLEIADES</i>
Media	1078,22094	1078,22055
Mediana	1107,707	1108,152
Moda	1043,676	1147,544
Desviación estándar	152,818873	153,887243
Rango	692,287	705,055
Mínimo	697,436	692,074
Máximo	1389,723	1397,129
Suma	1212998,56	1212998,12
Cuenta	1125	1125

Complementariamente, el ajuste del modelo de regresión múltiple de las alturas del modelo PLEIADES sobre las alturas del modelo LiDAR, arrojó un error residual de 4,343 m y un R^2 de 0,9992, el cual se ajusta linealmente como se aprecia en la Figura 7.

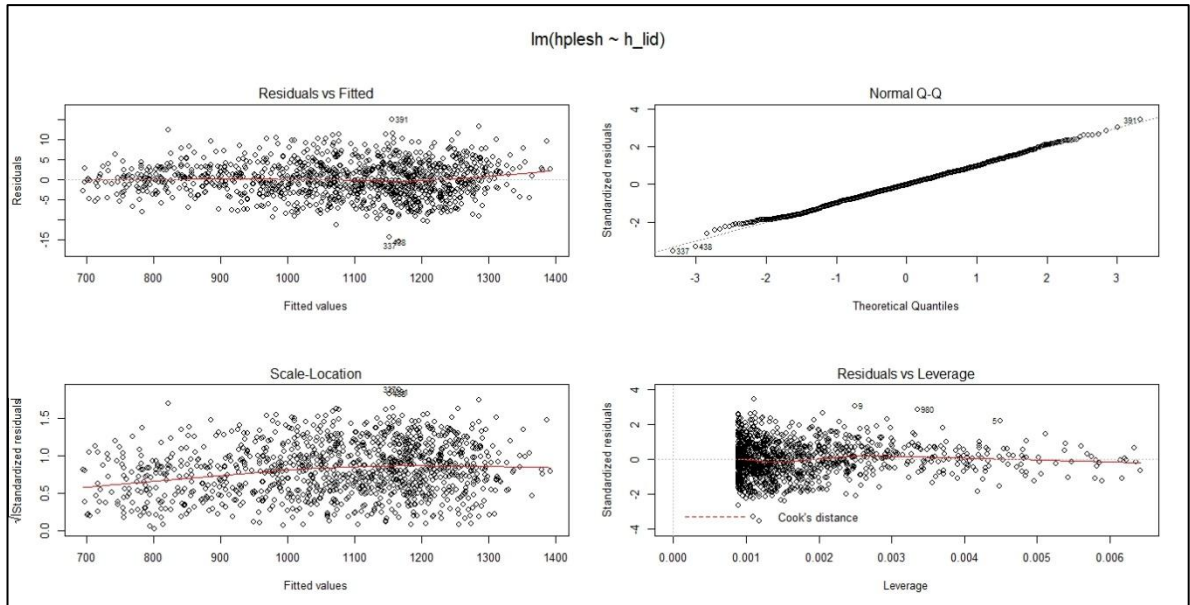


Figura 7: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo PLEIADES sobre las alturas del modelo LiDAR, arriba (izq.) se muestra el diagrama de residuos vs. predichos, arriba (der.) Gráfica cuantil-cuantil de los residuos, abajo (izq.) residuos estandarizados vs. valores predichos. Abajo (der.) residuales estandarizados vs. efecto palanca.

5.2 Evaluación de productos a 30 m

La figura 8 muestra los cuatro modelos evaluados con resolución espacial de 30 m, el primero el DTM LiDAR con alturas fluctuantes entre 697,737 y 1.390,989 m; el segundo gráfico DEM ASTER con alturas entre 679,833 y 1.385,927 m; el tercer gráfico DEM SRTM muestra las alturas entre los 682,325 y 1.386,440 m y el cuarto gráfico DTM PLEIADES entre 691,776 y 1.397,751 m.

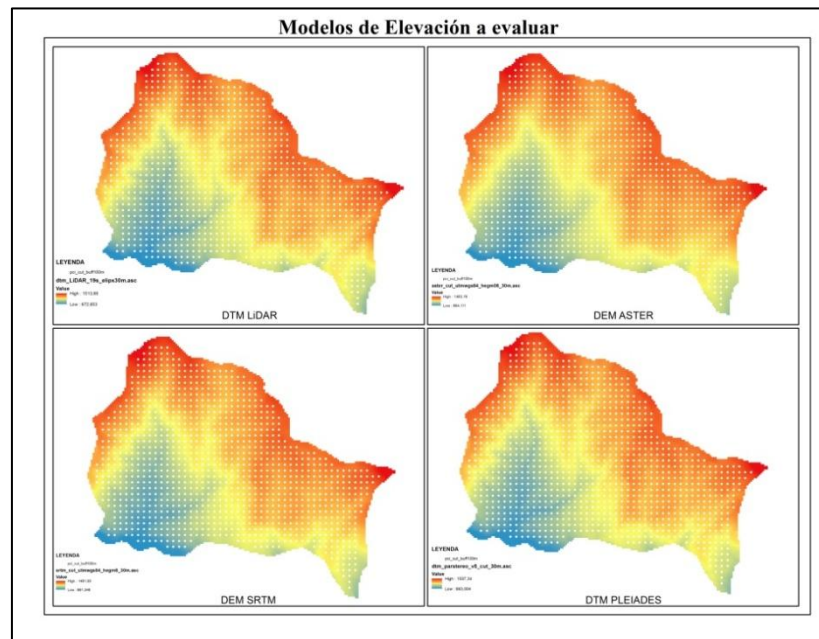


Figura 8: Modelos de elevación a evaluar, arriba (izq.) DTM LiDAR, arriba (der.) DEM ASTER, abajo (izq.) DEM SRTM, abajo (der.) DTM PLEIADES.

La tabla 8 resume los estadísticos descriptivos de las alturas de los modelos con resolución espacial de 30 m siendo el modelo LiDAR el de referencia con respecto a los otros modelos obtenidos: DEM ASTER, SRTM y PLEIADES. Se observa que las alturas promedios son de 1.080,371 m, 1.069,669 m, 1.071,199 m y 1.080,373 m respectivamente, mientras las desviaciones estándar son de 152,566 m, 152,360 m, 153,387 m y 153,693 m, entre otros.

Tabla 8: Estadística descriptiva de altura de DEMs.

	<i>LiDAR 30m</i>	<i>ASTER 30m</i>	<i>SRTM 30m</i>	<i>PLEIADES 30m</i>
Media	1080,371	1069,669	1071,199	1080,373
Mediana	1109,406	1099,599	1100,745	1109,347
Desviación estándar	152,566	152,601	153,387	153,693
Varianza de la muestra	23276,309	23287,043	23527,676	23621,627
Rango	693,252	706,094	704,115	705,975
Mínimo	697,737	679,833	682,325	691,776
Máximo	1390,989	1385,927	1386,440	1397,751
Suma	1215417,670	1203378,065	1205099,312	1215419,649
Cuenta	1125	1125	1125	1125

La tabla 9 muestra las diferencias de altura entre DTM LiDAR y los otros modelos a evaluar: ASTER, SRTM Y PLEIADES, con un error promedio de 10,702 m, 9,172 m y 1,028 m para cada uno de ellos; mientras que el error promedio absoluto es de 12,283 m, 9,628 m y 3,409 m respectivamente; el error medio cuadrático de 14,555 m, 11,034 m y 4,140 m. Además podemos apreciar que los RMSE tanto para ASTER como para SRTM son significativamente mayores que el RMSE del DTM PLEIADES, esto se debe a que dichos modelos corresponden a modelos de superficie y no de terreno, siendo la altura de dosel promedio de 8,5 m, dicha altura se encuentra incluida en los DSM ASTER y SRTM por tal razón sus alturas son mayores que a los DTMs LiDAR como PLEIADES.

Tabla 9: Errores promedios de alturas y error medio cuadrático de DEMs ASTER, SRTM y DTM PLEIADES. Donde $\Delta Z 30 m$ = la diferencia de alturas del modelo LiDAR con ASTER, SRTM y PLEIADES.

<i>Delta Z 30 m</i>	<i>LiDAR-ASTER</i>	<i>LiDAR-SRTM</i>	<i>LiDAR-PLEIADES</i>
Promedio del error	10,702	9,172	1,028
Promedio absoluto del error	12,283	9,628	3,409
RMSE 30m	14,555	11,034	4,140

La tabla 10 muestra el ajuste del modelo de regresión múltiple de las alturas de los modelos ASTER, SRTM y PLEIADES sobre las alturas del modelo LiDAR, El menor error estandarizado esta dado por el DEM PLEIADES de 3,866 m, luego el SRTM con 6,1 m para terminar con el SRTM con 9,87 m. Su coeficiente de determinación ajustado R^2 muestra su mayor ajuste, siendo de 0,9994 para el modelo explicado por el modelo PLEIADES. Mostrando en sus tres casos un buen ajuste lineal, sus gráficos explicativos se muestran en las figuras 9, 10 y 11.

Tabla 10: Errores residuales estandarizados y R^2 de DEMs a 30 m. Donde $\ln(y \sim x)$ = modelo lineal entre la variable respuesta o independiente y en función de la variable regresora o dependiente x .

Regresión lineal alturas DEMs	$\ln(\text{ASTER} \sim \text{LiDAR})$	$\ln(\text{SRTM} \sim \text{LiDAR})$	$\ln(\text{PLEIADES} \sim \text{LiDAR})$
Error residual estandarizado	9,87	6,1	3,866
R^2	0,9958	0,9984	0,9994

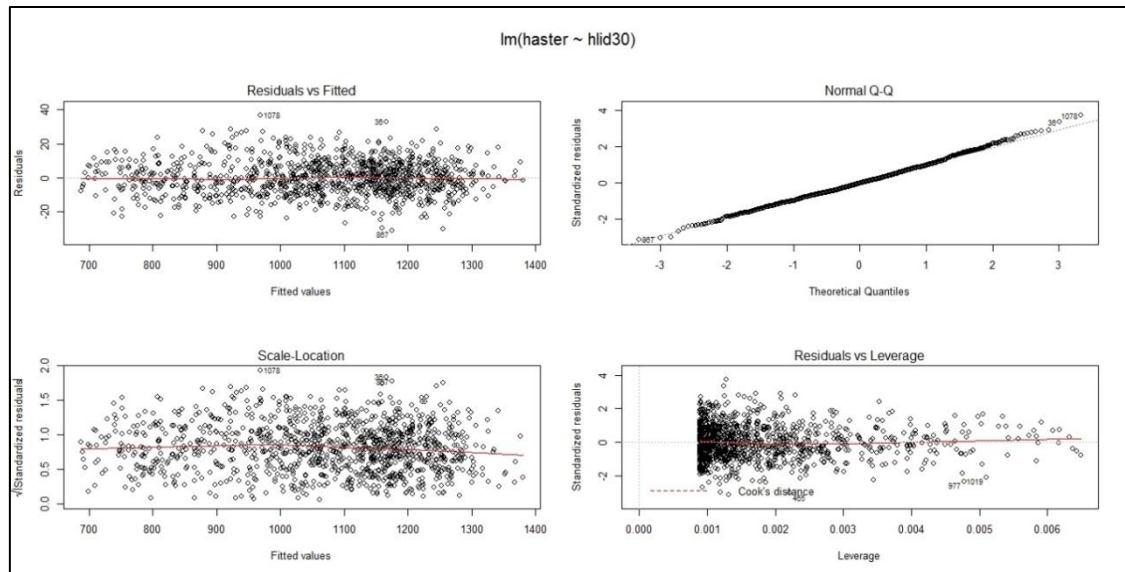


Figura 9: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo ASTER sobre las alturas del modelo LiDAR, arriba (izq.) se muestra el diagrama de residuos vs. predichos, arriba (der.) Gráfica cuantil-cuantil de los residuos, abajo (izq.) residuos estandarizados vs. valores predichos. Abajo (der.) residuos estandarizados vs. efecto palanca.

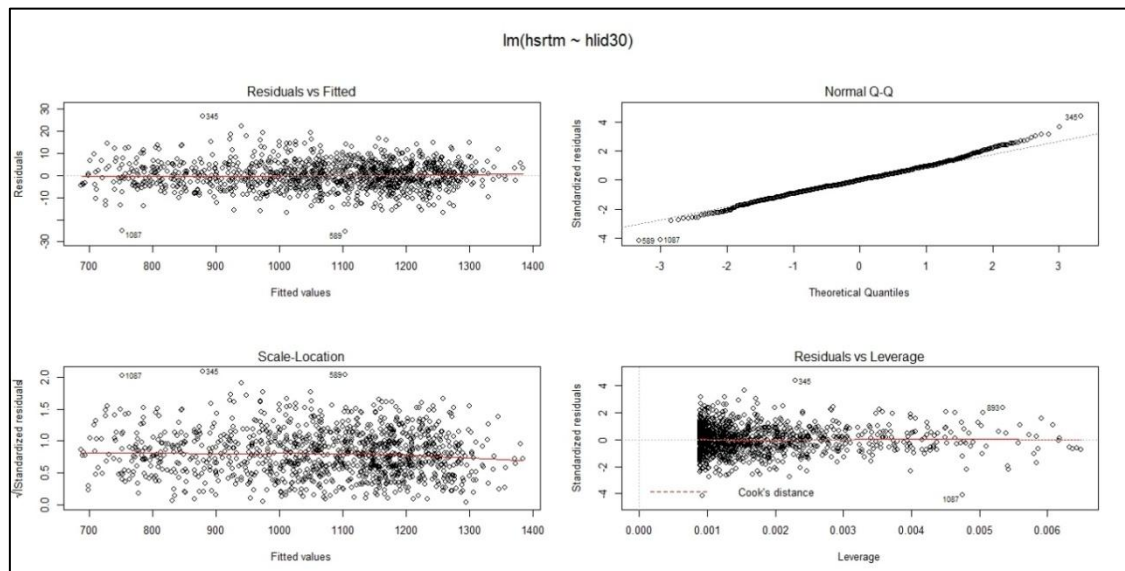


Figura 10: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo SRTM sobre las alturas del modelo LiDAR, arriba (izq.) se muestra el diagrama de residuos vs. predichos, arriba (der.) Gráfica cuantil-cuantil de los residuos, abajo (izq.) residuos estandarizados vs. valores predichos. Abajo (der.) residuos estandarizados vs. efecto palanca.

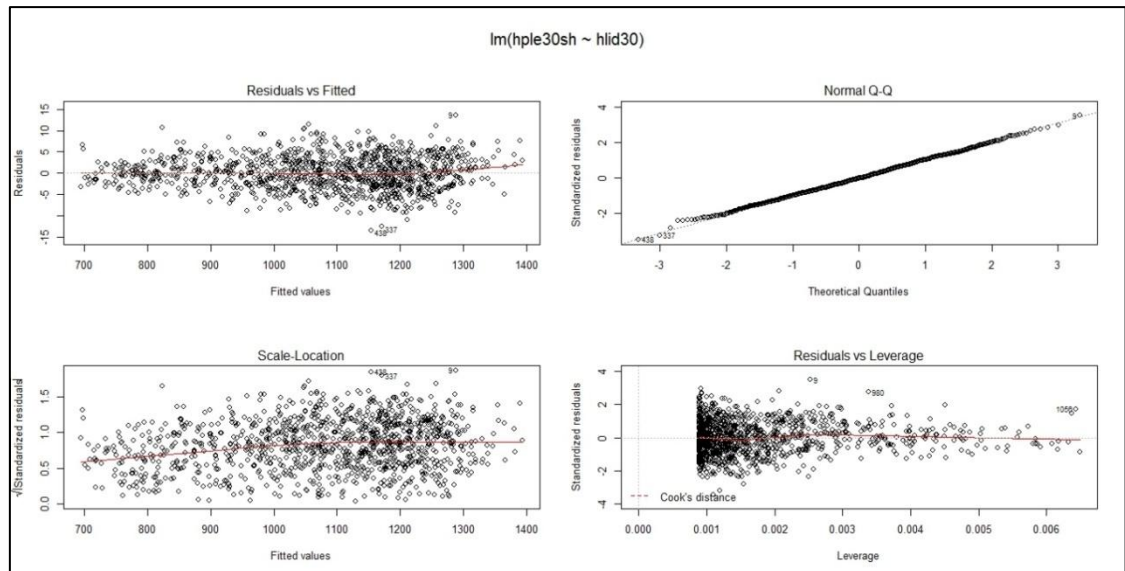


Figura 11: Gráficas de diagnóstico regresión lineal simple de las alturas del modelo PLEIADES sobre las alturas del modelo LiDAR, arriba (izq.) se muestra el diagrama de residuos vs. predichos, arriba (der.) Gráfica cuantil-cuantil de los residuos, abajo (izq.) residuos estandarizados vs. valores predichos. Abajo (der.) residuales estandarizados vs. efecto palanca.

La tabla 11 presenta la matriz de correlaciones de las alturas de los modelos de resolución espacial de 30 m, se aprecia una buena correlación entre ellos, lo que queda evidenciado con sus R^2 cercanos a 1 (ver figura 12).

Tabla 11: Matriz de correlaciones.

	<i>ASTER</i>	<i>LiDAR</i>	<i>PLEIADES</i>	<i>SRTM</i>
<i>ASTER</i>	1	0,997908	0,9976665	0,9989217
<i>LiDAR</i>	0,997908	1	0,9996839	0,9992096
<i>PLEIADES</i>	0,9976665	0,9996839	1	0,999179
<i>SRTM</i>	0,9989217	0,9992096	0,999179	1

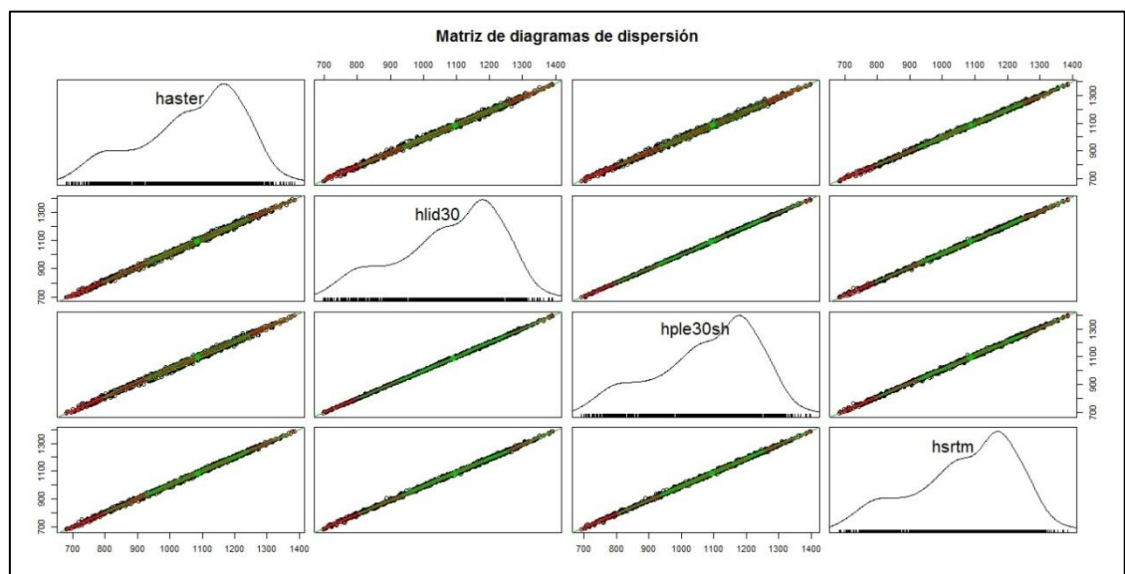


Figura 12: Gráficas de matriz de diagrama de dispersión entre los DEMs ASTER, LiDAR, PLEIADES y SRTM.

5.3 Evaluación de la exactitud planimétrica

La figura 13 muestra los puntos digitalizados descritos en el apartado 4.2.1 de la metodología, en azul los puntos sobre la imagen de resolución espacial de 50 cm ortorectificada con el modelo LiDAR, en amarillo los puntos sobre la imagen de resolución espacial de 50 cm ortorectificada con modelo PLEIADES.

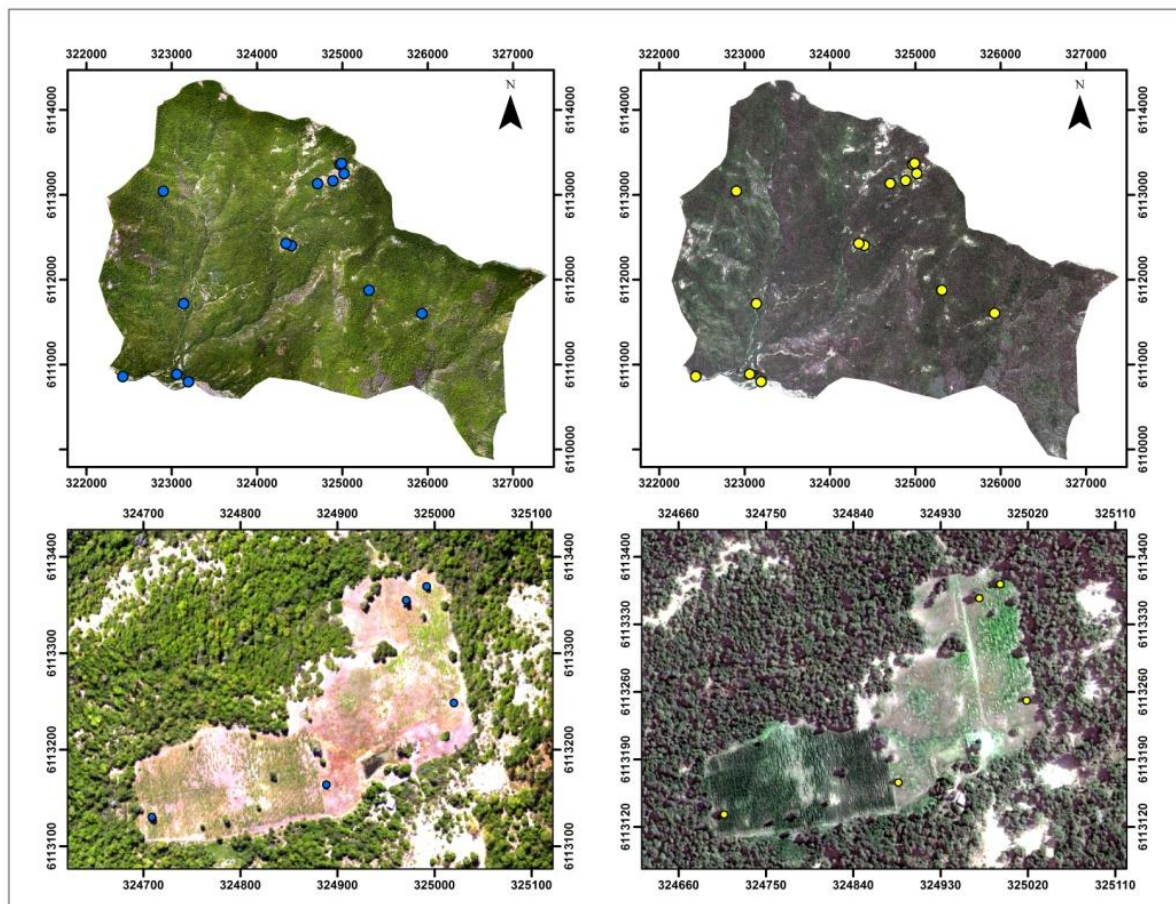


Figura 13: Puntos de árboles homólogos en imagen LiDAR a la izquierda y PLEIADES a la derecha.

La tabla 12 muestra las coordenadas de la posición de los puntos de ambas imágenes a evaluar, sus residuos en las coordenadas este = x y los residuos de las coordenadas norte = y . para obtener un promedio del error en la coordenada este de -1,712 m y en la coordenada norte de 1,947 m, con un error medio cuadrático de 2,005 m en la coordenada este y de 2,079 m en la coordenada norte.

Tabla 12: Evaluación del error planimétrico.

punto	Imagen con LiDAR		Imagen con PLEIADES		Delta		x ²	y ²
	Coordenadas		Coordenadas		x			
	este	norte	este	norte	delta este	delta norte		
1	323061,557	6110885,532	323058,742	6110886,559	-2,815	1,027	7,924	1,055
2	322428,807	6110857,554	322426,125	6110859,748	-2,682	2,194	7,193	4,814
3	323195,600	6110795,709	323191,871	6110796,780	-3,729	1,071	13,905	1,147
4	325313,619	6111874,137	325312,512	6111875,746	-1,107	1,609	1,225	2,589
5	324708,753	6113130,327	324707,015	6113132,993	-1,738	2,666	3,021	7,108
6	324888,553	6113163,900	324886,524	6113166,019	-2,029	2,119	4,117	4,490
7	325020,089	6113248,514	325018,696	6113250,880	-1,393	2,366	1,940	5,598
8	324970,922	6113354,963	324969,927	6113357,002	-0,995	2,039	0,990	4,158
9	324991,926	6113369,283	324991,567	6113371,640	-0,359	2,357	0,129	5,555
10	324403,046	6112399,592	324402,635	6112402,311	-0,411	2,719	0,169	7,393
11	324339,410	6112424,691	324337,172	6112426,370	-2,238	1,679	5,009	2,819
12	323140,889	6111716,383	323138,092	6111716,942	-2,797	0,559	7,823	0,312
13	325932,422	6111599,847	325930,744	6111603,204	-1,678	3,357	2,816	11,269
14	322902,143	6113041,810	322902,143	6113043,302	0,000	1,492	0,000	2,226
						Sumatoria	56,262	60,533
						Promedio del error	-1,712	1,947
						RMSE	2,005	2,079

5.4 Evaluación del comportamiento espacial del error

El comportamiento espacial del error de elevación del DTM PLEIADES mediante la herramienta de auto correlación espacial (I de Moran), arrojó un valor de $P = 0$ lo que implica que la probabilidad de que se cumpla la hipótesis que los valores de error se distribuyan de manera aleatoria es prácticamente nula, el valor del índice de moran de 0,35 al ser positivo indica que el error tiene cierto grado de agrupación en el espacio, y su valor de *z-score* de 16,46 permiten inferir que existe menos del 1% de probabilidad de que el patrón de agrupación sea resultado del azar, por tanto existe suficiente evidencia estadística para afirmar que los datos de diferencias de alturas siguen un patrón de distribución agrupado y se rechaza la hipótesis nula que las entidades están distribuidas de manera aleatoria a lo largo del área de estudio. En la figura 14 se aprecia que la distribución espacial de los valores altos y los valores bajos está más agrupada espacialmente de lo que se esperaría si los procesos espaciales subyacentes fueran aleatorios. Muestra destacado en rojo las desviaciones estándares de los errores *z* agregados.

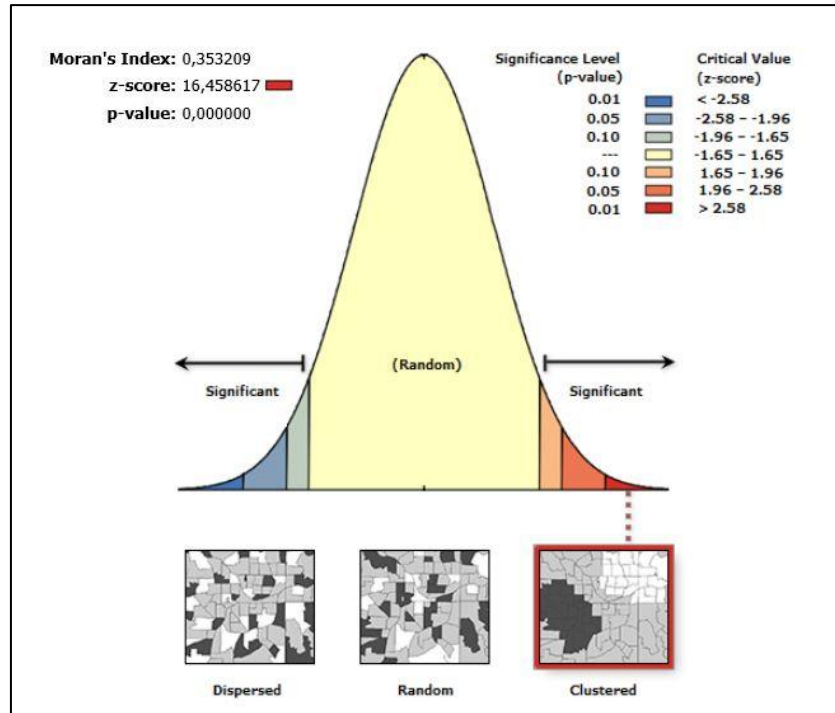


Figura 14: Reporte auto correlación espacial I de Moran (ARCGIS).

Complementariamente se realizó un análisis de puntos calientes (G_i^* de Getis-Ord). La figura 15 indica donde se agrupan espacialmente los errores mas negativos en rojo y más positivos en azul. Mostrando claramente la agregación de los errores de altura tanto para el DEMs ASTER, SRTM como PLEIADES.

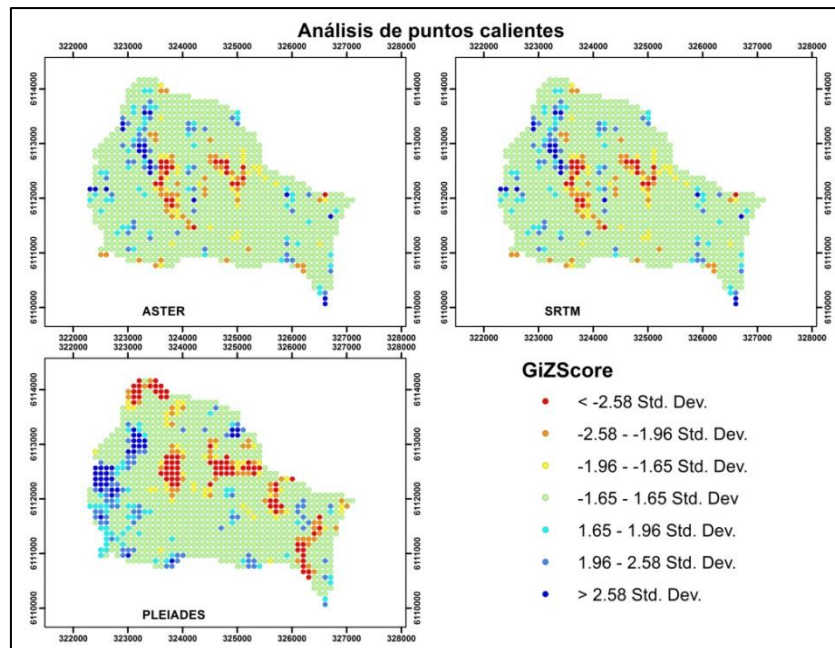


Figura 15: Análisis de puntos calientes, arriba (izq.) desviaciones estándares del error Z para ASTER, arriba (der.) desviaciones estándares del error Z para SRTM, abajo desviaciones estándares del error Z para PLEIADES.

5.5 Análisis de relación entre el error y las variables morfométricas

La figura 16 muestra la expresión espacial de las variables morfométricas obtenidas, para realizar el análisis de la correlación con el error Z entre LiDAR y PLEIADES. El análisis se realizó para la mayor resolución espacial de los datos.

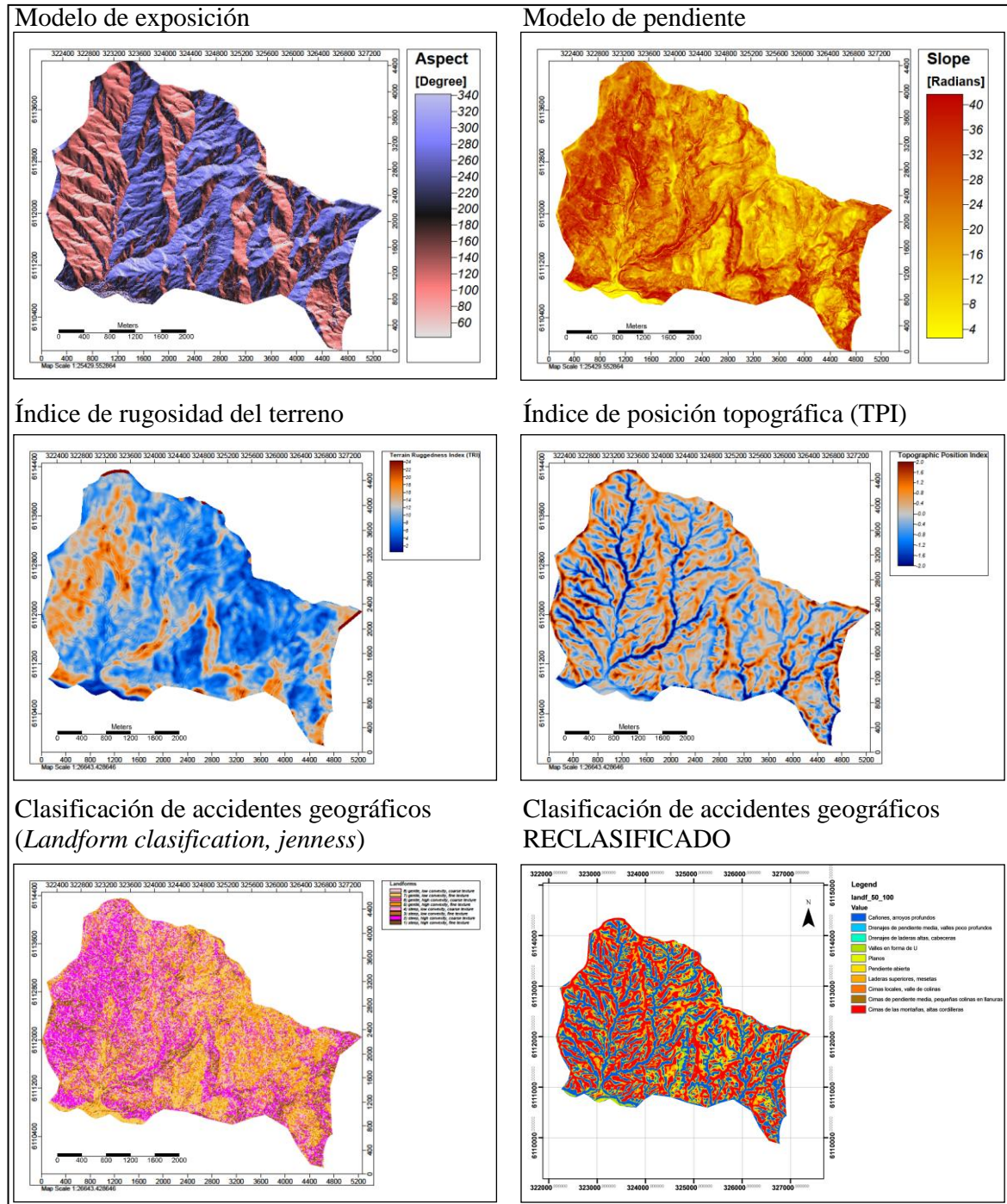


Figura 16: Índices y modelos morfométricos.

La tabla 13 muestra las correlaciones simples entre los errores y las variables de convexidad, curvatura total, altura del dosel, clasificación de accidentes geográficos (*Landformat*), pendiente, orientación, clasificación de la posición de pendiente (*SPI*), índices de posición topográfica (*TPI*) e índices de rugosidad del terreno (*TRI*). Se puede apreciar que existe una baja correlación entre las variables de convexidad, curvatura total, clasificación de accidentes geográficos y clasificación de pendiente al presentar valores cercanos a 0 (0,083, 0,086, 0,09 y 0,06 respectivamente), existe una correlación negativa tanto para la altura del dosel y la orientación (-0,54 y -0,184), presenta una correlación positiva para el índice de rugosidad, pendiente e índice de posición topográfica (0,2, 0,14 y 0,12).

Tabla 13: Matriz de correlación

	<i>Convexidad</i>	<i>Curvatura T.</i>	<i>Altura Dosel</i>	<i>Landformat</i>	<i>Error z</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Orientación</i>	<i>SPI</i>	<i>TPI 1m</i>	<i>TPI 100m</i>	<i>TRI</i>
Error z	0,083	0,086	-0,539	0,091	1	0,141	-0,184	0,061	0,12	0,12	0,2

6. CONCLUSIONES

Al comparar los modelos con resolución espacial de 1 m, el error estandarizado de las alturas entre LiDAR y PLEIADES es de 4,313 m y un R^2 de 0,9992. Por otra parte, al evaluar el error con una resolución espacial de 30 m, PLEIADES es el modelo con menor error residual estandarizado (3,866 m), le sigue el DEM SRTM con 6,1 m y finalmente se encuentra DEM ASTER con 9,87 m. De igual manera sus R^2 se ajustan bien linealmente y son buenos estimadores teniendo correlaciones en todo sus casos cercana a 1.

Los errores medios cuadráticos de la exactitud planimétrica de las imágenes PLEIADES es de 2 m, lo que permite validar la exactitud de los modelos para escalas de trabajo que no superen la de 1: 8.000 sin puntos de control que ajusten los valores de altura como de posición. Para lograr bajar estos errores y mejorar el resultado tanto de modelos de superficies como de las imágenes ortorectificadas se debería utilizar dentro del proceso de extracción del modelo, puntos de control que permiten ajustar la posición y altura.

Al evaluar la matriz de correlación del error de las alturas del modelo LiDAR y PLEIADES, contrastados con las variables geomorfológicas, existe una baja correlación entre las variables de convexidad, curvatura total, clasificación de accidentes geográficos y clasificación de pendiente al presentar valores cercanos a 0. Sin embargo, existe una correlación negativa tanto para la altura del dosel como la orientación (-0,54 y -0,184). También se observa una correlación positiva con el índice de rugosidad, la pendiente y el índice de posición topográfica (0,2, 0,14 y 0,12). Por lo tanto, se puede establecer que el error entre los modelos evaluados se relaciona más con la presencia de vegetación, sobre todo en terrenos más planos, que con la topografía (variables geomorfológicas básicas).

La alta resolución temporal, la capacidad de barrido (20 km), su resolución espacial de 1 m y 50 cm en las imágenes multiespectrales y pancromáticas de los productos PLEIADES, permiten su implementación en el análisis y trabajo con DEMs dentro de tareas forestales, civiles y otros sectores. Ello permite considerar a las imágenes PLEIADES como una buena alternativa al momento de evaluar opciones de observación remota para análisis posteriores. La máxima escala de trabajo estará limitada por el uso de puntos de control tanto planimétrico como vertical en función de la disminución de los errores medios cuadráticos por ejemplo a 0,25 m, lo cual permitiría trabajar a una escala de mapa de 1:1.000.

El comportamiento espacial de los errores obtenidos, responde principalmente a las variables de pendiente y cobertura vegetal, por lo que para una mayor calidad de los modelos PLEIADES, se recomienda el uso de puntos o vectores de control en sectores con estas características dentro de las áreas de interés. Esto es, priorizar los puntos de control en sectores con mayor cobertura arbórea y de mayores pendientes.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ackermann, F., 1994.** Digital Elevation Models – Techniques and Application, Quality Standards, Development. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 30(4): pp. 421-432.
- Beltsavias, E. 1999.** A Comparison between photogrammetry and láser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 54, pp. 83-94.
- Cuartero, A. y Felicísimo, A. 2003.** Rectificación y ortorectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión, Geofocus, pp. 3, 1, 45-58.
Disponible en <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards/projects/accuracy/part3/chapter3>
- Ernst, I. y Hirschmüller, H. 2008.** Mutual Information based Semi-Global Stereo Matching on the GPU. 4th International Symposium on Visual Computing (ISVC08), Las Vegas, NV, USA. [Consulta: 26-11-2013]. Disponible en <http://www.robotic.dlr.de/fileadmin/robotic/hirschmu/isvc08hh.pdf>
- ERSDAC, 2003.** Aster reference Guide Version 1.0. Earth Remote Sensing Data Analysis Center, Japan.
- Felicísimo, A. 1994.** Modelos Digitales del Terreno Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. 118 p. [Consulta: 08-07-2013]. Disponible en <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>
- Fernández, T. 2011.** La constelación de satélites Pleiades-HR1 y 2: de la teledetección a la fotogrametría. Congreso de la asociación española de la teledetección. [Consulta: 08-07-2013]. Disponible en http://www.infoterra.es/asset/cms/file/geo_pleiades_fernandezdesevilla.pdf
- Fuentes, J.; Balaños, J. y Rozo, D. 2012.** Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite IKONOS para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. [Consulta: 08-07-2013]. Disponible en <http://www.invemmar.org.co/boletin/ArticulosR.jsp?idVol=112&idRev=1>
- Gajardo, R. 1994.** La Vegetación natural de Chile: Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria, Cornell University. 165 p.
- Greenwalt, C.R. y Schultz, M.E. 1962.** Principles of error theory and cartographic applications. Comité Federal de Datos Geográficos de EEUU. [Consulta: 08-07-2013]. Disponible en <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/tr96>
- Goodchild y Michael F., 1986.** Spatial Autocorrelation. Catmog 47, Geo Books.
- Guisan, A., Weiss, S.B., and Weiss, A.D., 1999,** GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution, Plant Ecology, v.143 pp.107-122
- Hernández, J.; Corvalan, P.; Valencia, D.; Cortés, L. y Acuña, P. 2013.** Tecnología LIDAR en Evaluación y Monitoreo de Recursos Forestales. Laboratorio de Geomática y Ecología del

paisaje, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

Hirschmüller, H. 2005. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp.807-814.

Hirt, C., Filmer, M. S. y Featherstone, W. E., 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER- GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. Australian Journal of Earth Sciences: Volume 57, Issue 3, 2010, pp.337-347.

Hirschmüller, H. 2006. Stereo Vision in Structured Environments by Consistent Semi-Global Matching. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition.

Hodgson, M.; Jensen, J.; Rabber, G.; Tullis, J.; Davis, B.; Thompson, G. y Schuckman, K. 2005. An evaluation of LIDAR derived elevation and terrain slope in leaf – off conditions. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71, pp.817-823.

Hoffmann J. y Walter, D. 2006. How complementary are SRTM-X and -C band Digital Elevation Models? In Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol.72, N°3, March 2006, pp.261-268.

Holmgren, J. 2003. Estimation of forest variables using airborne láser scanning. PhD Thesis. Acta Universitatis. Agriculturae Sueciae, Silvestria 278. Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, sweden.

Jaramillo, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad nacional de Colombia. Medellín. Escuela de Geociencias. 593 p. [Consulta: 13-08-2014] Disponible en <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/11052520.pdf>

Jenness, J., 2006. Topographic position index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x. Jenness Enterprises. <http://www.jennessent.com>.

Koch, B. y Dess, M. 2008. Forest Applications: LIDAR DATA. En: Z. Li, J. Chen and E. Baltsavias, Editors, Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: 2008 ISPRS congress book, Taylor & Francis Group, London ISBN 978-0-415-47805-2,chapter 32. pp.439-465.

Köthe, R., Gehrt, E., Böhner, J., 1996. Automatische reliefanalyse für geowissenschaftliche anwendungen-derzeitiger stand undweiterentwicklungen des programms SARA. arbeitshefte geologie 1, 31–37

Kubik, P.; Pascal V.; Lussy F.; Pausader M. y Latry C. ASPRS. PLEIADES-HR Image Quality Design.

Liu, X. 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. Progress in Physical Geography, 32 (1), pp.31-49.

Lobo, J. y Ulrich, K. 2007. Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 49(1), pp.11-42. [Consulta: 08-07-2013]. Disponible en <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/26331/1/articulo1.pdf>

Lucas, R., Lee, A., Armston, J., Breyer, J., Bunting, P., y Carreiras, J., 2008. Advances in forest characterisation, mapping and monitoring through integration of LIDAR and other remote sensing datasets. En Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LIDAR applications in forest assessment and inventory, Edimburgh, UK, pp. 17-19.

Maclean, G. y Krabill W. 1986, Gross-merchantable timber volumen estimation using an airborne LIDAR system. Canadian Journal of Remote Sensing. 12, pp.7-18.

Meti, 2009. ASTER Global DEM Validation. Ministry of Economy, Trade and Industry de Japón and NASA [Consulta: 08-07-2013]. Disponible en http://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf

Nelson, R.; Krabill, W. y Maclean, G. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne láser data. Remote Sensing of Environment. 15, pp.201-212.

Nelson, R.; Oderwald. R. y Gregoire. T. 1997. Separating the Ground and Airborne Láser Sampling Phases to Estimate Tropical Forest Basal Area, Volume, and Biomass. Remote Sensing of Environment. 60, pp.311-326.

Nelson, A.; Reuter, H.I. y Gessier, P. 2009. DEM Production methods and sources. En: Tomislav Hengl y Hannes I. Reuter (Eds.), Geomorphometry : concepts, software, applications. Elsevier Science, Amsterdam, pp.65-85.

Nilsson, M. 1996. Estimation of tree heights and stand volumen using an airborne LIDAR system. Remote Sensing of Environment.56, pp.1-7.

Oñate F. y Bosque J. 2007. Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. Ed. Martin. pp.457-464. [Consulta: 08-07-2013]. Disponible en http://www.edeca.una.ac.cr/files/SIG%20Forestal/Grupo%202/Lectura_1.pdf

Olaya, V. y Conrad, O., 2009. Geomorphometry in SAGA. En: Hengl, T. y Reuter. H. (Eds.), Geomorphometry, concepts, software, applications (pp. 141-169). Amsterdam-Oxford: Elsevier

Piong, X. 2003. Digital elevation Model Extraction from ASTER in support of coal fire and environmental research Project, China, MSc. Thesis, ITC, Holland. [Consulta: 29-08-2013]. Disponible en http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/ereg/xiong_ping.pdf

Riley, S.J. 1998. Integration of environmental, biological, and human dimensions for management of mountain lions (*Puma concolor*) in Montana. Ph. D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, NY.

Rozas, D.; Rebolledo C. y Gutiérrez, Z.P. 2010. Evaluación de la calidad de los DEM SRTM y ASTER en una cuenca costera de la Región de la Araucanía, bajo distintas condiciones de relieve y cobertura vegetal. Latin American Remote Sensing Week, LARS ISPRS.

Suet, C. y Lam, Y. 2004. Comparison of flow routing algorithms used in Geographic Information System. University of Southern California, Faculty of the Graduate School. 97 p. [Consulta: 13-08-2014] Disponible en [ftp://www.lwr.kth.se/Common/UllaM/For_Imran/\[2004\]%20lam%20-%20comparison%20of%20flow%20routing%20algorithms%20used%20in%20geographic%20information%20systems.pdf](ftp://www.lwr.kth.se/Common/UllaM/For_Imran/[2004]%20lam%20-%20comparison%20of%20flow%20routing%20algorithms%20used%20in%20geographic%20information%20systems.pdf)

Tagil S. and Jenness J., 2008. GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms around the Yazoren Polje, Turkey, Journal of Applied Sciences 8 (6): 910-921, ISSN 1812-5654, Asian Network for Scientific Information.

USGS, United States Geological Survey, 2005b. Shuttle Radar Topography Mission. [Consulta: 29-08-2013]. Disponible en <http://srtm.usgs.gov>

Wehr A. y Lohr U., 1999. Airborne laser scanning an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 54, pp. 68-82.

Weiss, A., 2001. Topographic position and landforms analysis. Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.

Wolf, P. y Dewitt, B. 2000. Elements of photogrammetry with applications in GIS. Third edition. Editorial Mc. GrawHill. pp.394- 01.

Zevenbergen, L. y Thorne, C. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms, 12, pp.47-56. [Consulta: 13-08-2014] Disponible en http://solim.geography.wisc.edu/axing/teaching/geog579/lectures/references/ZevenbergenAndThorne_DigitalTerrain_EarthSurfaceProcesses1987.pdf

8. ANEXOS

ANEXO 1

The Autotie Summary Report

Image Pattern	Image ID	Number of Intended Points	Number of Points Found	Number of Patterns	Point Success Rate
	1	30	31	25	100.00%
72.00%	dim_phrla_p_201301251447176_sen_601585101-001				
	2	30	31	25	100.00%
72.00%	dim_phrla_p_201301251447530_sen_601584101-001				

Average Point Success Rate: 100.00%
 Average Pattern Success Rate: 72.00%
 Total unique tie points found: 31

ANEXO 2

Triangulation Report With LPS

The output image x, y units: pixels
 The output ground X, Y, and their residual units: meters
 The output ground Z and its residual units: meters

Input Image Coordinates

		Image ID = 1	
Point ID	x	y	
1	11139.518	3988.178	
2	21814.084	3915.870	
3	495.224	4381.675	
4	1077.825	5068.710	
5	8868.182	4820.205	
6	11296.368	4296.236	
7	14770.573	4125.472	
8	18689.387	4682.564	
9	21770.885	5107.276	
10	14086.725	7092.563	
11	4812.949	8045.797	
12	7865.599	7562.768	
13	10472.554	7778.047	
14	11218.075	7808.083	
15	14210.804	7949.858	
16	13417.431	8140.294	
17	14612.753	7574.188	
18	17493.867	7657.774	
19	2251.214	11131.820	
20	3915.599	11466.680	
21	20154.104	11609.990	
22	4108.351	13832.237	
23	3650.816	14609.093	
24	8827.831	14571.441	
25	14203.866	15039.516	
26	21877.994	15128.649	
27	6332.587	16264.210	
28	9709.089	15977.205	
29	13499.987	15437.078	
30	15029.488	15459.404	
31	21753.264	17658.744	

Initial values of correction parameters

a[0]=0
b[0]=0

Image ID = 2

Point ID	x	y
1	11375.471	3339.771
2	22376.955	2141.157
3	497.048	4418.040
4	1124.547	4940.506
5	9124.408	4035.522
6	11541.240	3613.998
7	15068.869	3299.992
8	19140.906	3306.400
9	22320.645	3382.613
10	14390.539	6234.045
11	4997.922	7463.768
12	8110.745	6806.102
13	10745.710	6969.108
14	11505.169	6959.601
15	14530.207	7034.485
16	13739.208	7199.304
17	14923.130	6701.396
18	17842.252	6685.878
19	2289.663	11113.950
20	3986.604	11362.729
21	20664.016	10054.704
22	4228.579	13559.527
23	3769.759	14339.719
24	9028.790	14090.437
25	14484.201	14353.707
26	22422.643	13496.444
27	6576.335	15569.877
28	9963.419	15314.590
29	13801.738	14653.299
30	15326.499	14724.042
31	22243.680	16277.059

Initial values of correction parameters

a[0]=0
b[0]=0

Warning! Image 1 has no GCPs! Here weighted parameters are used with 10 times of image standard deviation.

Warning! Image 2 has no GCPs! Here weighted parameters are used with 10 times of image standard deviation.

OUTPUT OF BUNDLE BLOCK REFINEMENT

iteration number = 1 unit-weight standard error = 0.1393
maximum correction of the object points =0.54083

iteration number = 2 unit-weight standard error = 0.1393
maximum correction of the object points =0.00004

Final adjustment parameters

Image ID = 1
a[0]=-0.23386
b[0]=0.31245
Image ID = 2
a[0]=-0.033333
b[0]=0.019279

Object point coordinates

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	324497.7879	6115516.0892	915.1642	2
2	330258.7325	6115976.0350	1794.4290	2
3	318840.3579	6114996.7013	663.8070	2
4	319191.1859	6114687.2042	857.8247	2
5	323370.7395	6115085.2856	1259.8843	2
6	324589.9705	6115366.1458	952.6556	2
7	326411.9580	6115537.7562	922.9124	2
8	328566.0546	6115436.7121	1439.2917	2
9	330235.7921	6115343.4756	1726.4228	2
10	326098.0398	6113992.3366	1016.0382	2
11	321265.2351	6113299.8128	1249.1039	2
12	322875.9981	6113636.6080	1289.4510	2
13	324233.2214	6113573.4816	1188.2182	2
14	324627.0541	6113577.9008	1194.0129	2
15	326184.7913	6113561.9966	1087.8865	2
16	325784.9293	6113458.2433	1177.0668	2
17	326377.1661	6113752.5226	1000.9491	2
18	327883.9626	6113773.2290	948.1517	2
19	319835.8032	6111517.9677	629.7702	2
20	320719.8774	6111388.2314	638.4224	2
21	329432.1635	6111898.7983	1590.4081	2
22	320889.9445	6110201.1468	864.2574	2
23	320662.5403	6109789.4470	891.0773	2
24	323381.6611	6109934.6883	837.6891	2
25	326204.1730	6109817.9279	762.5252	2
26	330373.4782	6110113.3697	1579.8150	2
27	322170.2460	6109071.0741	1308.1225	2
28	323896.6005	6109260.6396	1034.0357	2
29	325870.3447	6109625.3477	948.0147	2
30	326645.4970	6109623.5085	776.2922	2
31	330279.0502	6108735.2084	1232.9719	2

Total number of object points = 31

Image point residuals

Point	Image	Vx	Vy
1	1	-0.138	-0.033
1	2	0.137	0.034
Point	Image	Vx	Vy
2	1	0.000	0.000
2	2	-0.000	-0.000
Point	Image	Vx	Vy
3	1	-0.358	-0.087
3	2	0.356	0.087
Point	Image	Vx	Vy
4	1	-0.078	-0.019
4	2	0.078	0.019
Point	Image	Vx	Vy
5	1	-0.049	-0.012
5	2	0.048	0.012
Point	Image	Vx	Vy
6	1	-0.154	-0.037
6	2	0.153	0.037
Point	Image	Vx	Vy
7	1	-0.158	-0.038
7	2	0.158	0.038
Point	Image	Vx	Vy
8	1	0.016	0.004
8	2	-0.016	-0.004
Point	Image	Vx	Vy
9	1	0.046	0.011

9	2	-0.046	-0.011
Point	Image	Vx	Vy
10	1	-0.025	-0.006
10	2	0.025	0.006
Point	Image	Vx	Vy
11	1	-0.155	-0.038
11	2	0.154	0.038
Point	Image	Vx	Vy
12	1	-0.225	-0.055
12	2	0.224	0.055
Point	Image	Vx	Vy
13	1	-0.163	-0.040
13	2	0.162	0.040
Point	Image	Vx	Vy
14	1	-0.081	-0.020
14	2	0.081	0.020
Point	Image	Vx	Vy
15	1	-0.000	-0.000
15	2	0.000	0.000
Point	Image	Vx	Vy
16	1	-0.060	-0.015
16	2	0.059	0.014
Point	Image	Vx	Vy
17	1	-0.075	-0.018
17	2	0.075	0.018
Point	Image	Vx	Vy
18	1	-0.115	-0.028
18	2	0.115	0.028
Point	Image	Vx	Vy
19	1	0.061	0.015
19	2	-0.061	-0.015
Point	Image	Vx	Vy
20	1	0.061	0.015
20	2	-0.060	-0.015
Point	Image	Vx	Vy
21	1	0.088	0.021
21	2	-0.087	-0.021
Point	Image	Vx	Vy
22	1	0.013	0.003
22	2	-0.013	-0.003
Point	Image	Vx	Vy
23	1	0.012	0.003
23	2	-0.012	-0.003
Point	Image	Vx	Vy
24	1	0.055	0.014
24	2	-0.055	-0.013
Point	Image	Vx	Vy
25	1	0.178	0.044
25	2	-0.177	-0.043
Point	Image	Vx	Vy
26	1	0.253	0.062
26	2	-0.252	-0.062
Point	Image	Vx	Vy
27	1	0.014	0.003
27	2	-0.014	-0.003
Point	Image	Vx	Vy
28	1	0.154	0.038
28	2	-0.153	-0.037
Point	Image	Vx	Vy
29	1	0.103	0.025
29	2	-0.102	-0.025
Point	Image	Vx	Vy
30	1	-0.050	-0.012

30	2	0.049	0.012
Point	Image	Vx	Vy
31	1	0.828	0.203
31	2	-0.825	-0.201

ANEXO 3

DTM Extraction Report
Date Created: 07/25/16
Time Created: 19:25:49

DTM PROJECT INFORMATION

Block File Used: blk4.blk
Block File Location: e:/project_tesis_2016_erdas/blk_forest_erdas_v4/
Image Pair Used: dim_phrla_p_201301251447176_sen_601585101-
001_dim_phrla_p_201301251447530_sen_601584101-001
DTM Correlation Time (seconds): 1624
Points Per Second: 1573.090
DTM Generation Time (seconds): 830
Total Processing Time : 40 mins 54 secs
DTM Type: DEM
DTM Name:
e:/project_tesis_2016_erdas/blk_forest_erdas_v4/dtmdim_phrla_p_201301251447176_sen_601585101-001_dim_phrla_p_201301251447530_sen_601584101-001.img
Number of Columns: 12411
Number of Rows: 9267
Cell Width: 1.000 meters
Cell Height: 1.000 meters
Projection: UTM
Spheroid: WGS 84
Datum: WGS 84
Horizontal Units: meters
Vertical Units: meters
Upper left DEM corner coordinates: (318556.1687, 6117211.9666)
Lower right DEM corner coordinates: (330966.1687, 6107945.9666)
Minimum Mass Point Elevation: 603.5827
Maximum Mass Point Elevation: 1794.4290
Mean Mass Point Elevation: 1105.1509
Adaptive ATE
Stop at pyramid: 0
Minimum correlation threshold: 0.3000
Strategy Parameter Settings:
Region Description: Default Region
Name of Strategy Used: Middle Mountains
List All of the Strategy Parameter Values Used:
Search Size: 21 x 3
Allow Adaptive Change: No
Correlation Size: 7 x 7
Allow Adaptive Change: No
Coefficient Limit: 0.8000
Allow Adaptive Change: No
Topographic Type: Mountains
Object Type: Forest
Use Image Band: 1
DTM Filtering: High
Region elevation range: 603.0000 to 1794.4290

Project elevation range: 603.0000 to 1794.4290

ACCURACY INFORMATION

General Mass Point Quality:
Excellent % (1-0.85): 56.1056 %
Good % (0.85-0.70): 40.5934 %
Fair % (0.70-0.5): 3.2998 %

Isolated %: 0.0000 %
 Suspicious %: 0.0012 %
 Global Accuracy:
 Vertical Accuracy:
 Total # of 3D Reference Points Used: 31
 Minimum, Maximum Error: -0.9160, 2.7463
 Mean Error: 0.2253
 Mean Absolute Error: 0.5202
 Root Mean Square Error (RMSE): 0.7733
 Absolute Linear Error 90 (LE90): 1.2988
 NIMA Absolute Linear Error 90: 1.2177

Block Tie Point to DTM Vertical Accuracy

Total # of Tie Points Used: 31
 Minimum, Maximum Error: -0.9160, 2.7463
 Mean Error: 0.2253
 Mean Absolute Error: 0.5202
 Root Mean Square Error: 0.7733
 Absolute Linear Error 90: 1.2988
 NIMA Absolute Linear Error 90: 0.9419

Detailed Point Accuracy Information:

Pt.ID	X	Y	Z	DTM Z	Residual
1	324497.7879	6115516.0892	915.1642	915.2847	0.1205
2	330258.7325	6115976.0350	1794.4290	1794.0581	-0.3710
3	318840.3579	6114996.7013	663.8070	665.1058	1.2988
4	319191.1859	6114687.2042	857.8247	859.1551	1.3304
5	323370.7395	6115085.2856	1259.8843	1259.3858	-0.4985
6	324589.9705	6115366.1458	952.6556	952.4888	-0.1668
7	326411.9580	6115537.7562	922.9124	923.1306	0.2182
8	328566.0546	6115436.7121	1439.2917	1438.6832	-0.6085
9	330235.7921	6115343.4756	1726.4228	1725.8043	-0.6184
10	326098.0398	6113992.3366	1016.0382	1016.1832	0.1451
11	321265.2351	6113299.8128	1249.1039	1248.6912	-0.4127
12	322875.9981	6113636.6080	1289.4510	1290.2344	0.7834
13	324233.2214	6113573.4816	1188.2182	1187.8695	-0.3486
14	324627.0541	6113577.9008	1194.0129	1194.3129	0.3000
15	326184.7913	6113561.9966	1087.8865	1087.8925	0.0060
16	325784.9293	6113458.2433	1177.0668	1176.5757	-0.4911
17	326377.1661	6113752.5226	1000.9491	1001.1778	0.2287
18	327883.9626	6113773.2290	948.1517	950.8981	2.7463
19	319835.8032	6111517.9677	629.7702	629.8008	0.0306
20	320719.8774	6111388.2314	638.4224	638.4323	0.0099
21	329432.1635	6111898.7983	1590.4081	1591.7750	1.3669
22	320889.9445	6110201.1468	864.2574	864.7165	0.4591
23	320662.5403	6109789.4470	891.0773	891.7183	0.6411
24	323381.6611	6109934.6883	837.6891	838.0140	0.3250
25	326204.1730	6109817.9279	762.5252	762.5279	0.0027
26	330373.4782	6110113.3697	1579.8150	1578.8990	-0.9160
27	322170.2460	6109071.0741	1308.1225	1309.3456	1.2230
28	323896.6005	6109260.6396	1034.0357	1034.2155	0.1798
29	325870.3447	6109625.3477	948.0147	948.0053	-0.0094
30	326645.4970	6109623.5085	776.2922	776.1621	-0.1301
31	330279.0502	6108735.2084	1232.9719	1233.1103	0.1384