



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Geomática

**COMPARACIÓN DE CUATRO MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL “DEM” CON
INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA VERTICAL**

Inga. Claudia Cecilia Saput Coj

Asesorado por el Mtro. Ing. Jorge Eduardo Morales Maldonado

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE CUATRO MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL “DEM” CON
INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA VERTICAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. CLAUDIA CECILIA SAPUT COJ

ASESORADO POR EL MAESTRO JORGE EDUARDO MORALES
MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL EVALUADOR QUE PRÁCTICO EL EXAMEN DE DEFENSA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADORA	Ing. Juan Miguel Indekeu Rivas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE CUATRO MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL “DEM” CON INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA VERTICAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 26 de marzo de 2020.

Claudia Cecilia Saput Coj.

LNG.DECANATO.OI.161.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE CUATRO MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL “DEM” CON INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA VERTICAL**, presentado por: **Claudia Cecilia Saput Coj** , que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Geomática después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, marzo de 2022

LNG.EEP.OI.161.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“COMPARACIÓN DE CUATRO MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL
“DEM” CON INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA VERTICAL”**

presentado por **Claudia Cecilia Saput Coj** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todas”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





Guatemala, 05 de septiembre 2020.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **TRABAJO DE GRADUACIÓN** titulado: "COMPARACIÓN DE CUATRO MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL "DEM" CON INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA VERTICAL" de la estudiante Claudia Cecilia Saput Coj quien se identifica con número de carné 201015290 del programa de **Maestría en Geomática**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,



MARLON ANTONIO PEREZ TURK
INGENIERO EN CIENCIAS Y SISTEMAS
COLEGIADO No. 4492

MSc. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
Coordinador
Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, 17 de mayo de 2021

En mi calidad como Asesor de la Ingeniera Agrónoma en Recursos Naturales Renovables –RNR– **Claudia Cecilia Saput Coj** quien se identifica con carnet 201015290, procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“COMPARACIÓN DE CUATRO MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL “DEM” CON INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA VERTICAL”** que se encuentra en el programa de **Ciencia en Geomática** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*“Id Y Enseñad A
Todos”*

MSc. Ing. Jorge Eduardo Morales Maldonado
Asesor



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi amigo incondicional, por amarme y darme fortaleza en cada minuto en el que perdía las esperanzas. Por ser lo más importante de mi vida, él el dueño de todos mis logros.

Mi mamá

Por ser esa mujer dulce, amorosa, dedicada que lucha día con día para que su hija pueda lograr sus objetivos, ella que siempre me recuerda "Tu puedes hacerlo", esa hermosa mujer que nunca me dejó sola.

Mi papá

Por ser ese hombre valiente, incansable, pero a la vez consentidor, ese hombre que día a día trata de complacer mis gustos, hacerme feliz y mostrarme con ejemplos que los días son para esforzarse un poquito más.

Mi esposo

Rodolfo Fuentes por ser ese compañero de vida, compañero de clases, compañero de adversidades y felicidad. Por ser esa persona que nunca dejó de confiar en mí y en mis capacidades, ese hombre maravilloso que me enseñó a levantarme y seguir adelante. Te amo

Hermanos

A mis cinco hermanos. Carlos, Edwin, Victor, Reyna y Ángela Saput. Es una bendición tenerlos como hermanos.

Sobrino

Dennis, Sherlyn y Ludving Xiquita, Analy, Diego, Alessandro, Rodrigo y Emmanuel Saput que este triunfo sea un ejemplo de perseverancia, esfuerzo y responsabilidad para ellos.

Cuñados

Ingrid Ajsivinac, Debora Hernández, Lidia Castro y Manolo Xiquita, por su apoyo y llegar a complementar nuestra familia.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la fortaleza día a día para terminar mis estudios y seguir adelante en mi vida profesional. Pero más importante ser mi compañía diaria. Al único merecedor de todo honor, gloria y amor porque es todo mi centro, mi padre, mi amigo.
- Mamá** Gracias por cuidarme y brindarme apoyo. Eres una madre admirable.
- Papá** Gracias por hacer mis días más fáciles y aconsejarme siempre. Eres un padre admirable.
- USAC** Por abrirme las puertas y formarme como profesional, por darme esta valiosa oportunidad de superación y llevarme de la mano en el camino de los conocimientos. Mi alma mater, de quien estoy muy orgullosa.
- Rodolfo** Gracias por sostener mi mano y acompañarme en cada una de mis metas y hacer cada día de clases una aventura.

Reyna

Gracias por apoyarme, darme ánimo y ser mi mejor amiga. Gracias por el ejemplo que me das. Te amo.

Amigos

Compañeros de vida, de estudios, de trabajo, especialmente Erick Mejía, Mario Chávez, Ulises Armas, Nancy Bran, Diego Santiago, Ana Castañeda, Mariano Martínez, Paola Marroquín, Analiess García, Linda Leal, Andrea Samayoa, Judith del Cid, Sofia García, Kenset Rosales.

Eduardo Morales

Por compartir sus conocimientos conmigo, y ayudarme en todo el proceso, gracias por su apoyo, sus correcciones y por todo lo que ha aportado a mi vida, con mucha admiración.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPOTESIS.....	XVII
MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. JUSTIFICACIÓN	5
3. ALCANCES.....	7
3.1. Resultados.....	7
3.2. Técnicos	7
3.3. Investigativos.....	7
4. MARCO TEÓRICO.....	9
4.1. Conceptos básicos de teledetección	9
4.1.1. Teledetección o percepción remota.....	9
4.1.2. Sensores remotos (activos y pasivos)	10
4.2. Conceptos básicos de fotogrametría aérea.....	12

4.2.1.	Fotografía aérea.....	13
4.2.2.	Ortofoto	13
4.2.3.	Modelos de Elevación Digital –DEM-	13
4.2.4.	Modelo de Elevación Digital de Guatemala.....	15
4.3.	Imágenes satelitales.....	16
4.3.1.	Definición de imagen satelital.....	17
4.3.2.	Satélite Alos-1	17
4.3.3.	Satélite SRTM	19
4.3.4.	Satélite Aster	20
4.3.5.	GDEM Aster	20
4.4.	Sistemas Globales de Navegación Satelital GNSS.....	21
4.4.1.	Definición de GNSS	22
4.4.2.	Segmentos GNSS	22
4.4.3.	Georreceptor	23
4.5.	Métodos de posicionamiento.....	23
4.6.	Teoría de la medición y errores.....	24
4.6.1.	Estimador o estadístico	24
4.6.2.	Error Medio (SEM)	24
4.6.3.	Error Medio Absoluto (MAE).....	25
4.6.4.	Error Medio Cuadrático (RMS)	26
4.6.5.	Desviación estándar	27
4.6.6.	Error Estándar (EE).....	27
5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	29
5.1.	Determinación de la consistencia geométrica de los DEM obtenidos a partir de las imágenes satelitales ALOS PALSAR, SRTM y ASTER.....	30
5.2.	Identificación de las diferencias de elevación de los 4 DEM ...	36
5.2.1.	Entrevistas a los departamentos de SIG del	

	MAGA e IGN.....	36
5.2.2.	Análisis estadístico de los 4 DEM.....	36
5.2.3.	Comparación de datos por punto de muestreo.....	37
5.2.4.	Comparación de datos por modelo de elevación digital	40
5.2.5.	Regresión lineal entre los DEM evaluados	41
5.2.6.	Análisis de varianza de los DEM evaluados	43
5.3.	Determinación del DEM que represente con mejor correspondencia los datos de elevación comparada con información topográfica precisa	44
5.3.1.	Información topográfica precisa de los 36 puntos levantados en campo	45
5.3.2.	Análisis de regresión lineal	48
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	59
	REFERENCIAS	61
	APÉNDICES	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema del funcionamiento de un sensor remoto pasivo	11
2.	Esquema del funcionamiento de un sensor remoto activo	11
3.	Importancia de los DEM para una representación 3D.....	12
4.	Representación del Modelo de Elevación Digital –DEM- Nacional ..	16
5.	Mapa índice de los datos de resolución completa de SRTM.....	20
6.	Métodos de posicionamiento.....	23
7.	Representación de las pendientes en el área de estudio.....	29
8.	Perfil Topográfico seleccionado por pendiente	31
9.	Representación del perfil topográfico 3D a analizar en ortofotos	32
10.	Presentación de los perfiles topográficos de imágenes satelitales...	33
11.	Perfil Topográfico del DEM nacional de Guatemala.....	34
12.	Comparación de los 3 DEM de imágenes satelitales	34
13.	Comparación de los 3 DEM de imágenes satelitales y el DEM nacional.....	35
14.	Ejemplificación de la muestra de 70 puntos en el área de estudio...	37
15.	Gráfica que representa los datos mayores por error medio por cada estrato.....	39
16.	Regresión lineal de SRTM vs Nacional	42
17.	Regresión lineal de ASTER vs Nacional	42
18.	Regresión lineal de Alos Palsar vs Nacional	43
19.	Banco de marca en Chimaltenango	45
20.	Mapa de la ubicación de los 36 puntos levantados en campo	46
21.	Regresión lineal de SRTM vs datos de campo	48

22.	Regresión lineal de ASTER vs datos de campo	49
23.	Regresión lineal de Alos Palsar vs datos de campo	49
24.	Regresión lineal del DEM nacional vs datos de campo	50

TABLAS

I.	Especificaciones técnicas de ALOS.....	18
II.	Características técnicas del instrumento AVNIR-2	18
III.	Características técnicas del instrumento PALSAR	18
IV.	Características técnicas del instrumento PRISM	19
V.	Características de los modelos de elevación digital a evaluar.....	21
VI.	Clases de pendiente utilizadas para el análisis	30
VII.	Características de los DEM analizados en la investigación	30
VIII.	Datos de elevación de la muestra en el área de estudio	38
IX.	Resultados estadísticos de la comparación de los 4 DEM	40
X.	Análisis de varianza entre DEM SRTM y nacional.....	44
XI.	Análisis de varianza entre DEM ASTER y nacional.....	44
XII.	Análisis de varianza entre ALOS PALSAR y nacional	44
XIII.	Datos de elevación tomados en campo con geo receptor de doble frecuencia.....	46
XIV.	Suma de diferencias y coeficiente de variación de los modelos de elevación vs los datos de campo	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
SEM	Error Medio
MAE	Error Medio Absoluto
RMS	Error Medio Cuadrático
DEM	Modelo de Elevación Digital
SRTM	Modelo de elevación digital generado por Shuttle Radar Topography Mission
L1, L2	Radiofrecuencias específicas utilizadas por los sistemas globales de navegación por satélite GNSS
n	Tamaño de la muestra

GLOSARIO

ALOS-PALSAR	Radar del tipo de apertura sintética para la observación de la superficie diurna-nocturna y multiestacional
DEM	Modelo de Elevación Digital. Archivo digital en formato ráster cuyas celdas o píxeles contienen valores de altura o elevación de un área determinada.
GDOP	Dilución Geométrica de la Precisión. Valor utilizado para representar la calidad de la geometría satelital sobre un receptor GNSS al momento de una medición.
GNSS	Conjunto de sistemas globales de navegación por satélite que se encuentran en operación en el mundo. Actualmente conformado por los sistemas GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, IRNSS y QZSS.
GPS	Global Positioning System que significa Sistema de Posicionamiento Global, se utiliza para determinar la posición con coordenadas de latitud, longitud y altura.
RAC	Redes de apoyo catastral del Registro de Información Catastral –RIC-

SRTM

Shuttle Radar Topography Mission proyecto de la NASA y las agencias espaciales de Italia y Alemania para generar un DEM de 90 y 30 metros.

RESUMEN

Los modelos de elevación digital conocidos como DEM, son la representación visual y matemática de los valores de altura con respecto a un nivel de referencia, permiten caracterizar las formas del relieve y los elementos presentes en la configuración topográfica del terreno, es por ello la importancia que poseen. Guatemala posee un Modelo de Elevación Digital –DEM- generado en el año 2006 realizado con un método fotogramétrico. Sin embargo, con el avance de la tecnología se han generado varios DEM obtenidos de imágenes satelitales, tal es el caso de productos de satélites SRTM, ASTER y ALOS-1 con su producto ALOS PALSAR, además se han estudiado en varios países realizando comparaciones con sus productos nacionales.

En esta investigación se compararon cuatro DEM (SRTM, ASTER, ALOS PALSAR y el Nacional) estos modelos difieren en sus características tanto por el método como por la fecha de generación, además de la resolución espacial. Esta comparación se realizó con representación gráfica de perfiles topográficos, para comprobar la consistencia geométrica de los DEM, con un análisis estadístico para identificar cual DEM proveniente de imágenes satelitales tiene mejor correlación con el utilizado nacional, por último con diferencias de alturas con puntos de ubicación levantados en campo con un georreceptor de doble frecuencia, los cuales fueron amarrados al Datum Vertical de Guatemala, que es el de Puerto San José 1949/50, habiéndose obtenido un error promedio de ± 2 cm., en toda la muestra. Con estos análisis se comprobó que el DEM nacional tiene mucha más información que los otros DEM, se identificó la similitud gráfica de los DEM que provienen de imágenes satelitales, que el DEM ASTER presenta

las menores diferencias mientras que ALOS PALSAR presenta las mayores respecto a la información real.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Los modelos de elevación digital conocidos como DEM, son la representación visual y matemática de los valores de altura con respecto a un nivel de referencia, permiten caracterizar las formas del relieve y los elementos presentes en la configuración topográfica del terreno. Por medio de la información ráster¹ de valores de altura que contienen, son la fuente principal de análisis para varios estudios, por ejemplo: pendientes del terreno, perfiles topográficos, altitud y curvas a nivel; sin embargo, es normal que se desconozcan las discrepancias entre los datos de elevación provenientes de diferentes DEM ya sea porque fueron obtenidos por métodos distintos o porque se obtuvieron de imágenes satelitales de sensores variables. Esto conlleva a que se desconozca, en primera instancia, cual es el que representa con mayor fidelidad la topografía del terreno.

En Guatemala, la obtención de valores de altura con los modelos de elevación digital se hace por lo general sin determinar previamente el grado de precisión que estos contienen, asumiendo dicha información como correcta. Hasta ahora la mejor aproximación para determinar la precisión, (aunque muy subjetiva), es a través de los metadatos, mismos que varían en calidad y contenido según la fuente de la que se trate. La aplicabilidad de estos DEM es

¹ Anglicismo que en la Geomática se utiliza para describir a una matriz digital de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas en la que cada celda contiene un valor que representa información (color, elevación, temperatura, etc.) [Fuente: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>]

amplia, dado que permiten analizar en tres dimensiones fenómenos dinámicos tan diversos en detalle como lo son los análisis de escorrentía para cuencas y microcuencas, los Estudios de Capacidad del Uso de la Tierra –ECUT– y los análisis de cobertura boscosa en relación con la pendiente. Los DEM que se evaluaron son los provenientes de las imágenes ALOS PALSAR, SRTM y ASTER para poder responder a las tres preguntas secundarias y así determinar:

- ¿Cuál es la imagen de satélite que provee el modelo de elevación digital más parecido al DEM nacional de Guatemala?
- ¿Cuáles son las diferencias estadísticas de los datos de elevación?
- ¿Cuál de los cuatro modelos de elevación digital tiene mejor coincidencia con los datos de elevación tomados con un Georreceptor de doble frecuencia?

Y con ello así poder responder a la pregunta principal de esta investigación, la cual es ¿Cuál de los DEM representa con mayor fidelidad la topografía de Guatemala? y así darle a conocer a las personas e instituciones una referencia que represente mejores opciones metodológicas, facilidad, menor costo, mejor resolución o fuentes de información más recientes.

OBJETIVOS

General

Determinar el modelo de elevación digital “DEM” que representa con mayor fidelidad la topografía de Guatemala.

Específicos

- Determinar el grado de consistencia geométrica de los Modelos de Elevación Digital obtenidos a partir de las imágenes satelitales ALOS PALSAR, SRTM y ASTER.
- Identificar las diferencias de elevación de los DEM provenientes de ALOS PALSAR, SRTM, ASTER y el modelo de elevación digital de Guatemala.
- Determinar cuál de los cuatro modelos evaluados representa una mejor correspondencia en el valor de elevación respecto a información topográfica precisa.

HIPOTESIS

De la comparación de los cuatro Modelos de Elevación Digital realizados con diferentes metodologías (SRTM, ASTER, ALOS PALSAR y el DEM nacional de Guatemala), se planteó la posibilidad de que el DEM que representa con mayor fidelidad la topografía del país fuera el DEM nacional, debido al proceso más minucioso de elaboración que conlleva un DEM de este tipo.

MARCO METODOLÓGICO

- Tipo de investigación

Esta investigación se encuentra direccionada en la línea de investigación de Mapeo a través de imágenes de Satélite, cuenta con un análisis cualitativo, debido a que se basa específicamente en la relación numérica de la elevación de varios modelos de elevación digital, los cuales poseen diferentes características. El estudio es de carácter no experimental, es más bien comparativo para determinar la fidelidad de los datos de elevación con respecto a la realidad.

- Diseño de investigación

Esta investigación cuenta con un diseño de muestreo que combina la estratificación de pendientes y la aleatoriedad de la muestra, para ello se utilizó el DEM nacional de Guatemala como base comparativa.

- Procedimiento metodológico

Para realizar la investigación se dividió el proceso en 3 fases: 1) Primera fase de gabinete: donde se investigaron los sensores satelitales que disponían de información altimétrica, cobertura en el territorio de Guatemala y disponibilidad inmediata en línea; posteriormente estos modelos de elevación digital fueron descargados directamente de los sitios web correspondientes, 2) Fase de campo: donde se realizaron mediciones directas de altura para contar con información que validara la comparación del estudio y, 3) Segunda fase de gabinete: donde

se realizó el procesamiento y organización de la información recolectada y por último, el análisis de datos que llevó a los resultados finales.

- Primera fase

Se realizó la descarga de los modelos de elevación digital obtenidos por imágenes satelitales (ALOS PALSAR, SRTM, ASTER).

Se seleccionaron DEM que se determinó, eran gratuitos y a la vez, ampliamente utilizados en el campo de la Geomática.

- Segunda fase

Como segunda fase del análisis, se determinó la línea base de comparación la cual se determinó por medio de datos con alta precisión como los que proporciona un georreceptor de doble frecuencia.

Estos datos se obtuvieron por un muestreo estratificado en la cuenca de estudio, la estratificación se obtuvo con los datos de pendiente, ubicando 3 muestras por cada clase de pendiente. Los puntos se ubicaron de forma aleatoria para tener el último insumo de comparación.

- Tercera fase

Como última fase, se realizó el post proceso de la información obtenida en campo y posteriormente el análisis de una comparación de modelos de elevación digital obtenidos por tres métodos diferentes, levantamiento de ortofotos, imágenes satelitales y datos obtenidos con georreceptor.

Esta comparación se realizó por medio de parámetros estadísticos en los que se determinó el error medio, error medio absoluto, error medio cuadrático, desviación estándar y error estándar.

- Instrumentos de recolección de información

Se dividen en dos categorías, los recursos digitales y físicos, que se presentan a continuación:

- Recurso digital
 - Servidor de datos WMS (para la descarga de capas shape de referencia)
 - Servidores de imágenes satelitales
 - Software de postproceso GNSS
 - Software SIG
 - Hoja de cálculo
- Recurso físico
 - Computadora notebook
 - Teléfono inteligente con aplicación móvil de cartografía
 - Georreceptores L1/L2

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los Sistemas de Información Geográfica digitales constituyen la base fundamental del análisis espacial, pues permiten la visualización dinámica de distintas fuentes de información georreferenciada y aún más importante, la obtención de nueva información. Tradicionalmente la información disponible se encuentra almacenada en formatos vectoriales y ráster; éste último representado por mapas escaneados, fotografías aéreas digitales e imágenes de satélite, toda esta información juega un papel importante en la realización de análisis para toma de decisiones, por ello, el siguiente estudio se enfoca en el mapeo por medio de imágenes satelitales, específicamente en el estudio de la precisión de los modelos de elevación digital.

Las imágenes satelitales son una fuente de información secundaria que tiene muchas ventajas y una de las principales es la toma de información de áreas extensas, además muchas de ellas brindan información aún más especializada como lo es la información de alturas para generar modelos de elevación digital; sin embargo, existen varios satélites que generan esta información, y a falta de un estudio que lo determine, en la actualidad aún se desconoce cuál DEM es más preciso y por qué representa o no la mayor fidelidad topográfica del país.

El presente estudio se realizó para determinar las diferencias de elevación entre los DEM derivados de imágenes satelitales y el DEM nacional, para así establecer cual imagen de satélite provee la información de alturas más precisa, esto se realizó por medio de procesamiento de imágenes, análisis estadísticos, aplicación de topografía entre otros.

El presente documento contiene en el capítulo 1 una síntesis de la revisión bibliográfica que describe otros estudios comparativos entre Modelos de Elevación Digital –DEM- con sus respectivos enfoques, metodologías y resultados, el capítulo 2 presenta la importancia de la investigación. El capítulo 3 contiene los alcances de resultados, técnicos e investigativos, el capítulo 4 presenta todos los conceptos teóricos importantes para el entendimiento de la investigación. El capítulo 5 y 6 contiene los resultados encontrados en la investigación, así como la discusión de estos.

1. ANTECEDENTES

En un estudio llamado Análisis y comparación de dos modelos digitales de elevación en la isla 25 de Mayo (King George Island), Islas Shetland del Sur, Antártida, realizaron un análisis sobre la comparación de dos DEM de acceso público, los cuales son Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Versión 2 (RAMPv2) y Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Versión 2 (GDEMv2), en este análisis se compararon la escala de trabajo, resolución, los rangos y las diferencias de elevaciones, el cual tuvo como resultado que el DEM RAMPv2 es el más adecuado por su menor resolución espacial; debido a que los datos son más coherentes con las características topográficas y morfológicas, no tiene datos aberrantes y representa la menor diferencia entre la máxima elevación del modelo y la cota máxima. (Sala, 2014)

También en otro estudio titulado Comparación de DEM generados a partir de distintas fuentes de datos. Cuenca del Arroyo Sauce Corto, Sistema de Ventania, Argentina se comparó un DEM generado a partir de cartografía a escala 1: 50,000 y los productos ASTER y SRTM de los cuales se analizaron las diferencias altimétricas, orientación y pendiente por métodos estadísticos de centralidad y dispersión, el cual tuvo como resultado semejanza entre el DEM SRTM y el generado con cartografía. (Campo, 2016)

En otros estudios, se han utilizado los DEM en combinación con Sistemas de Información Geográfica -SIG- para estudiar el deterioro de la infraestructura vial, por ejemplo, un caso específico en La Habana, Cuba. La autora del estudio menciona que los modelos digitales de elevación (MDE) son una forma de

representación del relieve de la cual se pueden obtener las informaciones que usualmente se extraen de las isolíneas de los mapas topográficos, y otros productos derivados de los MDE brindan información sobre los diferentes factores que inciden en el deterioro vial.

En relación con la determinación de errores planimétricos en datos satelitales de áreas con pendientes altas (montañosas), diversos estudios han determinado que la exactitud planimétrica de las ortoimágenes depende principalmente de la calidad de los DEM fundamentalmente la geométrica. Generar un DEM representa costos muy elevados, debido a eso es necesario estudiar la influencia de los precios en las ortorrectificaciones derivadas. En el estudio también se comprobó que las áreas con pendiente alta (montañosas) y en áreas rurales, no se puede tener un muestreo de puntos de control aleatorio o sistemático debido a que hay muchos factores que impiden estos diseños. Para contrarrestar esto, es importante evaluar la efectividad de cada diseño (típicos de estimación de la exactitud de la planimetría de orto-imágenes).

En el año 2016 se evaluó la calidad de los Modelos de Elevación Digital DEM SRTM y ASTER (Mugica). El área de estudio fue a nivel de cuencas. El objetivo principal de este estudio fue realizar una comparación cuantitativa de la calidad de los modelos de elevación SRTM y ASTER juntamente con puntos de control terrestre en diferentes tipos de cobertura y relieve. La comparación se realizó en cuatro tipos de superficie tomando datos de altitud con GPS. Los resultados proporcionaron información sobre las diferencias que existen por la distribución de los errores en cada tipo de superficie. Estas diferencias se mostraron menores en áreas planas (llanura) no importando la cobertura vegetal. El estudio concluyó que el DEM SRTM tiene mejores resultados en todos los parámetros evaluados a nivel global como por tipos. (Mugica) .

Una tesis realizada en Chile (Pavez Muñoz, 2016) sugiere que el incremento del uso de los sistemas de información geográfica también incrementa la necesidad de procesos de evaluación y validación principalmente en procesos automáticos. Se utiliza en varios campos: ambientales, forestales, militares, civiles, entre otros. El estudio tuvo por objetivo analizar la exactitud de los DEMs obtenidos mediante imágenes satelitales de la constelación PLEIADES de la zona de Monte Oscuro, Región del Maule, Chile, comparándolo con modelos digitales de elevación validados: ASTER, LIDAR y SRTM.

Los resultados muestran que, 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 todos sus casos cercana a 1 (Pavez Muñoz, 2016)

Los estudios de los modelos de elevación digital globales que se tienen se han estado estudiando también con los sistemas satelitales de navegación global GNSS, por eso un estudio llamado Análisis de la precisión del DEM de la Misión de la Topografía de Radar del *Shuttle* –SRTM- utilizando la Red Internacional Global de servicios de sistema de navegación por satélite –IGS- evaluaron los valores de alturas ortométricas para comparar las dos elevaciones, convirtiéndolas en elipsoidales agregando la altura geoidal a cada altura, este estudio lo analizaron por medio de datos estadísticos obteniendo el error medio, error absoluto medio, error RMS, desviación estándar, error estándar de diferencia entre las alturas de GPS y SRTM (Espinosa,2015).

Un estudio titulado *Validación de Modelos Digitales del Terreno de Precisión a partir de datos Laser Escáner Aerotransportado; aplicación a la Marisma del Parque Nacional de Doñana* realizó la validación de modelos digitales del terreno en áreas extremadamente llanas, áreas donde las características morfológicas son diferenciadas por decímetros, el cual el objetivo fue realizar verificaciones del DEM aumentando el grado de precisión con datos. Este análisis generó una validación de las técnicas de preparación de un DEM realizado por métodos topográficos terrestres, fotogramétricos y de teledetección y Radar InSAR, el cual se pudo concluir que las comprobaciones cualitativas demuestran su necesidad de ser más estudiadas debido a que los datos cuantitativos no aseguran la calidad de los DEM. (Ibáñez, 2008)

Según Ying (2006) en un análisis llamado *Validación de los modelos de elevación digital Global con información de proyecto de confluencia y Aster-dem en Geo Grid* realizó la validación de los dos conjuntos de datos de libre disposición de elevación digital: GTOPO 30 y SRTM. En este análisis se detectó que hay lugares en el mundo con más kilómetros de diferencias de elevación principalmente en zonas montañosas, aunque en menor cantidad de áreas planas, la diferencia entre estos modelos de elevación digital es muy grande. Además, se encontró que los valores de SRTM no son siempre mayores que los de GTOPO30, las diferencias existen de forma aleatoria en escala global, además las diferencias no son únicamente de elevación, también de inclinación, pendiente y aspecto (p.48).

2. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se encuentra direccionada en la línea de investigación de Mapeo a través de imágenes de Satélite debido a que los modelos de elevación digital son utilizados comúnmente como fuente principal al momento de realizar análisis de cuencas, revisión de clima, de especies vegetales, forestales, zonas de vida, estudios de suelos entre otros.

Por no ser económicamente viable en la mayoría de los casos, resulta muy difícil obtener un modelo de elevación digital por medio de un levantamiento topográfico para una microcuenca, municipio, departamento o incluso para todo el territorio nacional, por ello, se prefiere al uso de DEM proveniente de imágenes satelitales, los cuales se consiguen a menudo a bajo costo y contienen información más actualizada debido a la frecuencia de captura de información.

El conocer la calidad de la información contenida en estos modelos de elevación digital permitirá una integración más amplia a futuro, cuando se utilicen modelos cuya calidad se conoce, evitándose así la necesidad de hacer exhaustivas verificaciones de campo a la vez que toda discrepancia hallada entre diferentes sets de datos tendrá, con este estudio, elementos de juicio válidos para indagar sobre su causa. Por lo anterior, es necesario evaluar el grado de confiabilidad de la información vertical de los DEM más utilizados en nuestro medio, a modo de contar con una base teórica que respalde el criterio de aceptación o rechazo hacia una u otra fuente de información, según el caso del que se trate.

Por último, la importancia del presente estudio se justifica por el aporte al escaso conocimiento que de estos modelos existe. No son pocos los usuarios a beneficiarse de un estudio de esta naturaleza, pues una buena parte de su cartografía básica puede realizarse usando DEM satelitales. Entre los usuarios principales pueden mencionarse a Instituto Geográfico Nacional –IGN-, Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos –DIGEGR-, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN-; sector privado y consultores independientes, todos ellos ubicados en el ámbito de las ciencias ambientales y de la geomática.

3. ALCANCES

3.1. Resultados

Los usuarios que necesiten utilizar modelos de elevación digital para análisis que requieran cambios en altura y pendiente dentro del territorio guatemalteco, podrán contar con el aval de la presente investigación que demuestra con valores estadísticos y comprobados con tecnología GNSS, cual DEM proveniente de imágenes satelitales representa mejor la topografía del país. Además, esta investigación debe ser enfocada a consultores individuales, empresas, instituciones nacionales que tienen a su cargo investigaciones departamentales y municipales, por ejemplo: el estudio Semidetallado de suelo realizado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

3.2. Técnicos

La resolución de los DEM a investigar todos son de diferente resolución espacial (Aster 30 m, Alos Palsar 12.5 m, SRTM 30 m, Nacional 15 m) y el año de toma de imagen es diferente (Años 2000, 2006, 2010). A pesar de que la resolución puede ser un valor diferente, es de importancia evaluarlo debido a que la resolución tiene una relación con el tipo de análisis realizado.

3.3. Investigativos

El alcance investigativo de este estudio es validar la información de elevación en un área determinada, de 3 productos de imágenes de satélite, a pesar de que existen más se seleccionaron esos después de investigación por

tener características de disponibilidad. Es así como la validación de la información se realizará con análisis estadísticos e información precisa obtenida en campo. El lugar donde se realizó el estudio es la parte alta de la cuenca del Río Guacalate, en los departamentos de Chimaltenango y Sacatepéquez. Se determinó un área específica debido a que esta línea de investigación al tener una combinación entre geodesia y teledetección es requerida la validación con datos de campo y recolectar esta información tiene costos altos, por eso, se determinó un área de toma de datos para realizar el análisis.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Conceptos básicos de teledetección

Para realizar cálculos y estimaciones de altimetría sobre un territorio determinado como por ejemplo de alturas, de pendientes o de cambios en el relieve topográfico, la teledetección es una rama de la geomática que permite hacerlos sobre áreas extensas sin tener contacto directo con ellas. Se presentan a continuación los conceptos fundamentales de esta ciencia y que se utilizan a lo largo del presente estudio.

4.1.1. Teledetección o percepción remota

Consiste en el conjunto de instrumentos, técnicas y métodos utilizados para observar y medir una superficie, generalmente mediante la formación de una imagen en una posición, estacionaria o móvil, a cierta distancia remota de esa superficie (Buiten y Clevers, 1993).

Diferentes autores la llaman ciencia, arte o técnica, y de acuerdo con la definición del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI, 2015) la teledetección permite observar y almacenar información que se toma con satélites desde el espacio. Esta ciencia involucra varios elementos que son:

- Fuente de energía: quien emite energía del tipo electromagnético a los objetos que se están estudiando y/o analizando.
- Atmosfera: esta interactúa con la energía que es recibida y reflejada por los objetos.

- Objetos: son los que generan una respuesta o interacción a la energía.
- Sensor remoto: son los que graban y recogen la radiación electromagnética que se da en el sistema de objeto y la atmósfera.
- Recepción, transmisión y procesamiento: la energía obtenida por el sensor es transmitida a estaciones que almacenan la información, las procesan y las convierten en imágenes satelitales.
- Interpretación y análisis: es realizado por los usuarios los cuales interpretan las imágenes satelitales de los objetos de interés.
- Usuario final: quien realiza la aplicación y genera los análisis de las imágenes satelitales como insumo para toma de decisiones.

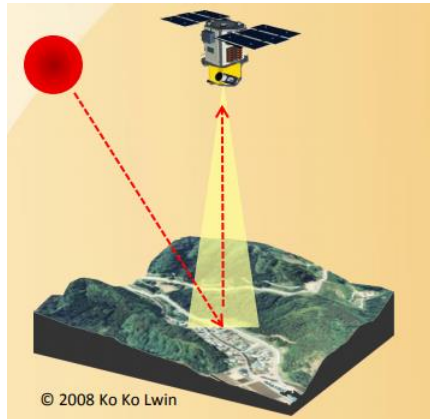
4.1.2. Sensores remotos (activos y pasivos)

Son usados para monitorear el medio ambiente y la cubierta terrestre, ellos son base fundamental de la percepción remota el cual es la ciencia para detectar y medir a distancia por medio de la energía electromagnética cualquier sistema físico. (Garcia, 2007)

- Tipos de sensores remotos

Existen dos tipos de sensores remotos, siendo estos pasivos y activos. Un sistema de sensor pasivo se diferencia de un activo porque depende de una fuente de energía externa como se ve en la figura 1, en la cual la fuente de energía que está utilizando es el sol la cual sucede en la mayoría de los casos. (Baumann, 2008)

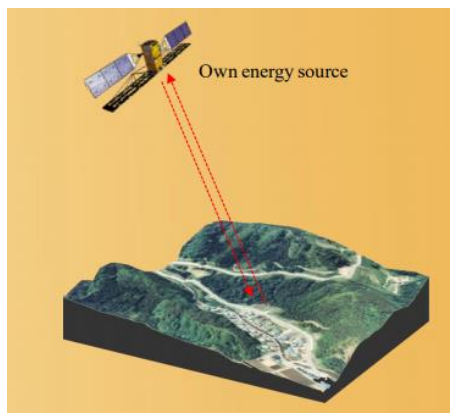
Figura 1. **Esquema del funcionamiento de un sensor remoto pasivo**



Fuente: (Lwin, 2008). *Sensor remoto pasivo*.

Los sensores activos tienen la característica particular que tienen su propia fuente de energía como se ve en la figura 2, el sensor transmite energía la cual al momento de chocar regresa su propia energía ya en valores de reflectancia. Como ejemplo, RADAR es un sensor que envía ondas de sonido y registra las ondas reflejadas que regresan del área analizada. Los sistemas pasivos son mucho más comunes que los sistemas activos. (Baumann, 2008)

Figura 2. **Esquema del funcionamiento de un sensor remoto activo**



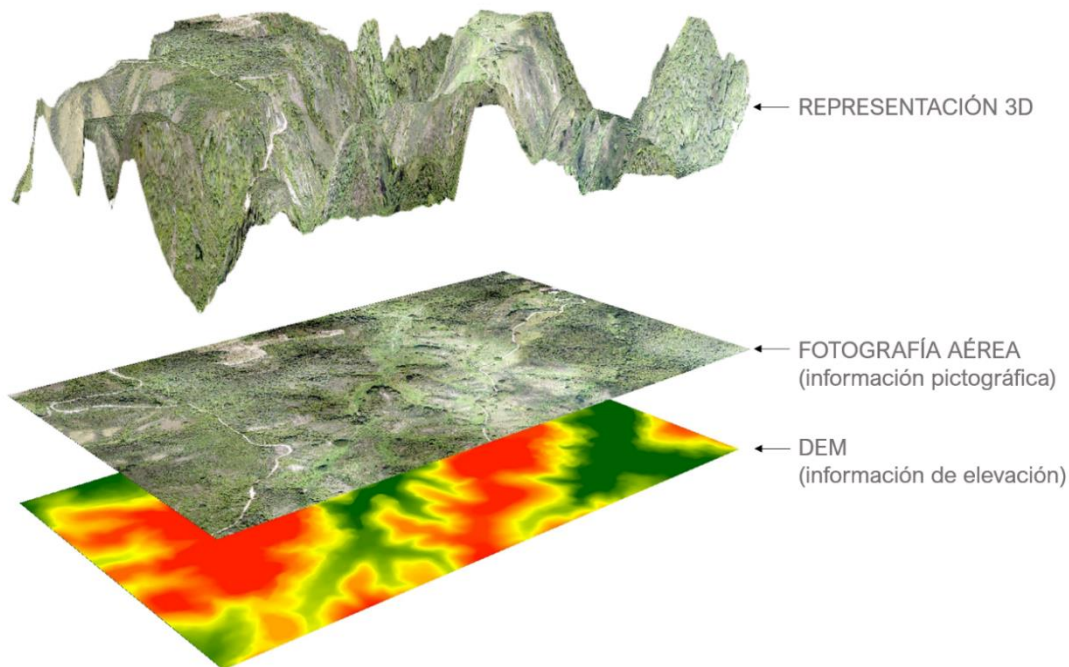
Fuente: (Lwin, 2008). *Sensor remoto activo*.

Los sensores registran la información de la superficie de la Tierra al medir la transmisión de energía desde la superficie en diferentes lugares de la corriente electromagnética.

4.2. Conceptos básicos de fotogrametría aérea

La cartografía y principalmente los levantamientos topográficos se realizan principalmente con fotogrametría la cual usa fotografías aéreas, por ello, la fotogrametría se convierte en objeto de estudio para mejorar las técnicas y generar insumos con mejores precisiones. Además de la importancia de combinar Modelos de Elevación Digital –DEM- con fotografías aéreas para obtener una representación tridimensional del terreno.

Figura 3. **Importancia de los DEM para una representación 3D**



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

4.2.1. Fotografía aérea

Es la representación visual de toda la información que se captura por un sensor, esta información contiene datos reflejados que son la respuesta de la superficie de la tierra. El uso de imágenes satelitales es una de las maneras más efectivas para producir y actualizar mapas topográficos en regiones de tamaño medio y grande dando mejor relación costo/beneficio. (Burgos, 2014)

4.2.2. Ortofoto

Imagen del terreno que cambió de proyección central a ortogonal para eliminar cualquier distorsión planimétrica del ángulo de inclinación de la cámara y del relieve. Se utilizan en las actividades con fotografías aéreas y cartografía sistemática, sin dejar atrás una desventaja económica porque estos métodos requieren de actualización permanente (Gutiérrez, 2018). En Guatemala durante el período 2006 y 2007 la Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo –UPGGR- ejecutó un proyecto para actualización de la base cartográfica en la cual se obtuvieron 5800 ortofotos con una resolución de 0.5 metros. (Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos -DIGEGR- del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2015).

4.2.3. Modelos de Elevación Digital –DEM-

Los Modelos de Elevación Digital (Digital Elevation Model en inglés, de ahí su abreviatura), son representaciones o modelos digitales y continuos de la superficie de un terreno, es decir, aquellos en la que cada elemento de su estructura contiene un valor de altura o elevación (The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2012).

Este es comúnmente conocido por DEM, son producto de un análisis fotogramétrico digital resultado de la toma de fotografías aéreas o imágenes satelitales. (Méndez y Jiménez, 2013)

Además, Jorge Fallas, (2003) hace referencia a que el DEM es la medición de altura con respecto a un Datum y la generación de un modelo de valores absolutos de altura. (Fallas, 2003)

Asimismo, Francisco Alonso Sarría menciona que los modelos de elevación digital se pueden realizar por varios métodos, que pueden ser:

- Métodos directos (mediante sensores remotos)
 - Altimetría
 - Radargrametría: estas técnicas son exactamente análogas al análisis fotogramétrico de imágenes ópticas pasivas, pero se basa en los diferentes principios geométricos de las imágenes radar. El proceso abarca la producción de productos de imágenes controladas con coordenadas terrestres y la producción de modelos topográficos digitales DTM mediante identificación automatizada y/o manual de conjuntos de información. (USGS, 2008). Además la radargametría permite generar MDE de buena precisión debido a los radares de apertura sintética, aunque las dificultades operacionales son significativas; sin embargo, la magnitud del error del MDE resultante establece una competencia real con métodos convencionales. (Universidad de Oviedo, s.f.)

- Métodos directos (sobre el terreno)
 - Topografía convencional
 - GNSS

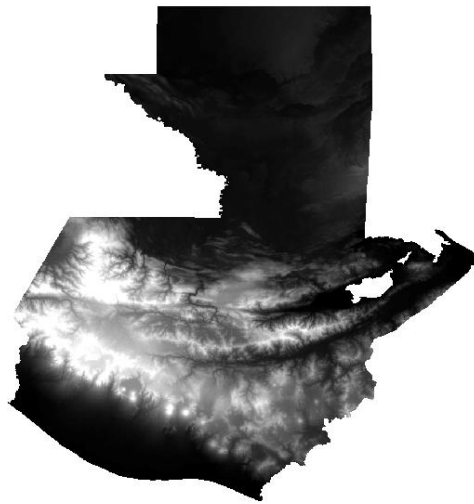
- Métodos indirectos
 - Restitución fotogramétrica: es un método con el objetivo de generar pares de imágenes con información de imágenes satelitales, los cuales tienen que estar parcialmente traslapados y tomados desde un punto de vista diferente para poder formar el par estereoscopio, en la actualidad también se realiza con imágenes digitales tomadas por sensores pancromaticos transportados por los satélites. El proceso de este método es el siguiente:
 - De información de puntos homólogos se deducen las cotas de referencia para reconstrucción de la topografía.
 - Este proceso lo realizan los restituidores fotogramétricos grabando los resultados en formato digital compatible con los SIG. Se toma la información del terreno para tener un conjunto de datos de apoyo para fijar valores de altitud en una escala absoluta. (Universidad de Oviedo, s.f.)
 - Digitalización: dentro de los métodos directos mediante sensores remotos, se encuentra el método de altimetría, este se realiza por medio de aviones o satélites para calcular la altitud y encontrar su diferencia, esta diferencia es del avión o sensor que toma la información del área a analizar (área de la superficie de la tierra). La única desventaja es el tamaño de los productos finales porque tienden a ser celdillas muy grandes. (Sarrío, 2006)

4.2.4. Modelo de Elevación Digital de Guatemala

El DEM que actualmente se utiliza en el ámbito de la geomática en Guatemala y que ha servido hasta ahora como la base principal referencial de alturas es el denominado DEM Nacional. El DEM Nacional consiste en una imagen ráster con una resolución espacial de 15 metros por píxel cuyos valores

representan la altitud en metros sobre el nivel del mar (también conocida en el medio como elevación).

Figura 4. **Representación del Modelo de Elevación Digital –DEM-
Nacional**



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

4.3. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son un insumo fundamental de la teledetección, en la actualidad las instituciones públicas, privadas e industrias, lo están utilizando como fuente principal de análisis y toma de decisiones. Además, la ventaja para los usuarios es que muchas imágenes satelitales sean de acceso gratuito, esto hace que utilizar las imágenes para realizar análisis sea un proceso diario.

4.3.1. Definición de imagen satelital

Son la representación visual de los datos (información) capturados por un sensor, el uso de imágenes satelitales es una de las maneras más efectivas para producir y actualizar mapas topográficos en regiones de tamaño medio y grande dando mejor relación costo/beneficio. (Burgos, 2014)

4.3.2. Satélite Alos-1

ALOS (Advanced Land Observation Satellite), es un satélite japonés, lanzado con éxito el 24 de enero de 2006. Posee tres instrumentos (sensores remotos) que son:

- PRISM: sensor remoto pancromático para estéreo mapeo estéreo de la elevación digital de la superficie.
- AVNIR-2: el instrumento radiométrico visible e infrarrojo cercano el cual es para la observación de la cobertura del suelo de una forma precisa.
- PALSAR: que es un radar del tipo de apertura sintética para la observación de la superficie diurna-nocturna y multiestacional.

Estos instrumentos operan simultáneamente para capturar imágenes ópticas y de radar con varias resoluciones. (Soza, 2018)

En la siguiente tabla, se presentan las características técnicas el satélite ALOS.

Tabla I. **Especificaciones técnicas de ALOS**

Resolución	2.5 pancromática, 10m multiespectral
Sitio de despegue	Centro 18special de Tanegashima
Vehículo de abordó	H-IIA Rocket
Peso	4,000 kg
Potencia aproximada	7,000 W
Vida de diseño	3 a 5 años
Periodo recurrente	46 días
Subciclo	2 días
Altitud	692 km sobre el Ecuador
Inclinación	98.2 grados

Fuente: Satellite Imaging Corporation (2018). *Especificaciones de ALOS*

Tabla II. **Características técnicas del instrumento AVNIR-2**

Banda	Región de longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	0.42-0.50 (azul)	10
2	0.52-0.60 (verde)	10
3	0.61-0.69 (rojo)	10
4	0.76-0.89 (IR cercano)	10

Fuente: Satellite Imaging Corporation (2018). *Especificaciones de AVNIR-2*

Tabla III. **Características técnicas del instrumento PALSAR**

Banda	Frecuencia (GHz)	Resolución (m)
SAR-L	1.3	10 y 100

Fuente: Satellite Imaging Corporation (2018). *Especificaciones de PALSAR*

Tabla IV. **Características técnicas del instrumento PRISM**

Banda	Región de longitud de onda (μm)	Resolución (m)
PAN	0.52-0.77	2.5

Fuente: Satellite Imaging Corporation (2018). *Especificaciones de PRISM*.

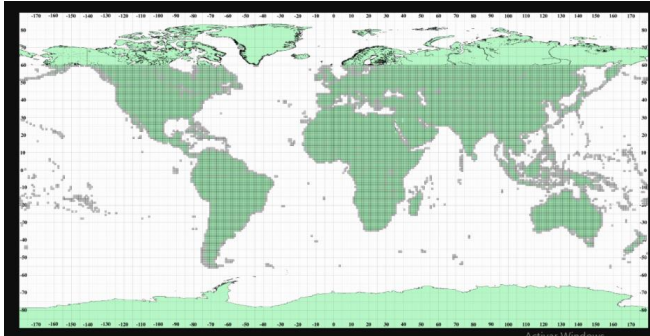
4.3.3. Satélite SRTM

La misión conocida como SRTM cuyas siglas corresponden a Shuttle Radar Topography Mission, fue un proyecto de la NASA en conjunto con la agencia nacional de inteligencia geoespacial y las agencias espaciales de Italia y Alemania. Este sensor fue enviado a bordo del Space Shuttle Endeavor en el año 2000, sin embargo, hasta el año 2003 los datos fueron libres con una resolución espacial de noventa (90) metros. (NASA, 2014) En el año 2015 dieron libertad para el uso de este modelo con una mejor resolución (30 metros). (California Institute of Technology , 2018)

La misión para obtener el DEM SRTM fue de únicamente 11 días en la cual SRTM tenía como objetivo la medición de la topografía de toda la tierra entre 56 grados al sur y 60 grados al norte del ecuador. Esta misión utilizó un radar de imágenes con el que logro medir la tierra en diferentes perspectivas las cuales se combinaron para producir un mapa global topográfico. (NASA, 2014)

SRTM a pesar de ser global no tiene información para las latitudes de la Antártida y unas de norte como se presenta en la figura 5. (California Institute of Technology , 2018)

Figura 5. **Mapa índice de los datos de resolución completa de SRTM**



Fuente: California Institute of Technology (2018), consultado el 20 de diciembre de 2021. Recuperado de https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/images/SRTM_2-24-2016.gif

4.3.4. Satélite Aster

ASTER se refiere a The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, este satélite fue un esfuerzo de cooperación entre dos grandes entidades la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI. En el año 1999 ASTER se lanzó al espacio a bordo del satélite TERRA de la NASA. El objetivo de la misión fue dar un mejor entendimiento respecto a la interacción superficie-atmósfera y los procesos a escalas regionales y locales. (Vargas, 2017)

4.3.5. GDEM Aster

El modelo avanzado de elevación digital en su versión Global fue por la cooperación de un ministerio de Japón y la administración de la NASA como se mencionó anteriormente, esto fue en el año 2011.

La primera versión de GDEM fue lanzada en junio de 2009 en la cual se utilizaron imágenes recopiladas por el instrumento ASTER, el producto fue un par

estéreo recopiladas, esta primera versión se encuentra en el rango de 83 grados de latitud norte a 83 grados sur lo que tiene como resultado un 99 % de la Tierra. La segunda versión agrego 260,000 pares de imágenes lo que ayudo a mejorar la cobertura y reduciendo la ocurrencia de artefactos, lo que genera como resultado final una mayor precisión horizontal y vertical. (ASTER, 2018).

La siguiente investigación se realizó con tres imágenes satelitales utilizando como comparador un modelo de elevación digital generado para la realización de las ortofotos del año 2006. Las características de la resolución y el año en la que se elaboraron son diferentes para los DEM investigados, los datos se presentan en la tabla V.

Tabla V. **Características de los modelos de elevación digital a evaluar**

DEM	RESOLUCION ESPACIAL	AÑO DE GENERACIÓN
• DEM Aster	30 metros	Año 2011
• DEM Alos Palsar	12.5 metros	Año 2010
• DEM SRTM	30 metros	Año 2000
• DEM nacional	15 metros	Año 2006

Fuente: elaboración propia.

4.4. Sistemas Globales de Navegación Satelital GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital GNSS son todos aquellos sistemas de navegación y posicionamiento por satélite, que en la actualidad estan representados por las constelaciones BeiDou, Galileo, GLONASS, IRNSS, QZSS.

4.4.1. Definición de GNSS

Se denomina así, a los Sistemas Globales de Navegación por Satélite, mencionados en el párrafo anterior, que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, tanto de forma autónoma, como con sistemas de aumentación (García, 2008).

Los GNSS ya tienen su estructura definida, esta tiene tres segmentos principales que son un espacial, de control y de usuarios.

4.4.2. Segmentos GNSS

- Segmento espacial: es un segmento en el que se encuentran los satélites que conforman el sistema de navegación y comunicación. Por lo general son dos tipos el primero se mantiene alrededor de la tierra y los segundos son los que ayudan en la corrección de cualquier tipo de errores. (García Álvarez, 2008)
- Segmento de control: este segmento conforma el grupo de estaciones ubicadas en la tierra que recopilan los datos satelitales. Su principal función es garantizar las prestaciones por medio del monitoreo del primer segmento (segmento espacial) y aplicar todas las correcciones de posición orbital y temporal; cuando se realizan estas correcciones se envía la información a los relojes atómicos (García Álvarez, 2008).
- Segmento de usuario: cuando nos referimos a usuarios hablamos del equipo GNSS que son los que reciben todas las señales que vienen del primer segmento.

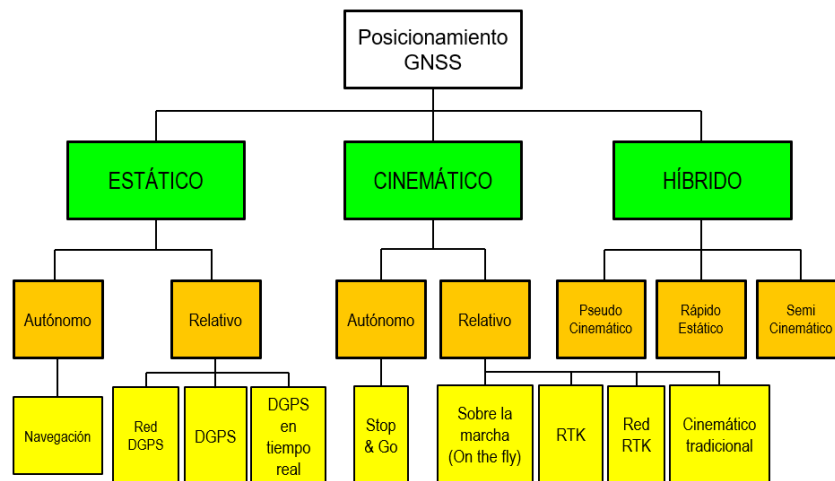
4.4.3. Georreceptor

En geomática, un georreceptor es el instrumento más importante en una operación de medición GNSS, cuya función principal es la de convertir las señales transmitidas por los satélites a medidas de posición, velocidad y tiempo. Los georreceptores se clasifican por su grado de precisión en navegadores, cartográficos, topográficos y geodésicos. (Sickle, 2015)

4.5. Métodos de posicionamiento

Los métodos de posicionamiento de los GNSS se refieren al método utilizado para mejorar la calidad de información que el usuario puede tener de la ubicación geográfica (punto de ubicación).

Figura 6. **Métodos de posicionamiento**



Fuente: Morales (2018) *Métodos de Posicionamiento*. Consultado el 20 de diciembre de 2019.

Recuperado de

<https://drive.google.com/drive/folders/1AEaC80XDR3TpRRQehP6kUmYFL2YA7e-0?usp=sharing>.

4.6. Teoría de la medición y errores

Para determinar las diferencias entre conjuntos de datos es importante utilizar medidas estadísticas, cuando se tiene un set de datos como comparador se puede determinar el error que existe con los otros sets de datos. Por ello, las fórmulas estadísticas para realizar evaluación en la información son fundamentales para tener una conclusión de que datos son más convenientes de utilizar.

4.6.1. Estimador o estadístico

Es un dato que representa un valor representativo de una muestra, estos pueden ser media, desviación estándar, varianza entre otros, para el análisis de la información de los modelos de elevación digital se tomaran en cuenta 5 estimadores, los cuales son:

- Error medio
- Error medio absoluto
- Error RMS (Error medio cuadrático)
- Desviación Estándar
- Error estándar

4.6.2. Error Medio (SEM)

El error medio en muchos documentos se le conoce como el segundo momento (sobre el origen), por lo tanto, incorpora la varianza del estimador y el sesgo. Para un estimador insesgado el error medio es la varianza del estimador. Para la estadística un error típico se refiere a las variaciones inevitables, ese que se produce por factores distorsionantes desconocidos o conocidos. La desviación

estándar (SD) es la variación en los valores (datos) de una variable, a diferencia del error estándar de la media (SEM) es la dispersión de la media de una muestra de valores si este continuará tomando datos de las muestras. (Hopkins, 2018).

Entonces el SEM nos muestra una idea de la exactitud de los datos de la media y el SD nos dará información sobre la variabilidad de las observaciones individuales, la formula está representada de la siguiente manera:

$$SEM = SD/\sqrt{n}$$

Donde:

SEM = error estándar de la media

SD = desviación estándar

n = tamaño de la muestra

4.6.3. Error Medio Absoluto (MAE)

Es la diferencia entre la media y el valor tomado como exacto, este puede ser positivo o negativo. Este error, es una medida del error de pronostico en análisis de series de tiempo la cual puede ser homogénea o espaciada, además tienen que cumplir con tener el mismo tamaño (Secretaria de Educación Pública de México [SEP], 2017)

La fórmula es la siguiente:

$$MAE = \frac{SAE}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |xi - \hat{x}i|}{N}$$

Donde:

xi = son las observaciones actuales de las series de tiempo

$\hat{x}i$ = es la serie de tiempo estimada o pronosticada

SAE= es la suma de los errores absolutos (o desviaciones)

n= es el número de puntos de datos no faltantes

4.6.4. Error Medio Cuadrático (RMS)

Mide el error que hay entre dos grupos de datos, funciona como un comparador entre un valor evaluado y otro conocido. Se le llama también Raíz de la desviación cuadrático media y esta es una de las técnicas más utilizadas en sistemas de información geográfica. (ArcGeek, 2018).

La diferencia que tiene con el RMS se utiliza en muchas aplicaciones al momento de comparar varios sets de información.

- Sintaxis

MSE (X, F)

- X: es el resultado eventual de datos de las series de tiempo (un despliegue de celdas unidimensional (e.g. fila o columna).
- F: es el pronóstico de datos de series de tiempo (un despliegue de celdas unidimensional (e.g. fila o columna).

Es importante tomar en cuenta que la serie de tiempo tiene que ser homogénea o espaciada de la misma manera, tienen que ser de tamaños idénticos, pueden incluir espacios en blanco estos se excluirán del MSE. La fórmula es la siguiente:

$$MSE = \frac{1}{N} * \sum_{t=1}^N (y_t - f_t)^2 = \frac{SSE}{N}$$

y_t = es el resultado actual en el tiempo t

f_t = es el pronóstico de valor en el tiempo t

SSE= es la suma del error cuadrático

4.6.5. Desviación estándar

Es la medida de dispersión utilizada frecuentemente debido a que indica lo dispersos que están los datos con relación a la media. La interpretación más fácil es mientras mayor es la desviación mayor es la dispersión de la información analizada. Este parámetro se utiliza para determinar un valor de referencia para considerar la variación en algún proceso u análisis. La fórmula es la siguiente:

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

Donde:

n= es el tamaño de la muestra

x-bar= es la media aritmética de la muestra

4.6.6. Error Estándar (EE)

Es una estimación de cuánto varía el valor de una estadística de prueba de muestra a muestra, se le conoce como una medida de incertidumbre de la estadística. Este se calcula tomando la desviación estándar de la distribución de muestreo para la estadística de prueba. (International Business Machines [IBM], 2017.)

Es una medida de la variación del estimador el que permite cuantificar el error de estimación (variación entre las estimaciones) e indica la confiabilidad de la media obtenida de una muestra, la fórmula es la siguiente:

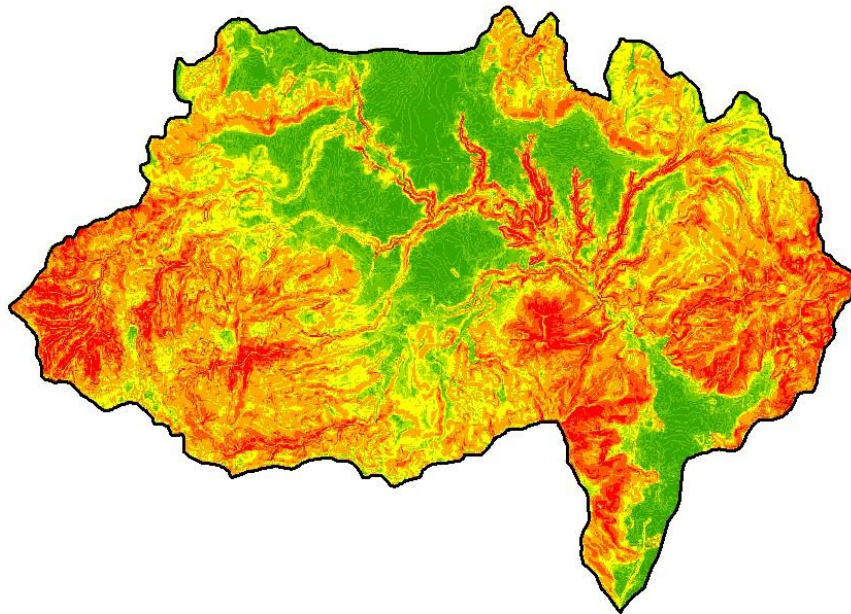
$$\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la investigación presentan una visión general de los modelos de elevación digital, sus similitudes, diferencias y principalmente los parámetros estadísticos que permiten tener una referencia de la diferencia en valores de altura.








Uno de los insumos principales para generar los resultados fue la elaboración de un mapa de pendientes (Ver figura 7), haciendo uso de la clasificación del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (Ver tabla VI), con la que se generó la estratificación de muestras.

Figura 7. **Representación de las pendientes en el área de estudio**



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

Tabla VI. Clases de pendiente utilizadas para el análisis

Clase de Pendiente	Código	Rango de Pendiente	Color
Ligeramente plana	a	0 a 3	
Ligeramente inclinada	b	3 a 7	
Moderadamente inclinada	c	7 a 12	
Fuertemente inclinada	d	12 a 25	
Ligeramente escarpada	e	25 a 50	
Moderadamente escarpada	f	50 a 75	
Fuertemente escarpada	g	>75	

Fuente: DIGEGR (2013). *Estudio Semidetallado de los Suelos del Departamento de Sololá, Guatemala.*

5.1. Determinación de la consistencia geométrica de los DEM obtenidos a partir de las imágenes satelitales ALOS PALSAR, SRTM y ASTER

El análisis se inició con la investigación de literatura sobre las características principales de los DEM analizados, esta información fue necesaria para ser considerada en el momento que se realizaron los análisis, se investigó resolución espacial, método y año de generación. (Ver tabla VII).

Tabla VII. Características de los DEM analizados en la investigación

DEM	Nombre completo	DATUM vertical	Resolución espacial	Año de generación / publicación
DEM Aster	<i>Global Digital Elevation Model</i>	EGM96	30 metros	2011
DEM Alos Palsar	Alos Palsar DEM	EGM96	12.5 metros	2010

Continuación Tabla VII.

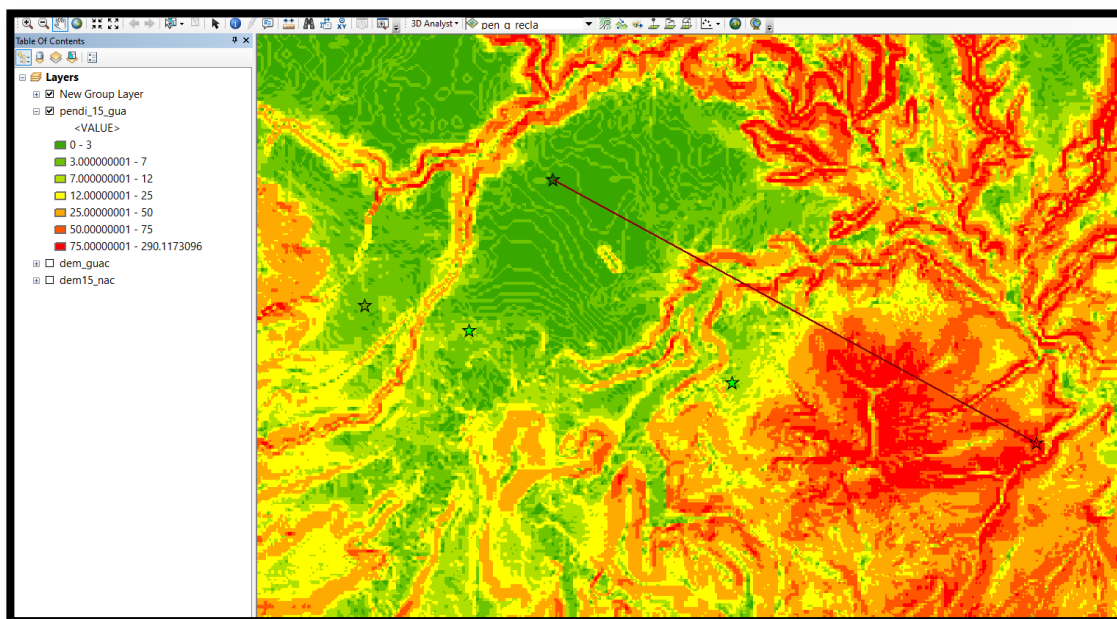
Continuación tabla VII.

DEM SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>	EGM96	30 metros	2000
DEM nacional	Sin nombre	Puerto San José 1949/50	15 metros	2006

Fuente: elaboración propia.

Para determinar la consistencia geométrica de los DEM obtenidos de imágenes satelitales se generó un perfil topográfico en una distancia de 4,761 metros en el área de la cuenca como se observa en la figura 8. Se seleccionó esta área de la cuenca debido a que en el perfil se podían observar las 7 clases de pendientes analizadas.

Figura 8. Perfil Topográfico seleccionado por pendiente

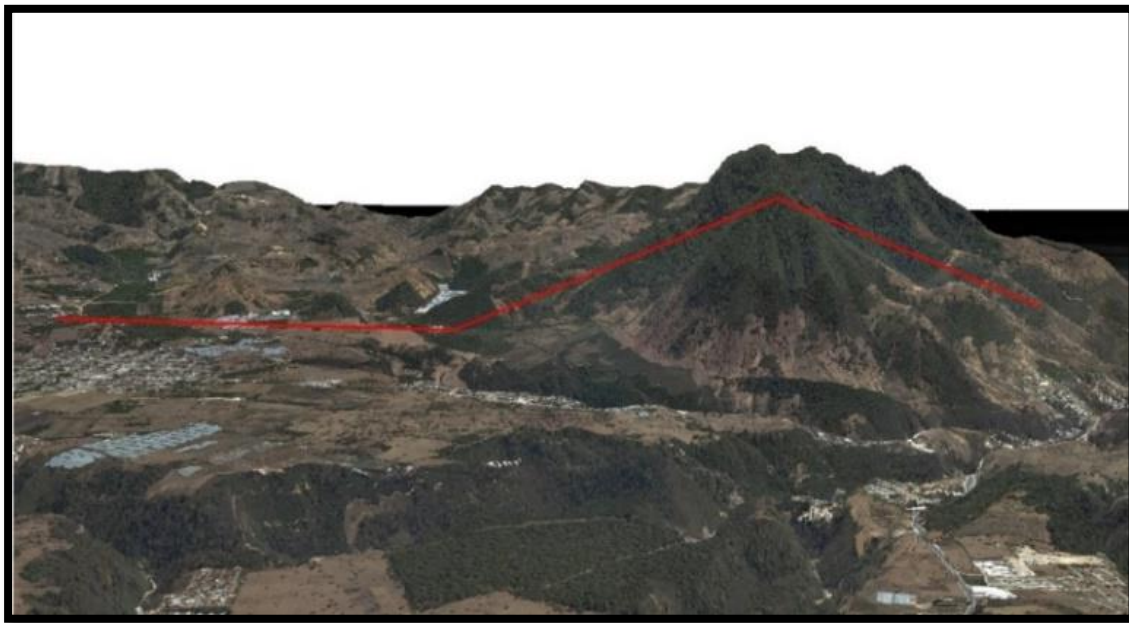


Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

Este perfil se modeló con herramientas GIS para identificar el modelo principal del área, seguidamente se comparó con el modelo de elevación oficial de Guatemala con una resolución de 15 metros. Se tomó como base este modelo y también se comparó con los modelos de elevación digital proveniente de imágenes satelitales.

El perfil topográfico se generó para visualizarlo en tres dimensiones (3D) para poder representar el área de estudio con imágenes de alta resolución (Ver figura 9).

Figura 9. Representación del perfil topográfico 3D a analizar en ortofotos



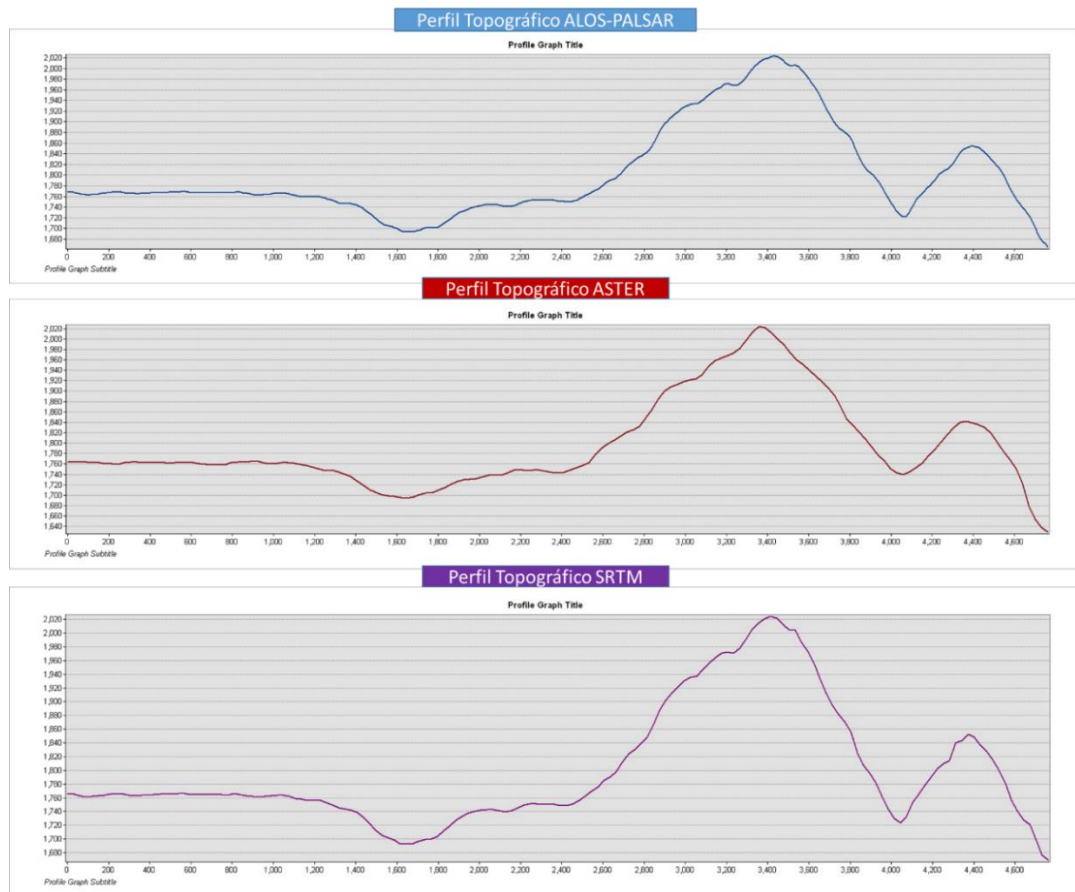
Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

Esta modelación representa lo que se tiene en la realidad del terreno, genera una idea más clara de los perfiles topográficos presentados en la siguiente sección, esta representación se realizó con las ortofotos tomadas en el

año 2006, las cuales dieron origen al DEM nacional que también se representa en el análisis.

Los perfiles topográficos modelados por los DEM ALOS PALSAR, ASTER y SRTM se pueden observar en la figura 10.

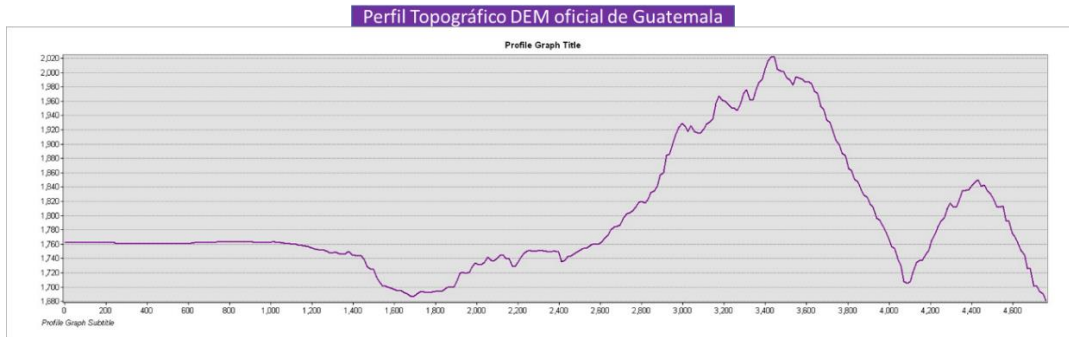
Figura 10. **Presentación de los perfiles topográficos de imágenes satelitales**



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

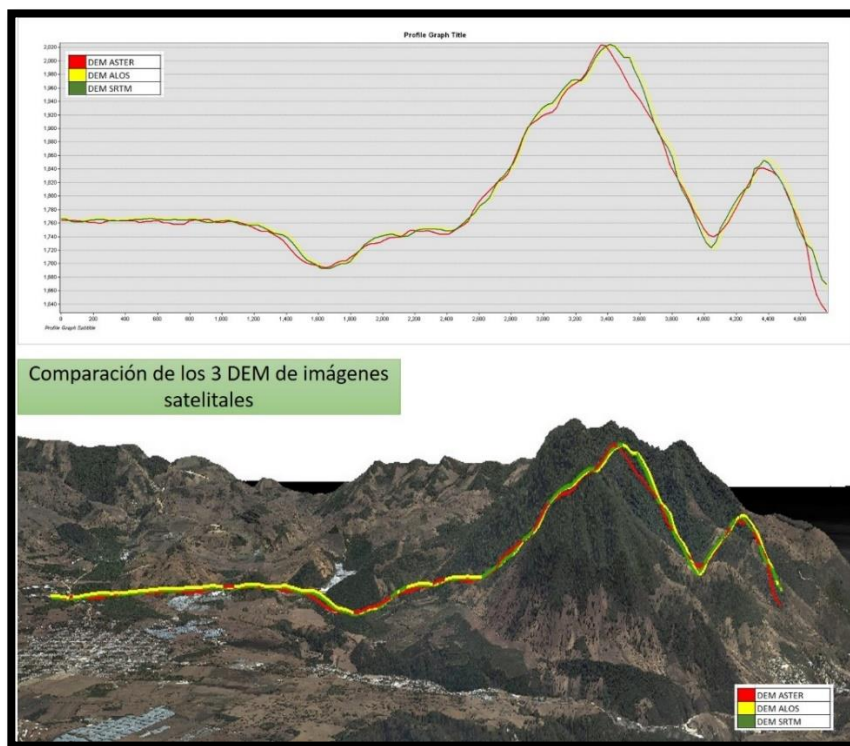
Además de comparar los 3 DEM que vienen de imágenes satelitales, se realizó el perfil topográfico del DEM nacional de Guatemala con una resolución espacial de 15 metros. (Ver figura 11)

Figura 11. Perfil Topográfico del DEM nacional de Guatemala



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

Figura 12. Comparación de los 3 DEM de imágenes satelitales

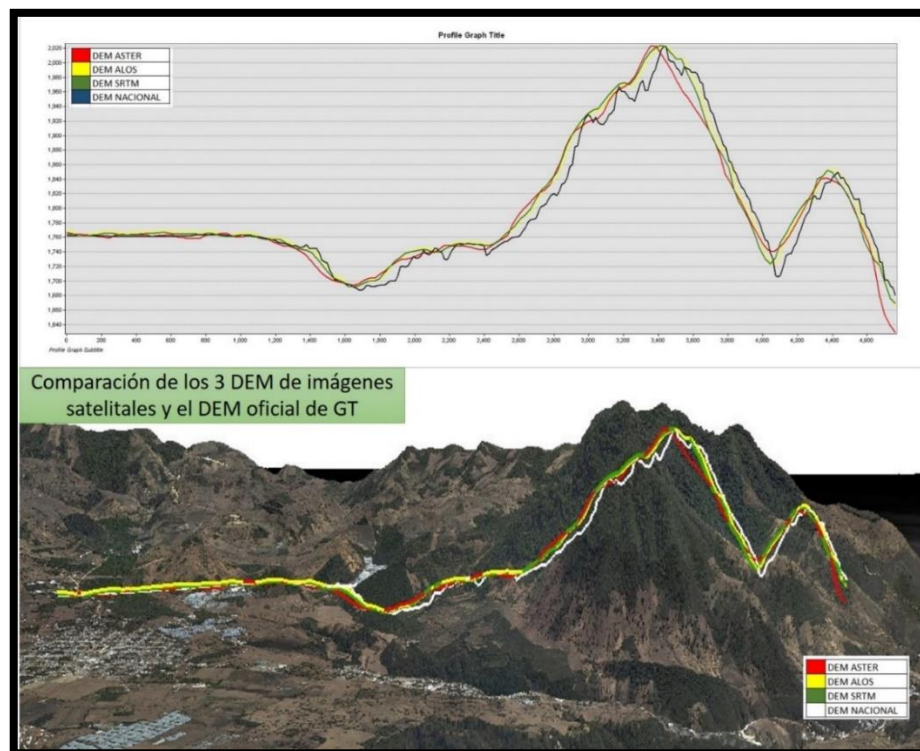


Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

Los perfiles topográficos de cada modelo nos ilustran el modelo de elevación digital, sin embargo, para poder evaluar los 3 modelos se generaron tanto los perfiles topográficos como la modelación 3D unidos para observar la consistencia de los 3 DEM, como se presenta en la figura 12.

Sin embargo, en el transcurso del análisis fue necesario generar una comparación de métodos, tanto los generados de imágenes satelitales como el nacional, debido a que se encontraron diferencias significativas, la comparación se muestra en la figura 13.

Figura 13. **Comparación de los 3 DEM de imágenes satelitales y el DEM nacional**



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

5.2. Identificación de las diferencias de elevación de los 4 DEM

Para identificar las diferencias de los modelos de elevación que provienen de imágenes satelitales, con información encontrada en los portales web o información en línea. Sin embargo, el DEM nacional no tiene información disponible en forma de metadatos, por ello se realizaron 2 entrevistas a los jefes de los departamentos de SIG del MAGA e IGN debido a que ellos vivieron la experiencia de revisar y validar la información del DEM generado en el año 2006 y las ortofotos nacionales.

5.2.1. Entrevistas a los departamentos de SIG del MAGA e IGN

Se realizaron dos entrevistas para indagar en la información general y específica del Modelo de Elevación Digital –DEM- de resolución espacial de 15 metros utilizado nacionalmente por las instituciones Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos –DIGEG- del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación –MAGA y el Instituto Geográfico Nacional. Para ver las entrevistas vea el apéndice 1.

En estas entrevistas los jefes de los departamentos de SIG de MAGA e IGN respondieron a 11 preguntas en las que se investigó sobre el objetivo, método y validación del DEM, también el conocimiento personal de otros DEM y la importancia de la investigación.

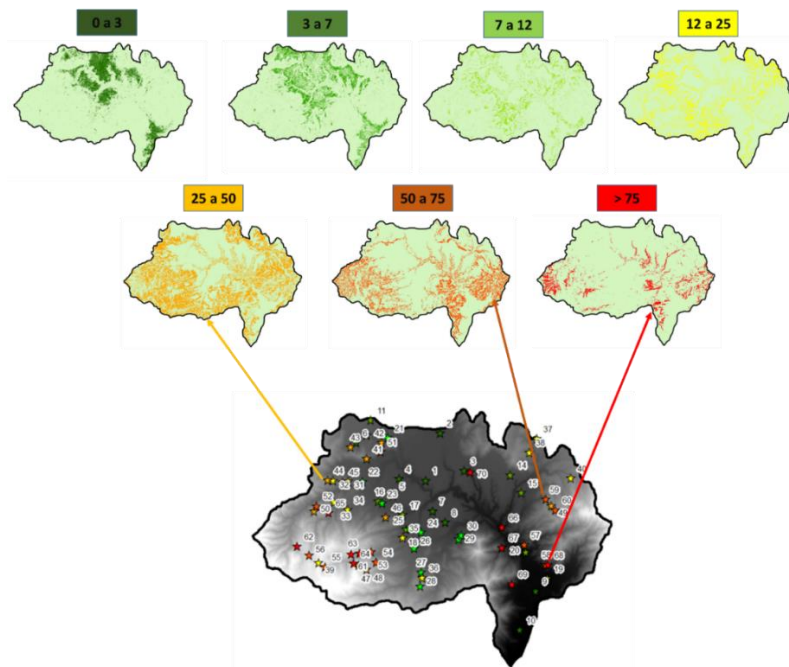
5.2.2. Análisis estadístico de los 4 DEM

Para identificar las diferencias de elevación entre los 4 DEM, los 3 que se generaron a partir de imágenes satelitales y el DEM nacional de Guatemala que tiene una resolución espacial de 15 metros se realizó un muestreo aleatorio en

cada una de las clases de pendientes mencionadas en la tabla VI las cuales se tomaron de referencia para identificar los estratos.

En cada clase de pendiente se agregó una muestra de diez puntos, estos 10 puntos por estrato generaron una muestra total de 70 puntos en el área de estudio como se muestra en la figura 14.

Figura 14. **Ejemplificación de la muestra de 70 puntos en el área de estudio**



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

5.2.3. Comparación de datos por punto de muestreo

Para esta muestra de 70 puntos, se calculó las coordenadas geográficas en proyección UTM zona 15 y los datos de elevación para los 4 modelos de elevación digital que son SRTM, ASTER, ALOS PALSAR y el DEM nacional de

Guatemala. Para identificar el comportamiento se calculó el error medio de cada punto de ubicación.

En la tabla VIII se presentan 4 datos por rango que representan el comportamiento de cada uno de los estratos, la información completa se presenta en el apéndice 2.

Tabla VIII. Datos de elevación de la muestra en el área de estudio

Id	Coordenadas		Pendiente categoría	Datos de Elevación DEM				Error medio	Rango
	X	Y		SRTM	ASTER	ALOS PALSA R	NACIONAL		
1	736472	1618758	0 a 3	1761	1763	1761	1762	0.48	0.48 - 3.79
2	737357	1621661	0 a 3	1766	1763	1768	1764	1.11	
4	734844	1618872	0 a 3	1772	1771	1774	1770	0.85	
6	732228	1621061	0 a 3	1844	1846	1846	1843	0.75	
11	733108	1622433	3 a 7	1850	1846	1852	1849	1.25	0.25 - 1.31
13	733767	1621712	3 a 7	1819	1823	1824	1819	1.31	
17	735066	1616672	3 a 7	1772	1771	1773	1768	1.08	
18	735281	1615802	3 a 7	1800	1800	1802	1797	1.03	
24	736186	1615596	7 a 12	1787	1788	1789	1781	1.8	0.71 - 2.90
26	735748	1614634	7 a 12	1831	1840	1833	1826	2.9	
27	736178	1613170	7 a 12	1914	1912	1915	1908	1.55	
30	738616	1615423	7 a 12	1777	1781	1780	1773	1.8	
31	731727	1618714	12 a 25	1897	1885	1889	1886	2.72	0.75 - 2.95
32	730812	1618748	12 a 25	1933	1939	1942	1936	1.94	
36	736262	1612835	12 a 25	1954	1964	1957	1950	2.95	
39	729923	1613748	12 a 25	2422	2422	2425	2412	2.84	
41	732850	1620089	25 a 50	1814	1811	1817	1814	1.22	1.03 - 5.24
43	731873	1620791	25 a 50	1901	1887	1897	1885	3.86	
46	734009	1616511	25 a 50	1838	1841	1850	1850	3.09	
49	744127	1617230	25 a 50	1997	2001	1998	1978	5.24	
51	733715	1620509	50 a 75	1842	1817	1838	1847	6.6	1.55 - 7.78
52	729807	1617208	50 a 75	2044	2063	2055	2039	5.41	
53	733148	1614411	50 a 75	2039	2021	2051	2056	7.78	
59	743781	1617621	50 a 75	1954	1971	1963	1949	4.87	

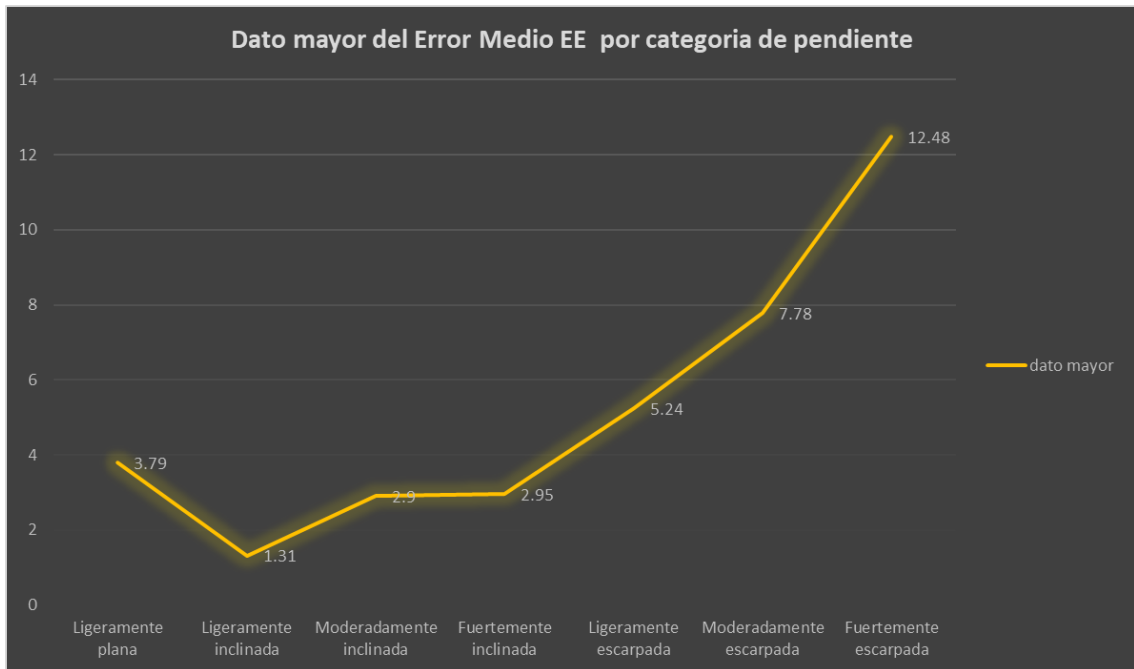
Continuacion tabla VIII.

61	731918	1614260	>75	2195	2196	2212	2238	10.04	3.77 - 12.48
64	732085	1613714	>75	2270	2312	2273	2270	10.27	
65	730558	1616791	>75	1937	1944	1936	1965	6.74	
67	741102	1614674	>75	1658	1630	1662	1691	12.48	

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Al realizar el análisis del error medio por cada punto se comparó los 4 modelos de elevación, de los cuales se identificó los datos mayores por cada uno de los estratos. (Ver figura 15)

Figura 15. **Gráfica que representa los datos mayores por error medio por cada estrato**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

5.2.4. Comparación de datos por modelo de elevación digital

Esta comparación se realizó con estimadores estadísticos como la desviación estándar, varianza y cuatro tipos de errores (error estándar, error medio, error medio absoluto y error medio cuadrático) estos datos fueron indicadores para comparar cada modelo de elevación digital contra el DEM nacional de Guatemala.

Al analizar la muestra de 70 puntos y realizar las estadísticas no se identificó un patrón que orientará para definir cuál de los DEM SRTM, ASTER y ALOS PALSAR es el que tiene valores más parecidos con el DEM nacional. Debido a eso se realizó una muestra más grande para obtener 100 puntos por estrato para un total de 700 muestras, la ubicación de estos puntos se puede observar en la figura 20 y los datos estadísticos de ambas muestras se presentan en la tabla IX.

Tabla IX. **Resultados estadísticos de la comparación de los 4 DEM**

Estrato	Modelos de elevación digital analizados	DATOS MUESTRA DE 70 PUNTOS					DATOS MUESTRA DE 700 PUNTOS				
		Desviación Estándar	Error ar EE	Error Medio SEM	Comparado con DEM nacional Error Medio Absoluto MAE	Error Medio cuadrático RMS	Desviación Estándar	Error ar EE	Error Medio SEM	Comparado con DEM nacional Error Medio Absoluto MAE	Error Medio cuadrático RMS
a (0 a 3)	SRTM	103.58	31.07	32.75	0.35	115.6	119.29	11.87	11.93	0.019	1169.64
	ASTER	105.31	31.59	33.3	0.18	57.6	119.43	11.88	11.94	0.018	1246.09
	ALOS P.	104.46	31.34	33.03	0.26	260.1	119.28	11.87	11.93	0.019	3102.49
b (3 a 7)	SRTM	108.25	32.48	34.23	0.08	0	141.35	14.06	14.13	0.003	510.76
	ASTER	107.99	32.4	34.15	0.05	0.9	140.34	13.96	14.03	0.008	216.09
	ALOS P.	108.43	32.53	34.29	0.09	52.9	141.15	14.04	14.12	0.001	1989.16
c (7 a 12)	SRTM	81.82	24.55	25.87	0.04	90	208.37	20.73	20.84	0.004	252.81
	ASTER	80.73	24.22	25.53	0.07	240.1	207.5	20.65	20.75	0.012	265.69
	ALOS P.	80.99	24.3	25.61	0.05	220.9	208.24	20.72	20.82	0.005	1544.49

Continuación tabla IX.

d (12 a 25)	SRTM	165.46	49.64	52.32	0.23	144.4	233.37	23.22	23.34	0.011	1310.44
	ASTER	166.42	49.93	52.63	0.33	108.9	234.3	23.31	23.43	0.002	272.25
	ALOS P.	166.08	49.82	52.52	0.29	280.9	233.41	23.22	23.34	0.011	2970.25
e (25 a 50)	SRTM	168.29	50.49	53.22	0.28	44.1	257.39	25.61	25.74	0	404.01
	ASTER	171.4	51.42	54.2	0.03	0.1	256.49	25.52	25.65	0.009	121
	ALOS P.	168.32	50.5	53.23	0.28	230.4	256.88	25.56	25.69	0.005	1413.76
f (50 a 75)	SRTM	219.95	65.99	69.55	0.24	19.6	220.84	21.97	22.08	0	94.09
	ASTER	216.16	64.85	68.36	0.14	90	221.27	22.02	22.13	0.005	196
	ALOS P.	220.13	66.04	69.61	0.26	28.9	220.47	21.94	22.05	0.003	967.21
g (>75)	SRTM	280.23	84.07	88.62	0.15	2924.1	223.61	22.25	22.36	0.033	428.49
	ASTER	295.27	88.58	93.37	1.35	4796.1	226.25	22.51	22.62	0.059	10567.84
	ALOS P.	284.27	85.28	89.89	0.25	1638.4	222.02	22.09	22.2	0.017	265.69

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

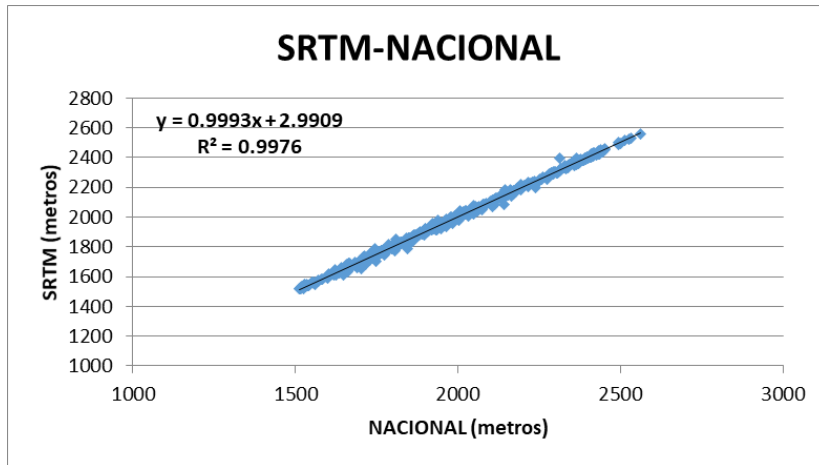
5.2.5. Regresión lineal entre los DEM evaluados

Se realizó un análisis de regresión lineal para los tres modelos de elevación digital SRTM, ASTER, ALOS PALSAR comparando los datos de elevación con el DEM nacional, el datum vertical de los dem obtenidos con imágenes satelitales es el WGS84 y geoide EGM96 mientras que el datum vertical del DEM nacional es del puerto San José 1949/50 el cual es un datum nacional; sin embargo, la diferencia de datum no afecta la comparación porque no compromete la naturaleza del DEM, debido a que se esta analizando la confiabilidad del DEM.

Los analisis de regresión se realizarón para poder identificar la similitud entre cada modelo obtenido con imágenes satelitales contra el DEM nacional.

El resultado de la regresión lineal para el DEM SRTM de 30 metros vs el DEM nacional de 15 metros es de 99.76 %. (Ver Figura 16)

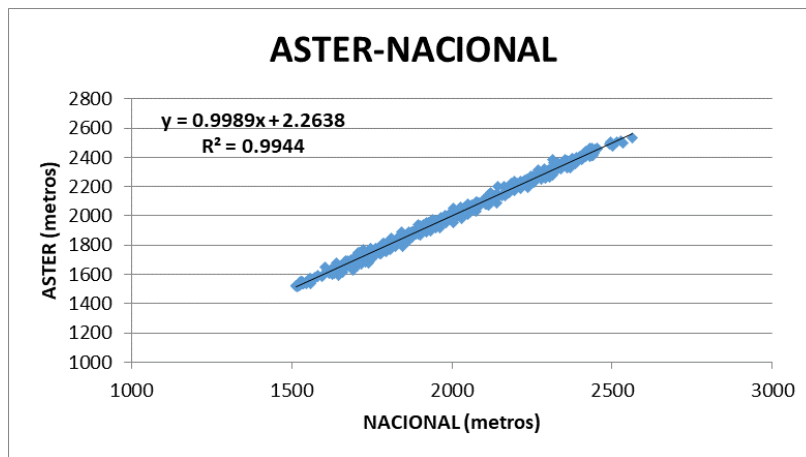
Figura 16. Regresión lineal de SRTM vs Nacional



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la regresión lineal para el DEM ASTER de 30 metros vs el DEM nacional de 15 metros es de 99.44 %. (Ver Figura 17).

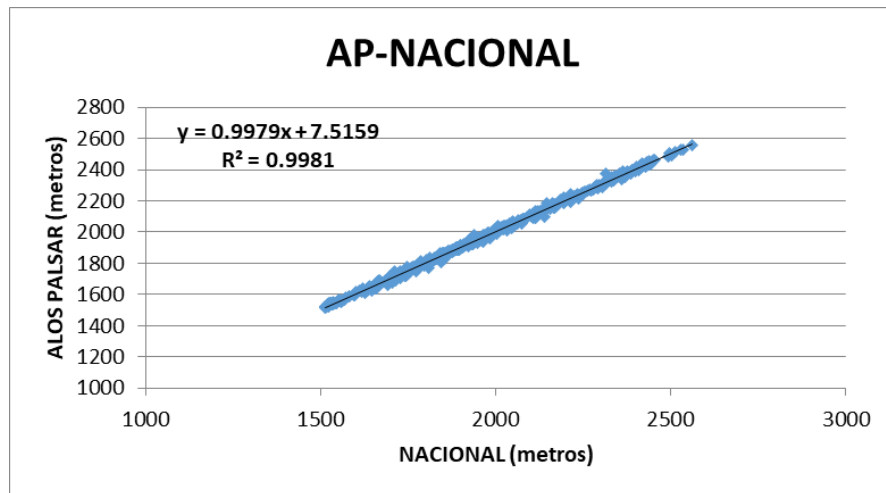
Figura 17. Regresión lineal de ASTER vs Nacional



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la regresión lineal para el DEM ALOS PALSAR de 12.5 metros vs el DEM nacional de 15 metros es de 99.81 %. (Ver Figura 18).

Figura 18. **Regresión lineal de Alos Palsar vs Nacional**



Fuente: elaboración propia.

5.2.6. Análisis de varianza de los DEM evaluados

Al obtener los datos de los errores y las regresiones lineales se realizó también un análisis de varianzas para cada DEM obtenido con imágenes satelitales, debido a que se está comparando los datos de altura, en el cual se consideró cada estrato trabajado como un bloque, esto se realizó para identificar las diferencias y si estas son significativas o no. El método de comparación fue de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 y 95 % de confianza.

Para realizar este análisis de varianza se utilizaron dos hipótesis:

- Ho: No existe diferencia significativa entre DEM evaluado y el DEM nacional.
- Ha: Existe diferencia significativa entre DEM evaluado y el DEM nacional.

Tabla X. Análisis de varianza entre DEM SRTM y nacional

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	37096094.94	447	82989.03	853.63	<0.0001
SRTM	37095715.74	441	84117.27	865.24	<0.0001
Bloque	379.20	6	63.20	0.65	0.6900
Error	24499.10	252	97.22		
Total	37120594.03	699			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Análisis de varianza entre DEM ASTER y nacional

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	37065374.32	451	82184.87	369.10	<0.0001
Bloque	7749151.19	6	1291525.20	5800.43	<0.0001
Aster	29316223.13	445	65879.15	295.87	<0.0001
Error	55219.71	248	222.66		
Total	37120594.03	699			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Análisis de varianza entre ALOS PALSAR y nacional

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	37097166.55	433	85674.75	972.77	<0.0001
Bloque	7749151.19	6	1291525.20	14664.22	<0.0001
AP	29348015.36	427	68730.72	780.38	<0.0001
Error	23427.48	266	88.07		
Total	37120594.03	699			

Fuente: elaboración propia.

5.3. Determinación del DEM que represente con mejor correspondencia los datos de elevación comparada con información topográfica precisa

El tercer objetivo comprende la comparación de información topográfica precisa vs los datos de elevación de los 4 Modelos de Elevación Digital, que son SRTM, ASTER, ALOS PALSAR y el nacional, esta información topográfica se levantó en campo por medio de un Georreceptor de doble frecuencia amarrando

cada uno de los puntos con un banco de marca ubicado en Chimaltenango. En total se realizaron 35 puntos en el área de la cuenca y 1 dato del banco de marca, para tener un total de 36 datos. La ubicación de los puntos se puede observar en la figura 20.

5.3.1. Información topográfica precisa de los 36 puntos levantados en campo

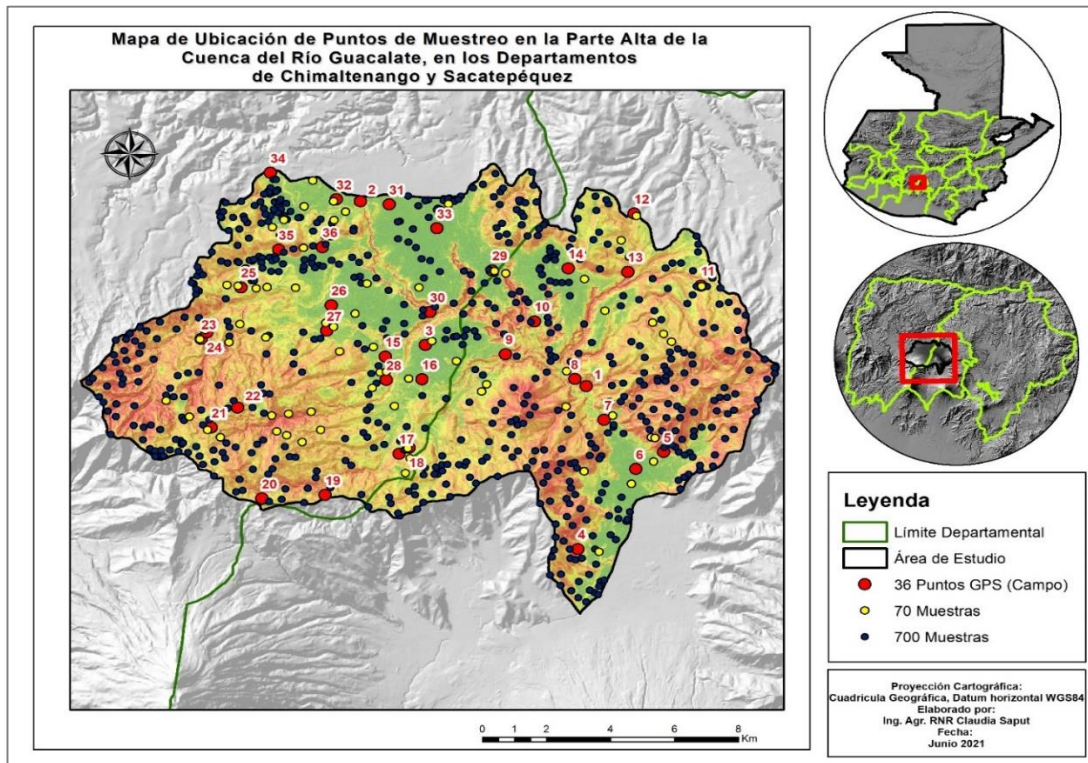
Estos datos se tomaron dentro de la cuenca de estudio, en la cual se tuvo en consideración la pendiente para realizar las mediciones, estos puntos se tomaron con un georreceptor Topcon de doble frecuencia amarrándolo a un banco de elevación certificado como se puede observar en la figura 19.

Figura 19. **Banco de marca en Chimaltenango**



Fuente: [Fotografía de Claudia Saput]. (Chimaltenango, Chimaltenango. 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 20. **Mapa de la ubicación de los 36 puntos levantados en campo**



Fuente: elaboración propia, realizado con Arc Map 10.8®.

En la siguiente tabla se presentan los datos resultantes de las mediciones en campo de los 36 puntos, con sus coordenadas X, Y y Z (el dato de elevación) además los datos de los otros modelos que son los utilizados para la regresión lineal, y el dato del error estándar por cada uno de los puntos.

Tabla XIII. **Datos de elevación tomados en campo con geo receptor de doble frecuencia**

ID	INFORMACIÓN TOPOGRAFICA PRECISA (CAMPO)			INFORMACIÓN DE DEM EVALUADOS				ERROR ESTANDAR
	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION (Z) mt	SRTM mt	ASTER mt	ALOS PALSAR mt	NACIONAL mt	
1	14.601076	-90.756099	1610	1615	1614	1620	1628	2.73
2	14.658907	-90.821643	1796	1797	1793	1799	1796	0.87
3	14.613837	-90.802791	1762	1765	1758	1767	1763	1.36
4	14.549981	-90.758508	1573	1581	1558	1575	1577	3.52
5	14.580439	-90.733632	1554	1567	1563	1564	1553	2.50

Continuación tabla XIII.

6	14.575059	-90.741744	1538	1540	1538	1542	1541	0.74
7	14.590465	-90.750899	1554	1558	1559	1564	1557	1.50
8	14.603293	-90.759414	1606	1620	1613	1631	1631	4.35
9	14.611043	-90.779585	1720	1724	1720	1727	1721	1.21
10	14.621334	-90.771159	1702	1711	1699	1710	1711	2.26
11	14.632599	-90.722863	1995	1996	1997	1998	1991	1.08
12	14.655116	-90.742258	1902	1902	1912	1904	1902	1.72
13	14.636852	-90.74411	1814	1827	1812	1826	1840	4.53
14	14.63792	-90.761382	1784	1786	1787	1788	1786	0.57
15	14.610179	-90.81441	1771	1774	1777	1775	1774	0.89
16	14.603128	-90.803668	1777	1786	1780	1786	1779	1.70
17	14.579796	-90.810255	1939	1941	1943	1942	1943	0.73
18	14.581636	-90.807386	1907	1913	1910	1916	1908	1.44
19	14.566818	-90.831709	2197	2201	2191	2203	2193	2.04
20	14.565728	-90.850056	2384	2393	2387	2396	2386	2.06
21	14.587921	-90.864729	2423	2424	2426	2424	2422	0.58
22	14.594233	-90.857121	2301	2318	2292	2316	2334	6.49
23	14.615655	-90.86768	2085	2083	2097	2090	2079	2.77
24	14.61768	-90.8661	2088	2084	2089	2089	2079	1.71
25	14.631848	-90.85622	1933	1934	1934	1938	1931	1.04
26	14.626287	-90.830037	1785	1789	1792	1793	1788	1.25
27	14.618282	-90.831319	1802	1802	1801	1806	1804	0.79
28	14.602949	-90.814032	1801	1807	1810	1806	1804	1.35
29	14.637295	-90.78344	1766	1769	1771	1772	1767	0.98
30	14.624227	-90.801438	1723	1703	1710	1715	1715	2.99
31	14.65795	-90.81332	1783	1781	1783	1783	1781	0.41
32	14.659477	-90.828665	1819	1823	1822	1826	1819	1.18
33	14.650499	-90.799467	1762	1763	1765	1767	1761	0.96
34	14.667812	-90.847704	1868	1873	1868	1874	1868	1.23
35	14.643712	-90.845339	1845	1861	1846	1865	1851	3.61
36	14.644515	-90.832646	1784	1800	1782	1795	1799	3.36

Fuente: elaboración propia.

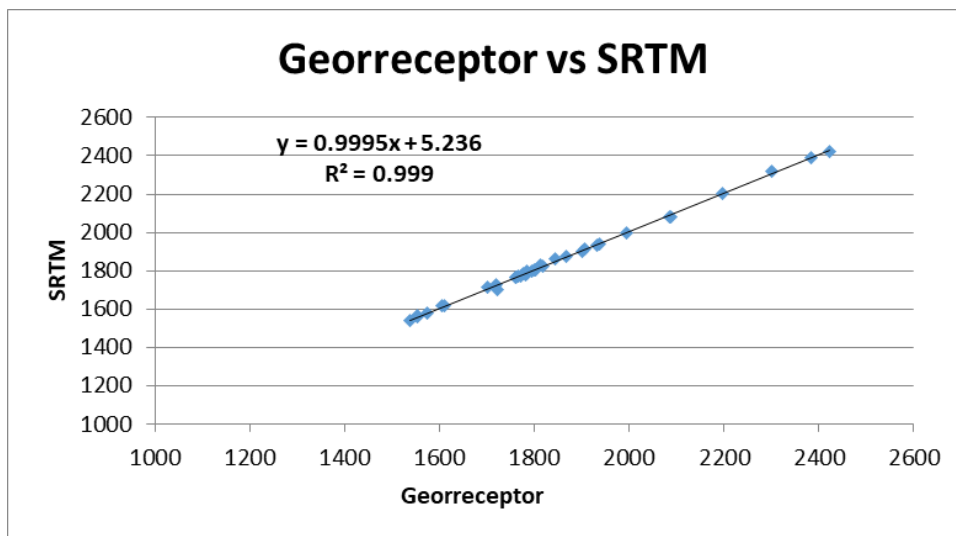
Los 35 puntos fueron amarrados al Datum Vertical de Guatemala, que es el de Puerto San José 1949/50, habiéndose obtenido un error promedio de ± 2 cm., en toda la muestra.

5.3.2. Análisis de regresión lineal

Se realizó un análisis de regresión lineal para los cuatro modelos de elevación digital SRTM, ASTER, ALOS PALSAR y el nacional comparando los datos de elevación con los datos obtenidos en campo tomados con un georreceptor de doble frecuencia la cual es considerada como información topográfica precisa, este indicador se realizó para poder identificar la similitud entre cada DEM y los datos obtenidos de campo.

El resultado de la regresión lineal para el DEM SRTM de 30 metros vs los datos de campo es de $R^2=0.999$. (Ver Figura 21)

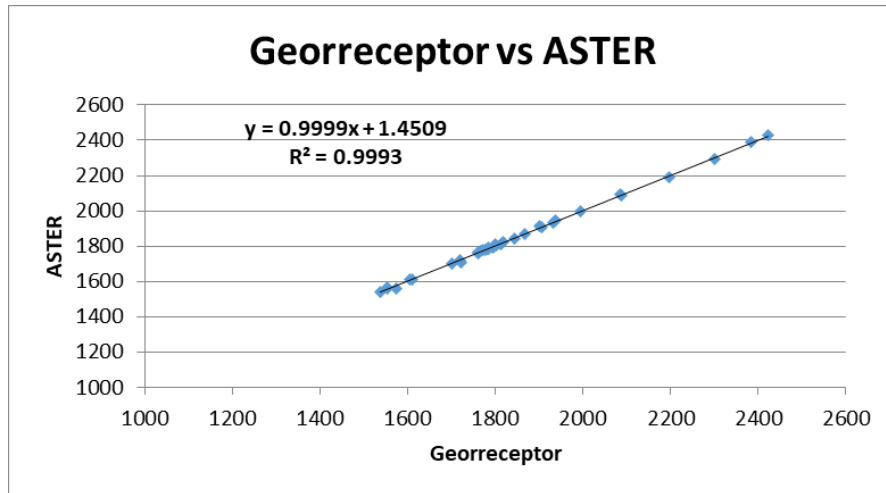
Figura 21. **Regresión lineal de SRTM vs datos de campo**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la regresión lineal para el DEM ASTER de 30 metros vs los datos de campo es de $R^2=0.9993$. (Ver Figura 22).

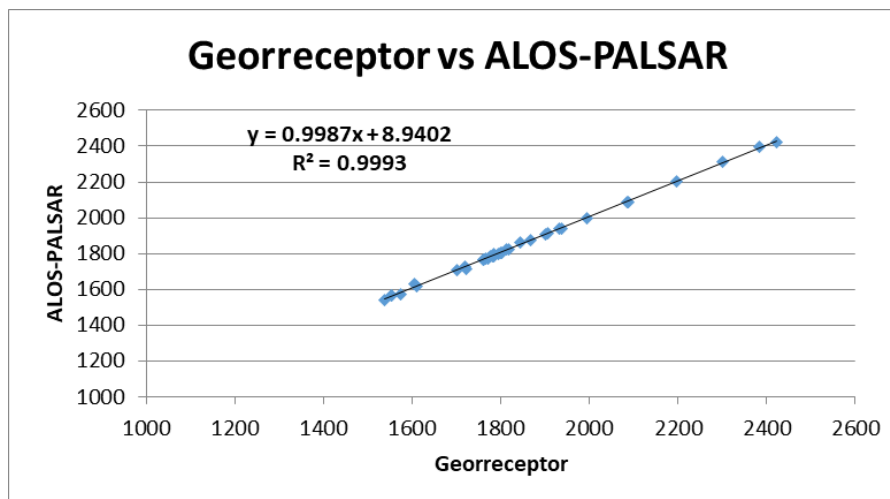
Figura 22. **Regresión lineal de ASTER vs datos de campo**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la regresión lineal para el DEM ALOS PALSAR de 12.5 metros vs los datos de campo es de $R^2=0.9993$. (Ver Figura 23).

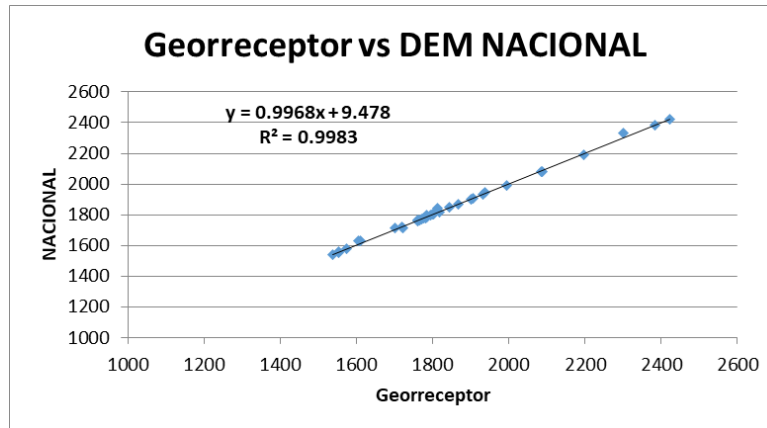
Figura 23. **Regresión lineal de Alos Palsar vs datos de campo**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la regresión lineal para el DEM nacional de 15 metros vs los datos de campo es de $R^2=0.9983$. (Ver Figura 24)

Figura 24. **Regresión lineal del DEM nacional vs datos de campo**



Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se realizó un análisis de suma de diferencias que consiste en restar la elevación del dato real (obtenido en campo) con la elevación del DEM evaluado por cada uno de los puntos, así se puede determinar en cuantos metros se diferencian en cada punto. La sumatoria de cada uno de los modelos se presenta en la columna de suma de diferencias. (Ver tabla XIV)

Tabla XIV. **Suma de diferencias y coeficiente de variación de los modelos de elevación vs los datos de campo**

DEM	COMPARADOR	R^2	SUMA DE DIFERENCIAS
SRTM	DATOS TOMADOS CON GEORRECEPTOR	0.999	213.46
ASTER		0.9993	163.06
ALOS-PALSAR		0.9993	255.06
NACIONAL		0.9983	204.88

Fuente: elaboración propia.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Es importante mencionar que los resultados obtenidos se realizaron sin hacer cambios a la resolución de los DEM, con el objetivo de conservar la información de elevación original, sin realizar ninguna interpolación o suavizado.

De las entrevistas realizadas se puede abstraer la información a continuación:

El DEM nacional fue realizado por un consorcio llamado PASCO-FINNMAP con una resolución espacial de 15 metros la cual fue auxiliada con líneas de ruptura y de superficie para generar un modelo de elevación digital, este DEM se realizó con el objetivo de realizar el proceso de ortorectificación de modelos estereoscópicos de fotografía aérea digital con el software ERDAS, para la generación de curvas a nivel para mapas topográficos a escala 1:50,000 las cuales se realizaron a cada 20 metros, suplementarias cada 10 y a futuro generar curvas de hasta 5 metros, proveer al país el material cartográfico y topográfico para realizar modelaciones en 3 dimensiones. Pero el objetivo principal fue preparar las ortofotos realizadas en todo el país en el año 2006.

El método con el que se generó el DEM nacional fue fotogramétrico por correlación automática restituidas fotográficamente a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas digitales. El proceso de validación se consideró debido a que se preparó con la infraestructura geodésica del IGN (Bancos de marca, estaciones totales, CORS).

Dentro de la entrevista también se indagó sobre el conocimiento de otros DEM, recomendaciones, de las cuales ambas instituciones tanto MAGA como IGN utilizan el DEM nacional, a pesar de tener conocimiento y acceso a los DEM SRTM y ASTER. Además de utilizarlo también recomiendan su uso debido a que el nacional tiene información de la infraestructura geodésica del IGN, además fue dentro del proyecto de las ortofotos que tienen una resolución de 0.5 metros.

Además, ambos ingenieros comentaron sobre la importancia de la investigación y que evaluarían utilizar otro DEM nada más si cumple con la precisión y exactitud validado por el IGN.

Para ver las entrevistas vea el apéndice 1

Para determinar la consistencia geométrica de los modelos de elevación, es importante conocer las características de los DEM evaluados, como resolución espacial y año de generación. En la tabla VII se presentan estos resultados en los que se puede observar que los DEM son completamente diferentes, difieren en la resolución espacial, año en el que fue generada la información y el datum vertical sin embargo por el tipo de información esta puede ser comparable en esas condiciones.

El perfil topográfico (Ver figura 8) se graficó para los 4 DEM, esto permitió demostrar gráficamente como es que cada modelo representa el terreno. Después del análisis se observó una similitud gráfica muy alta entre los DEM ASTER, SRTM y ALOS PALSAR, cabe recalcar que esta consistencia es muy alta a pesar de sus diferencias de año de generación y resolución espacial, pero si coinciden en el método con el que fueron generados. Esto se puede observar en la figura 12.

Asimismo, cuando se comparó los DEM generados con imágenes satelitales con el DEM nacional se lograron identificar varias diferencias como la cantidad de información, debido a que en los DEM evaluados podía verse una línea semi recta de un punto A a un punto B, a diferencia del nacional que representaba mayor detalle, además gráficamente se logran identificar picos con datos de elevación mayor y menor a las representadas por los DEM provenientes de imágenes satelitales. Estas diferencias se observaron principalmente en el detalle que presenta el DEM nacional a diferencia de los otros tres que da la impresión de un suavizado de los datos. Esto se puede observar en la figura 13. Con este análisis se logró identificar que el DEM nacional realizado por fotogrametría representa más información y más detalle al momento de representar el terreno en forma gráfica.

Para identificar las diferencias de elevación de los cuatro DEM, se realizó una muestra inicial de 70 puntos de los cuales se extrajo la información de elevación, se realizó una comparación por medio del error medio de cada punto de ubicación, los resultados se pueden observar en la tabla VIII. Con este análisis se observó la magnitud de las diferencias en las alturas de cada punto. Además, se pudo identificar que a medida que la pendiente aumenta también los datos de altura tienen mayor diferencia entre los DEM, esto se observa en la figura 15. Resultado de este análisis se identificó que a medida de mayor pendiente la variabilidad de los datos y el error estándar aumentan.

Asimismo, para reforzar el análisis anterior se incrementó la muestra aumentándola a 700 puntos de ubicación y el análisis se realizó de forma global por cada modelo de elevación digital. Para este análisis se obtuvieron los datos de desviación estándar, error medio SEM, error estándar EE, error medio absoluto MAE y error medio cuadrático RMS estos 2 últimos comparándolos con el DEM nacional, estos se pueden observar en la tabla IX.

Se pudo observar que los datos varían por cada uno de los estratos (tipo de pendiente). Debido a eso se analizó el error medio cuadrático ya que es una medida utilizada para evaluar la precisión de los datos de la elevación de los DEM.

Con estos cálculos se pudo determinar:

- Los estratos de 0 a 3 y 3 a 7 tanto el modelo ASTER y SRTM se ajustan de mejor manera al DEM nacional.
- El estrato de 7 a 12 el modelo SRTM se ajusta mejor al DEM nacional
- Los estratos de 12 a 25 y 25 a 50 el modelo ASTER se ajusta mejor al DEM nacional.
- El estrato de 50 a 75 el modelo SRTM es el que mejor se ajusta al DEM nacional.
- El estrato de >75 el modelo que se ajusta mejor es ALOS PALSAR, en este es donde se encuentran las diferencias más significativas de error estándar por lo cual en estas pendientes si se ajusta mejor ALOS PALSAR por lo que se puede identificar que la resolución espacial si interviene en las pendientes más altas.

Los análisis de regresión lineal se realizaron con el objetivo de analizar la relación entre variables, lo que sería los datos de altura entre los modelos de SRTM, ASTER y ALOS PALSAR con los datos del DEM nacional. Los resultados de las tres regresiones lineales indican que los modelos tienen un alto parecido como se observa en las figuras 15, 16 y 17. Por ejemplo, las comparaciones de los modelos SRTM comparado con el DEM nacional indican un alto parecido debido a un factor de correlación (R^2) de 0.9976 y la comparación de los modelos

ASTER y ALOS PALSAR también representan un alto parecido debido a un factor de correlación (R^2) de 0.9944 y 0.9981 respectivamente.

Para realizar el análisis de varianzas, se estableció como lo indica la teoría un 5 % de margen de error, por lo que los resultados al hacer un análisis de varianza son adecuados, ya que están por debajo del rango indicado, por ende, la hipótesis alternativa es la aceptada la cual menciona que si existe diferencia significativa entre los 3 DEM evaluados (SRTM, ASTER, ALOS PALSAR) y el DEM nacional.

Para la identificación del DEM que representa con mejor correspondencia los datos de elevación comparada con información topográfica precisa, se realizó con la información tomada en campo, debido a que representan la elevación real que tiene el país en los 36 puntos de ubicación evaluados.

Los 36 puntos que se evaluaron para este análisis sirvieron como validador y comparador principal con la información de los 4 DEM utilizados en esta investigación, por lo cual el modelo de regresión lineal nos indica que existe una afinidad estadística similar entre todos los modelos y los datos de campo debido a que los factores de correlación R^2 representan datos de 0.99 en adelante, valor que en estadística es considerado como un indicador muy alto. Sin embargo, cada modelo representa diferencias en el dato de elevación que proporcionan, por ello, se realizó un análisis donde se sumaron todas las diferencias de elevación entre los datos de campo y el modelo evaluado, así se comprobó que el DEM ASTER muestra una mejor precisión al relacionar sus valores de elevación ya que fue el modelo que presentó una menor sumatoria de diferencias, estos datos se pueden observar en la tabla XIV.

Estos valores también demostraron que la resolución espacial no es un factor elemental al momento de evaluar DEM, debido a que de los 4 modelos evaluados quien presento más diferencias en las elevaciones de los 36 puntos evaluados fue el modelo de ALOS-PALSAR quien representaba una resolución espacial menor (12.5 metros) a todos los demás DEM evaluados.

CONCLUSIONES

1. El grado de consistencia geométrica de los Modelos de Elevación Digital obtenidos a partir de las imágenes satelitales SRTM, ASTER y ALOS PALSAR es alto en el análisis del perfil topográfico seleccionado, ya que dicho perfil presenta gran similitud entre los distintos modelos aplicados y se representa en buena medida la forma del relieve.
2. Según los análisis de varianzas realizados donde se compararon los DEM obtenidos de imágenes satelitales vs. el DEM nacional de Guatemala se determinó que existen diferencias significativas entre los modelos. Al calcular el error estándar –EE- por cada punto se identificó que mientras más alta la pendiente el error aumenta más, concluyendo así que mientras se incrementa la pendiente también los datos de elevación varían más por cada uno de los modelos.
3. El Modelo de Elevación Digital –DEM- ASTER es el que representa una mejor correspondencia en el valor de elevación respecto a información topográfica precisa debido a que las diferencias según el análisis de regresión lineal y la suma de diferencias muestran la mayor similitud entre los modelos.

RECOMENDACIONES

1. Continuar investigando en el ámbito de la geomática y realizar análisis comparativos de modelos de elevación digital –dem-, levantar más puntos de ubicación con georreceptor en el área de estudio y comprobar con nuevos estimadores estadísticos cuál de ellos es el ideal para analizar los dem.
2. Realizar análisis para comparar otros modelos de elevación digital –dem- provenientes por imágenes satelitales, por ejemplo, gtopo30 u otros pero que tengan disponibilidad en gran parte del mundo, para poder evaluar los datos de elevación contra datos de campo.
3. Realizar un levantamiento en un área con datos lidar para tener un dem generado por este sensor, así mismo compararlo con datos de campo para determinar la precisión de lidar.

REFERENCIAS

1. ArcGeek. (2018, mayo 22). *Estadística aplicada a la Geomática*. Recuperado de: <https://acolita.com/que-es-el-error-cuadratico-medio-rmse/>.
2. Baumann, P. (2008). *Introduction to remote sensing*.
3. Blog Estadístico. (2018). *Ciencias del Ejercicio*. Recuperado de: <https://g-se.com/medida-desviacion-estandar-o-error-estandar-de-la-media-bp-k57cfb26ceb5e5>.
4. Buiten , H., & Clevers, J. (1993). *Land Observation by Remote Sensing Theory and Applications*.
5. Burgos, V. (2014). *Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos (2, 2014, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina) Researchgate*. [Recuperado de] https://www.researchgate.net/publication/274893404_Modelos_dig itales_de_elevacion_Tendencias_correcciones_hidrologicas_y_nuevas_fuentes_de_informacion Consultado, 1(10), 2015.
6. California Institute of Technology. (2018). *Jet Propulsion Laboratory*. Recuperado de: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

7. Campo, A. M., Gentili, J. o., (2016) "*Comparación de DEM generados a partir de distintas fuentes de datos: Cuenca del Arroyo Sauce Corto, Sistema de Ventania, Argentina.* [recuperado de] ri.conicet.gov.ar/handle/11336/49675.
8. Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos - DIGEGR- del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2015). *Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra, a escala 1:50,000 de la República de Guatemala Año 2010.* Guatemala: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).
9. Fallas, J. (2003). *ResearchGate. Modelo de Elevación digital para las hojas cartográficas tilarán y juntas escala 1:50,000 del Instituto Geografico Nacional, Costa Rica.* [Recuperado de] <https://www.researchgate.net/publication/237474614/download>.
10. Garcia Cueto, Rafael. (2007). *Los sensores remotos y su aplicación en la meteorología un estudio de caso. Researchgate.* [Recuperado de] <https://www.researchgate.net/publication/243458591>.
11. García Álvarez, D. A. (2008). *Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System).* Madrid.
12. Gutiérrez, J. (2018). *Cartomap.* Recuperado de: cartomap.cl/utfsm/Texto-Topografía/Cap%2009%20Ortofoto.pdf.
13. Ibáñez, Martínez, E. (2008). *Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado:*

aplicación a la marisma del Parque Nacional de Doñana.
Universidad Politécnica de Catalunya BarcelonaTECH. Recuperado
de:
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93572/01Eib01
de05.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93572/01Eib01de05.pdf).

14. IBM. (2017). *IBM Knowledge Center*. Recuperado de:
https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SS4QC9/com.ibm.solutions.wa_an_overview.2.0.0.doc/standarderror.html.
15. Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI- . (2015). *INEGI. Obtenido Imágenes de satélite Elementos de percepción remota.*
Recuperado de:
[http://www3.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/imagenes/imgs
atelite/metadatos/elem_per_rem.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/imagenes/imgsatelite/metadatos/elem_per_rem.pdf).
16. Lwin, K. (2008). *Fundamentals of Remote Sensing and its Applications in GIS*. University of Tsukuba.
17. Morales Maldonado, J. E. (2018). *Introducción a la topografía con GNSS.*
(Notas del curso Topografía y GPS).
18. Mugica, K. A., & Noa, R.R. (sf). *Los Modelos Digitales de Elevación y sus Productos derivados aplicados al estudio del deterioro de la infraestructura vial del transporte, en un sector de la habana.*
[recuperado de]
[http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevast
ecnologias/Sig/20.pdf](http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevastecnologias/Sig/20.pdf).

- Recuperado de:
www.scielo.org.ar/pdf/geoacta/v39n2/v39n2a02.pdf.
23. Sarrío, F. (sf). *geograf/sigmuro*. (2006). [Recuperado de] http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node3_tf.html.
 24. Secretaria de Educación Pública de México. *Error en medias directas* (2017). Recuperado de: <https://sites.google.com/site/khriztn/1-3/1-3-1>.
 25. Sickle, J. V. (2015). *GPS for Land Surveyors*. [VitalSource Bookshelf]. Recuperado de <https://bookshelf.vitalsource.com/#/books/9781466583122/>.
 26. Soza, D. (2018). *Researchgate*. Tutorial: *Procesamiento datos DEM Alos-1 PalSAR RTC*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/322303475_Tutorial_Procesamiento_datos_DEM_Alos-1_PalSAR_RTC?enrichId=rgreq-0c73931515ff333126bc38e695b51176-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzMyMjMwMzQ3NTtBUzo1OUMyNDA3ODkxMjMwNzNAMTUxODQ1MTAzNDc0Nw%3D%3D&el=1_x_2&_e.
 27. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. (2012). *The core of GIScience: a systems-based approach*.
 28. USGS. (2008). *www.usgs.gov*. Recuperado de <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70003718>.

29. Vargas González, C. (2017). *Imágenes Aster*.

30. Yin, MLL (2006) Estudio sobre la precisión de GTOPO30 y SRTM DEM: un estudio de caso del Tibet [J]. Boletín de conservación de suelos y aguas. [Recuperado de] http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-STTB200605019.htm.

APÉNDICES

Apéndice 1. Entrevistas realizadas al jefe del departamento de SIG del IGN



ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA



1. ENTREVISTA

1. ¿Cuál es el nombre de la empresa que realizó todo el proceso para generar las ortofotos para el país en el año 2006?

Consortio PASCO/FINMAP

2. ¿Con que objetivo fue realizado el DEM?

- Para realizar el proceso de ortorectificación de modelos estereoscópicos de fotografía aérea digital con la plataforma del software Erdas.*
- Para la generación de curvas de nivel para mapas topográficos escala 1:50,000. Curvas de nivel cada 20m y suplementarias cada 10m.*
- Proveer a los usuarios de material cartográfico y topográfico del insumo para la modelación en 3d.*
- Proveer a los usuarios de herramienta para generar curvas de nivel para diferentes fines, con curvas de nivel con intervalo de hasta 5 metros.*

3. ¿Qué resolución espacial tenía el DEM?

- DEM en formato CAD –~~Tin~~ vectorial- con resolución de 15m. Auxiliada con líneas de ruptura y de superficie para generar MDT-modelo digital del terreno-*
- DEM en formato raster con resolución de 30m.*

4. ¿Conoce el método con el que fue generado el DEM?

Método fotogramétrico por correlación automática restituidas fotogramétricamente a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas digitales.

5. ¿El DEM tiene algún proceso de validación?

Si

6. ¿Existe algún documento que dejara la empresa sobre la información del DEM? ¿Podría compartírmelo? *Depende que tipo de información, porque se tendría que realizar por la vía oficial.*

Continuación apéndice 1.



ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA



7. **¿Tiene conocimientos sobre otros modelos de elevación digital provenientes de imágenes satelitales? ¿Cuáles conoce?**
Aster GDEM, descarga de DEM del Servicio Geológico de los EEUU y de Copernicus de España

8. **¿Qué DEM utiliza para generar insumos de pendiente, elevación, modelos 3D en la institución que labora?**
 - a. *DTM por método fotogramétrico de IGN para proyectos específicos.*
 - b. *DEM Y DTM Generado a partir del proyecto con PASCO/FINNMAP.*

9. **¿Recomendaría el uso del DEM generado en el vuelo por las ortofotos en el año 2006?**
Si.

10. **¿Si tuviera la disposición de tener un DEM con mejor resolución espacial pero proveniente de imágenes satelitales lo cambiaría por el DEM generado en el vuelo por las ortofotos en el año 2006?**
Si, solo si cumple con la precisión y exactitud validado por IGN.

11. **¿Cree que es importante tener información bibliográfica que muestre la comparación de datos de elevación de los modelos de elevación digital?**
Si es importante.

Fuente: elaboración propia. Entrevista realizada al Ing. Marcos Sutuc. 24 junio 2020.

Apéndice 2. **Entrevistas realizadas al jefe del departamento de SIG de la DIGEGR**



ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA



1. ENTREVISTA

1. **¿Cuál es el nombre de la empresa que realizó todo el proceso para generar las ortofotos para el país en el año 2006?**
Consortio PASCO-FINNMAP
2. **¿Con que objetivo fue realizado el DEM?**
Se realizó con el objetivo de preparar las ~~ortofotos~~
3. **¿Qué resolución espacial tenía el DEM?**
Cuadrícula de 15 metros
4. **¿Conoce el método con el que fue generado el DEM?**
No
5. **¿El DEM tiene algún proceso de validación?**
La mejor validación que tienen es que se preparó con la infraestructura geodésica del IGN (Bancos de marca, estaciones totales, CORS)
6. **¿Existe algún documento que dejara la empresa sobre la información del DEM? ¿Podría compartírmelo?**
Sí existe el documento. Tendría que buscar el documento para poder compartírselo, lo que adjunto es un metadato de ~~ortofoto~~
7. **¿Tiene conocimientos sobre otros modelos de elevación digital provenientes de imágenes satelitales? ¿Cuáles conoce?**
Lo que tengo al alcance es el de SRTM 90
8. **¿Qué DEM utiliza para generar insumos de pendiente, elevación, modelos 3D en la institución que labora?**
El de 15 metros (PASCO-FINNMAP) y de 20 metros generado en la DIGEGR con base a la digitalización de las curvas de nivel provenientes de las hojas cartográficas 1:50,000

Continuación apéndice 2.



9. ¿Recomendaría el uso del DEM generado en el vuelo por las ortofotos en el año 2006?

Sí

10. ¿Si tuviera la disposición de tener un DEM con mejor resolución espacial pero proveniente de imágenes satelitales lo cambiaría por el DEM generado en el vuelo por las ortofotos en el año 2006?

No lo consideraría, el DEM de 15 metros se preparó con la infraestructura geodésica del IGN (Bancos de marca, estaciones totales, CORS) dentro del proyecto de las ortofotos, que tiene una resolución de 0.5 metros (las fotos aéreas tienen resolución de 0.4 metros)

11. ¿Cree que es importante tener información bibliográfica que muestre la comparación de datos de elevación de los modelos de elevación digital?

Sí

Fuente: elaboración propia. Entrevista realizada al Ing. Marcos Sutuc. 02 julio 2020.

Apéndice 3. Datos por punto de muestreo de la muestra de 70 puntos de ubicación

Id	Coordenadas		Pendiente	Datos de Elevación DEM				Error medio	Rango
	X	Y	categoría	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	Oficial GT		
1	736472	1618758	0 a 3	1761	1763	1761	1762	0.48	0.48 - 3.79
2	737357	1621661	0 a 3	1766	1763	1768	1764	1.11	
3	738817	1619352	0 a 3	1766	1771	1770	1767	1.19	
4	734844	1618872	0 a 3	1772	1771	1774	1770	0.85	
5	734489	1617831	0 a 3	1778	1776	1780	1774	1.29	
6	732228	1621061	0 a 3	1844	1846	1846	1843	0.75	
7	736895	1616903	0 a 3	1767	1764	1769	1762	1.55	
8	737667	1616215	0 a 3	1765	1763	1768	1763	1.18	
9	743181	1612022	0 a 3	1540	1538	1542	1537	1.11	
10	742190	1609655	0 a 3	1537	1531	1535	1520	3.79	
11	733108	1622433	3 a 7	1850	1846	1852	1849	1.25	0.25 - 1.31
12	732852	1621535	3 a 7	1839	1839	1840	1839	0.25	
13	733767	1621712	3 a 7	1819	1823	1824	1819	1.31	
14	741632	1619100	3 a 7	1781	1781	1784	1783	0.75	
15	742283	1618016	3 a 7	1758	1758	1760	1759	0.48	
16	733574	1617496	3 a 7	1795	1798	1798	1797	0.71	
17	735066	1616672	3 a 7	1772	1771	1773	1768	1.08	
18	735281	1615802	3 a 7	1800	1800	1802	1797	1.03	
19	743862	1612801	3 a 7	1541	1544	1543	1542	0.65	
20	742571	1614379	3 a 7	1568	1566	1570	1570	0.96	
21	734145	1621361	7 a 12	1814	1812	1814	1810	0.96	0.71 - 2.90
22	732613	1618701	7 a 12	1830	1836	1830	1831	1.44	
23	733816	1617366	7 a 12	1786	1786	1790	1786	1.00	
24	736186	1615596	7 a 12	1787	1788	1789	1781	1.80	
25	735478	1615822	7 a 12	1792	1794	1796	1793	0.85	
26	735748	1614634	7 a 12	1831	1840	1833	1826	2.90	
27	736178	1613170	7 a 12	1914	1912	1915	1908	1.55	
28	736115	1612316	7 a 12	2037	2036	2037	2034	0.71	
29	738465	1615169	7 a 12	1782	1784	1783	1778	1.31	
30	738616	1615423	7 a 12	1777	1781	1780	1773	1.80	
31	731727	1618714	12 a 25	1897	1885	1889	1886	2.72	0.75 - 2.95
32	730812	1618748	12 a 25	1933	1939	1942	1936	1.94	
33	730888	1617425	12 a 25	1951	1946	1951	1948	1.22	
34	731700	1616973	12 a 25	1882	1881	1886	1881	1.19	
35	735051	1615260	12 a 25	1834	1834	1836	1837	0.75	
36	736262	1612835	12 a 25	1954	1964	1957	1950	2.95	
37	743230	1621311	12 a 25	1912	1912	1914	1906	1.73	
38	742771	1620464	12 a 25	1905	1898	1905	1900	1.78	
39	729923	1613748	12 a 25	2422	2422	2425	2412	2.84	
40	745302	1618894	12 a 25	2001	2005	2001	1997	1.63	

Continuación apéndice 3.

41	732850	1620089	25 a 50	1814	1811	1817	1814	1.22	1.03 - 5.24
42	733787	1621068	25 a 50	1862	1847	1863	1851	3.99	
43	731873	1620791	25 a 50	1901	1887	1897	1885	3.86	
44	730480	1618775	25 a 50	1970	1975	1982	1982	2.93	
45	731391	1618670	25 a 50	1886	1876	1879	1878	2.17	
46	734009	1616511	25 a 50	1838	1841	1850	1850	3.09	
47	732390	1613581	25 a 50	2306	2301	2307	2311	2.06	
48	732876	1613349	25 a 50	2233	2238	2236	2236	1.03	
49	744127	1617230	25 a 50	1997	2001	1998	1978	5.24	
50	729650	1616880	25 a 50	2070	2078	2075	2071	1.85	
51	733715	1620509	50 a 75	1842	1817	1838	1847	6.60	1.55 - 7.78
52	729807	1617208	50 a 75	2044	2063	2055	2039	5.41	
53	733148	1614411	50 a 75	2039	2021	2051	2056	7.78	
54	733453	1613787	50 a 75	2054	2041	2054	2062	4.35	
55	730327	1613496	50 a 75	2334	2324	2333	2331	2.25	
56	729347	1614194	50 a 75	2287	2280	2288	2282	1.93	
57	742467	1614844	50 a 75	1672	1692	1678	1676	4.35	
58	743784	1613636	50 a 75	1687	1685	1684	1691	1.55	
59	743781	1617621	50 a 75	1954	1971	1963	1949	4.87	
60	744378	1616964	50 a 75	2051	2054	2051	2045	1.89	
61	731918	1614260	>75	2195	2196	2212	2238	10.04	3.77 - 12.48
62	728622	1614745	>75	2256	2262	2266	2274	3.77	
63	732444	1614328	>75	2170	2157	2178	2179	5.08	
64	732085	1613714	>75	2270	2312	2273	2270	10.27	
65	730558	1616791	>75	1937	1944	1936	1965	6.74	
66	741108	1615904	>75	1623	1607	1622	1634	5.55	
67	741102	1614674	>75	1658	1630	1662	1691	12.48	
68	743901	1613617	>75	1674	1662	1685	1683	5.24	
69	741696	1612437	>75	1649	1629	1641	1654	5.45	
70	739176	1619277	>75	1714	1699	1714	1729	6.12	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Ficha de Elevación del Banco de Marca E 25^a



Guatemala, 15 de junio 2,020


Señores
**INNOVACION Y DESARROLLO
DE INGENIERIA**
Presente


Señores:

Tengo el agrado de dirigirme a ustedes en respuesta a su solicitud de proporcionarles los datos del banco de marca (BM) mas cercano a la dirección siguiente: Lo más céntrico posible de Chimaltenango, accesible para poder trabajar con aparato GPS.

Al respecto me permito informarles que el BM más cercano al lugar indicado por ustedes es el denominado **BM E - 25 A** con una elevación de **1,795.5452 MSNMM** se adjunta fotocopia de la ficha descriptiva de la cota mencionada.

Atentamente,


Mynor Fernando Cerna Urrutia
Técnico en Geodesia

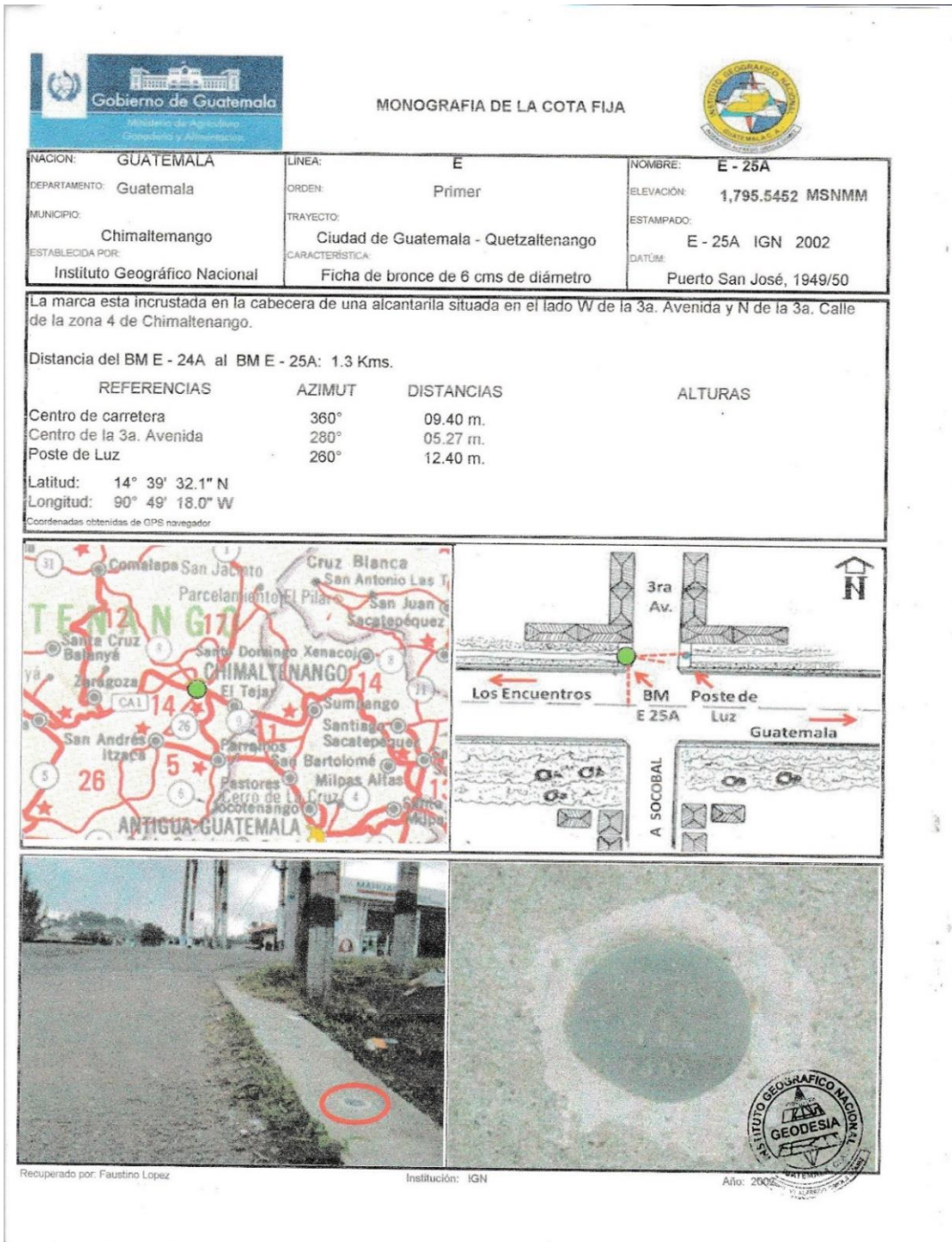

Ing. Oscar Cruz Ramos
Jefe de Geodesia


VoBo Ing. David Isaac Gómez Gómez
Sub Director General

Avenida Las Américas 5-76 zona 13, Guatemala, Guatemala

Teléfono: 24137188 * 24137190


Continuación apéndice 4.




Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Ficha de Elevación del Banco de Marca E 25ª.

Apéndice 5. **Ubicación de los puntos de ubicación**

PUNTO 1	
UBICACIÓN	Pastores
LONGITUD	90 45 21.95633 O
LATITUD	14 36 3.87508 N
ELEVACIÓN	1610.383
ALTURA ELIPSOIDAL	1613.727



PUNTO 2	
UBICACIÓN	Chimaltenango
LONGITUD	90 49 17.91437 O
LATITUD	14 39 32.06426 N
ELEVACIÓN	1795.553
ALTURA ELIPSOIDAL	1798.897




PUNTO 3	
UBICACIÓN	Parramos
LONGITUD	90 48 10.04854 O
LATITUD	14 36 49.81266 N
ELEVACIÓN	1761.827
ALTURA ELIPSOIDAL	1765.171




Continuación apéndice 5.


PUNTO 4	
UBICACIÓN	Antigua Guatemala
LONGITUD	90 45 30.62909 O
LATITUD	14 32 59.93304 N
ELEVACIÓN	1573.304
ALTURA ELIPSOIDAL	1576.648



PUNTO 5	
UBICACIÓN	Jocotenango
LONGITUD	90 44 1.07484 O
LATITUD	14 34 49.57997 N
ELEVACIÓN	1554.250
ALTURA ELIPSOIDAL	1557.594

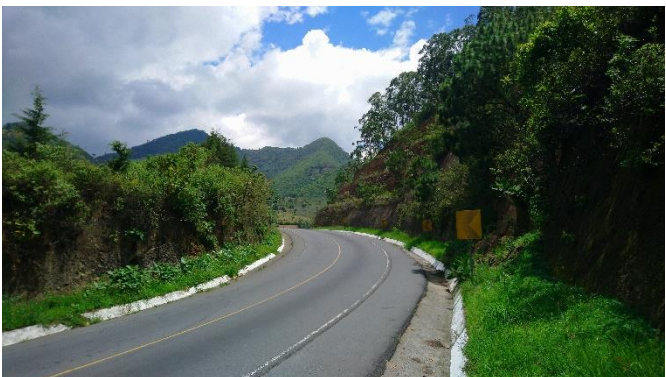



PUNTO 6	
UBICACIÓN	Jocotenango
LONGITUD	90 44 30.27912 O
LATITUD	14 34 30.21071 N
ELEVACIÓN	1537.728
ALTURA ELIPSOIDAL	1541.072



Continuación apéndice 5.


PUNTO 7		
UBICACIÓN	Pastores	
LONGITUD	90 45 3.2373 O	
LATITUD	14 35 25.67425 N	
ELEVACIÓN	1553.695	
ALTURA ELIPSOIDAL	1557.039	

PUNTO 8		
UBICACIÓN	Pastores	
LONGITUD	90 45 33.89094 O	
LATITUD	14 36 11.85332 N	
ELEVACIÓN	1606.467	
ALTURA ELIPSOIDAL	1609.811	

PUNTO 9		
UBICACIÓN	Pastores	
LONGITUD	90 46 46.50424 O	
LATITUD	14 36 39.75426 N	
ELEVACIÓN	1720.086	
ALTURA ELIPSOIDAL	1723.430	

Continuación apéndice 5.

PUNTO 10	
UBICACIÓN	Pastores
LONGITUD	90 46 16.17409 O
LATITUD	14 37 16.80262 N
ELEVACIÓN	1702.202
ALTURA ELIPSOIDAL	1705.546




PUNTO 11	
UBICACIÓN	Sumpango
LONGITUD	90 43 22.30532 O
LATITUD	14 37 57.35744 N
ELEVACIÓN	1995.439
ALTURA ELIPSOIDAL	1998.783




PUNTO 12	
UBICACIÓN	Sumpango
LONGITUD	90 44 32.12891 O
LATITUD	14 39 18.41926 N
ELEVACIÓN	1902.243
ALTURA ELIPSOIDAL	1905.587



Continuación apéndice 5.

PUNTO 13		
UBICACIÓN	Sumpango	
LONGITUD	90 44 38.79424 O	
LATITUD	14 38 12.66756 N	
ELEVACIÓN	1814.035	
ALTURA ELIPSOIDAL	1817.379	

PUNTO 14		
UBICACIÓN	Sumpango	
LONGITUD	90 45 40.97545 O	
LATITUD	14 38 16.51222 N	
ELEVACIÓN	1784.170	
ALTURA ELIPSOIDAL	1787.514	

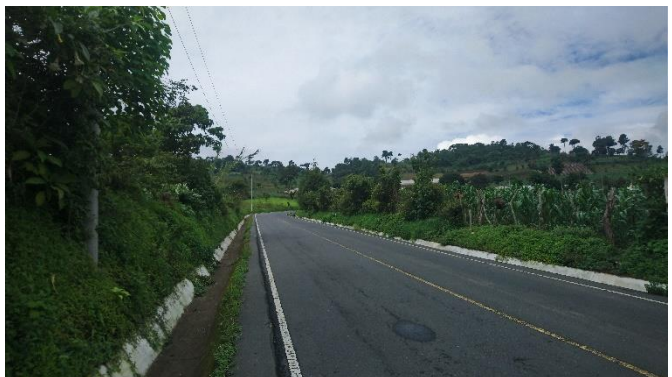
PUNTO 16		
UBICACIÓN	Parramos	
LONGITUD	90 48 13.20401 O	
LATITUD	14 36 11.25965 N	
ELEVACIÓN	1776.702	
ALTURA ELIPSOIDAL	1780.046	

Continuación apéndice 5.

PUNTO 17	
UBICACIÓN	Parramos
LONGITUD	90 48 36.91926 O
LATITUD	14 34 47.26484 N
ELEVACIÓN	1938.597
ALTURA ELIPSOIDAL	1941.941



PUNTO 18	
UBICACIÓN	Parramos
LONGITUD	90 48 26.59133 O
LATITUD	14 34 53.88805 N
ELEVACIÓN	1907.425
ALTURA ELIPSOIDAL	1910.769



PUNTO 19	
UBICACIÓN	Parramos
LONGITUD	90 49 54.15139 O
LATITUD	14 34 0.54642 N
ELEVACIÓN	2196.935
ALTURA ELIPSOIDAL	2200.279



Continuación apéndice 5.


PUNTO 20		
UBICACIÓN	Parramos	
LONGITUD	90 51 0.20106 O	
LATITUD	14 33 56.62224 N	
ELEVACIÓN	2383.658	
ALTURA ELIPSOIDAL	2387.002	

PUNTO 21		
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa	
LONGITUD	90 51 53.02458 O	
LATITUD	14 35 16.5174 N	
ELEVACIÓN	2423.172	
ALTURA ELIPSOIDAL	2426.516	


PUNTO 22		
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa	
LONGITUD	90 51 25.6365 O	
LATITUD	14 35 39.23732 N	
ELEVACIÓN	2301.153	
ALTURA ELIPSOIDAL	2304.497	

Continuación apéndice 5.


PUNTO 23	
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa
LONGITUD	90 52 3.64912 O
LATITUD	14 36 56.35739 N
ELEVACIÓN	2085.108
ALTURA ELIPSOIDAL	2088.452




PUNTO 24	
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa
LONGITUD	90 51 57.96022 O
LATITUD	14 37 3.64843 N
ELEVACIÓN	2087.587
ALTURA ELIPSOIDAL	2090.931




PUNTO 25	
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa
LONGITUD	90 51 22.39247 O
LATITUD	14 37 54.65204 N
ELEVACIÓN	1932.508
ALTURA ELIPSOIDAL	1935.852



Continuación apéndice 5.


PUNTO 26		
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa	
LONGITUD	90 49 48.13363 O	
LATITUD	14 37 34.63468 N	
ELEVACIÓN	1785.257	
ALTURA ELIPSOIDAL	1788.601	

PUNTO 27		
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa	
LONGITUD	90 49 52.74707 O	
LATITUD	14 37 5.81401 N	
ELEVACIÓN	1802.152	
ALTURA ELIPSOIDAL	1805.496	


PUNTO 28		
UBICACIÓN	Parramos	
LONGITUD	90 48 50.51354 O	
LATITUD	14 36 10.61629 N	
ELEVACIÓN	1800.933	
ALTURA ELIPSOIDAL	1804.277	

Continuación apéndice 5.


PUNTO 29	
UBICACIÓN	El Tejar
LONGITUD	90 47 0.38515 O
LATITUD	14 38 14.26304 N
ELEVACIÓN	1766.350
ALTURA ELIPSOIDAL	1769.694



PUNTO 30	
UBICACIÓN	Parramos
LONGITUD	90 48 5.17842 O
LATITUD	14 37 27.21652 N
ELEVACIÓN	1723.364
ALTURA ELIPSOIDAL	1726.708




PUNTO 32	
UBICACIÓN	Chimaltenango
LONGITUD	90 49 43.19256 O
LATITUD	14 39 34.11569 N
ELEVACIÓN	1818.969
ALTURA ELIPSOIDAL	1822.313




Continuación apéndice 5.

PUNTO 33	
UBICACIÓN	El Tejar
LONGITUD	90 47 58.08113 O
LATITUD	14 39 1.79683 N
ELEVACIÓN	1762.058
ALTURA ELIPSOIDAL	1765.402



PUNTO 34	
UBICACIÓN	Chimaltenango
LONGITUD	90 50 51.733 O
LATITUD	14 40 4.12151 N
ELEVACIÓN	1867.796
ALTURA ELIPSOIDAL	1871.140



PUNTO 35	
UBICACIÓN	San Andrés Itzapa
LONGITUD	90 50 43.22044 O
LATITUD	14 38 37.36212 N
ELEVACIÓN	1844.842
ALTURA ELIPSOIDAL	1848.186



Continuación apéndice 5.

PUNTO 36	
UBICACIÓN	Chimaltenango
LONGITUD	90 49 57.5269 O
LATITUD	14 38 40.25339 N
ELEVACIÓN	1784.253
ALTURA ELIPSOIDAL	1787.597



Fuente: [Fotografía de Claudia Saput]. (Chimaltenango. 2020). Colección particular. Guatemala