



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN GEOMÁTICA CON MENCIÓN EN
ORDENAMIENTO TERRITORIAL**

**Control de calidad de datos LIDAR aerotransportado en la
zona austral del Ecuador**

Autor: Mario Xavier Galarza Galarza

Director: Ing. Víctor Omar Delgado Inga

Cuenca – Ecuador 2014

Dedicatoria

A Marcela, Franco y Doménica

Agradecimientos

A Marcela, Franco y Doménica, mi razón de ser, por su apoyo absoluto.

A Mario, Mariana, Wilson y Leonardo por ser la base para forjar mi presente y futuro.

Al Ing. Omar Delgado por su apoyo como amigo y director del presente trabajo.

A la Secretaría del Agua por facilitar los datos para la elaboración de este trabajo, especialmente a los Ingenieros Juan Pablo Martínez, Marco Jaramillo y Carlos Chica.

Al Profesor Francisco Javier Ariza y Gonzalo Sotomayor por sus valiosas contribuciones.

A los Ingenieros Paul Ochoa y Chester Sellers por su colaboración como tribunal.

A los compañeros de aula y amigos, por su apoyo en el trayecto hacia el cumplimiento de esta meta.

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto realizar el control de calidad del modelo digital de terreno (MDT) generado a partir de un conjunto de datos LiDAR (Light Detection and Ranging o Detección y Medición de la Luz) obtenidos mediante la realización de un vuelo planificado para tal efecto, éste se ejecutó en la zona austral del Ecuador, entre las provincias de Azuay y Cañar a una altura comprendida entre 2 500 a 3 300 m s.n.m. Para cumplir lo planteado se realizó una investigación referente a estudios similares y normas para el control posicional de cartografía, seguidamente, acorde a lo investigado; se aplicó la metodología más apropiada para el control de calidad de los datos, con lo que se evaluó el cumplimiento de los niveles de precisión requeridos para el MDT.

Palabras clave

LiDAR, Sensores Remotos, Control de Calidad.

Abstract

This paper aims to perform quality control of the digital terrain model (DTM) generated from a set of data LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) obtained by performing a scheduled flight to this purpose. This was performed in the southern part of Ecuador, between the provinces of Azuay and Cañar at a height of 2500 to 3300 M.A.S.L. In order to comply with this proposal, a research concerning similar studies and standards for mapping positional control was conducted: then, based on the investigation, the most appropriate method for quality control data is applied, evaluating the compliance to the required accuracy levels for the DTM.

Keywords: LIDAR, Remote Sensing, Quality Control




Translated by:
Lic. Lourdes Crespo

Índice de Contenidos

1.	Introducción	7
2.	Métodos	9
2.1.	Zona de estudio	9
2.2.	Metodología	11
2.2.1.	Obtención de información.....	12
2.2.1.1.	Obtención del conjunto de datos LIDAR	12
2.2.1.1.1.	Planificación del Vuelo	12
2.2.1.1.2.	Ejecución del vuelo fotogramétrico digital combinado con LIDAR	17
2.2.1.1.3.	Post procesamiento de información	20
2.2.1.2.	Obtención de los Puntos de Control de Campo.....	28
2.2.1.2.1.	Determinación de Áreas de Muestreo	28
2.2.1.2.2.	Determinación de la Muestra.....	29
	Fuente: FGDC en Atkinson, García y Ariza, s/f	29
2.2.1.2.3.	Levantamiento de los puntos de control.....	30
2.2.1.2.4.	Posproceso	33
2.2.1.2.5.	Selección de los puntos de control.....	33
2.2.2.	Control de calidad.....	37
2.2.2.1.	Definición de parámetros de aceptación.....	41
2.2.2.2.	Comparación y análisis de datos	41
3.	Resultados y Discusión.....	43
4.	Conclusiones	48
5.	Referencia Bibliográficas	49
6.	Anexos	51

Índice de Mapas, Tablas, Figuras y Anexos

Mapa 1.	Ubicación del Área de Estudio.....	10
Figura 1.	Procedimiento General	11
Mapa 2.	Zonas de Planificación.....	13

Tabla 1. Características básicas de la planificación del vuelo y parametrización de los sensores utilizados.....	14
Mapa 3. Planificación del Vuelo.....	16
Tabla 2. Características de los medios técnicos empleados.....	18
Tabla 3. Productos obtenidos con la cámara.....	20
Mapa 4. Distribución de bloques.....	23
Tabla 4. Clasificación Inicial de la nube de puntos LiDAR	24
Figura 2. Vistas en Planta (I) y Perspectiva (D) de la nube de puntos.....	25
Figura 3. Vistas en Planta (I) y Perspectiva (D) de los mapas de sombras	25
Figura 4. Vistas en Planta (I) y Perspectiva (D) de las Curvas de Nivel	26
Figura 5. Vista en perspectiva del MDT generado.....	27
Figura 6. Vista en perspectiva del MDS generado	27
Tabla 5. Sub áreas de muestreo y parámetros para su determinación.....	28
Figura 7. Distribución homogénea de la muestra según recomendaciones de la FGDC	29
Tabla 6. Componentes de los DGPS Usados en el Levantamiento de Información.....	30
Figura 8. Equipo Trimble R4 utilizado para las observaciones DGPS	31
Mapa 5. Distribución espacial de los 53 puntos de control de campo levantados	32
Tabla 7. Puntos seleccionados para el control de calidad sobre la superficie total restituida.....	33
Mapa 6. Treinta y ocho puntos de control de campo seleccionados para el análisis de la parte 1	35
Mapa 7. Puntos de control de campo seleccionados para el análisis de la parte 2	36
Tabla 8. Análisis de datos en estudio versus observados.....	43
Figura 9. Análisis de sistematismos.....	45
Tabla 9. Análisis de datos en estudio versus observados, para el subárea uno (suelo descubierto en pendiente menor a 25%)	45
Tabla 10. Análisis de datos en estudio versus observados para el subárea dos (suelo descubierto en pendiente mayor a 25%)	46
Tabla 11. Análisis de datos en estudio versus observados para el subárea tres (vegetación herbácea en pendiente menor a 25%).....	46
Tabla 12. Análisis de datos en estudio versus observados para el subárea cuatro (vegetación herbácea en pendiente mayor a 25%)	46
Figura 10. Análisis de Tendencia del RMSE	47
Anexo 1. Resumen del reporte de procesamiento de líneas base.....	51
Anexo 2. Pruebas de Normalidad	52

Mario Xavier Galarza Galarza

Trabajo de Graduación

Omar Delgado I.

Noviembre, 2014

Control de calidad de datos LIDAR aerotransportado en la zona austral del Ecuador

1. Introducción

Los estudios sobre el territorio son cada día más exigentes en precisión y calidad de los datos geográficos, los avances tecnológicos facilitan que la información sea cada vez mejor, sin embargo la calidad de los datos son en gran parte responsabilidad del técnico encargado de generarlos y manejarlos.

LiDAR (Light Detection and Ranging) es un sensor remoto de tipo activo, esta tecnología es conocida desde los años 60s, siendo a finales de los 80s cuando empezó a operar en plataformas aerotransportadas (Mesas, 2012) por lo que también se lo conoce como Láser Escáner Aerotransportado; se considera como la mejor tecnología para obtener Modelos Digitales del Terreno y de Elevación con gran precisión (debido a la alta densidad de puntos) en zonas con difícil acceso y grandes extensiones, alcanzando una productividad elevada (Ibáñez, 2008).

La tecnología LiDAR facilita la obtención de datos en un tiempo menor que el necesario para realizar trabajos de levantamientos topográficos convencionales, la resolución de los modelos resultantes es mucho más alta que los obtenidos mediante otros métodos; los niveles de precisión vertical con LiDAR pueden alcanzar hasta de 15 cm (Ibáñez, 2008; Skinner, 2009), es decir mejor que los modelos obtenidos mediante fotogrametría, estas ventajas hacen de LiDAR una herramienta eficaz en la obtención de los modelos antes mencionados.

El principio de funcionamiento de LiDAR se basa en la medición del tiempo exacto entre la emisión de un pulso laser desde el sensor y su retorno a éste tras reflejarse en la superficie observada, a partir de este tiempo se calcula la distancia entre el sensor y el objeto sobre el que incidió el pulso. Se distinguen dos métodos fundamentales para la obtención de datos, el primero es más directo y "consiste en medir el tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso hasta su recepción", en tanto el segundo "se basa en determinar la diferencia de fase entre el pulso emitido y el recibido". El tiempo que le toma al pulso en recorrer la distancia

entre el sensor y el objeto "es directamente proporcional a la diferencia de fase" (García *et al.*, 2009).

Esta tecnología es relativamente nueva en el país, a pesar que en otros países se ha usado desde hace varios años y se han realizado estudios sobre su manejo y aplicación, en nuestro medio existe un limitado conocimiento de su existencia, bondades y aun mayor limitación sobre el manejo de estos datos o comprensión sobre los parámetros que se deben considerar para obtener información de calidad. LiDAR está siendo incluido cada vez más proyectos de gran importancia a nivel nacional obteniendo como resultados modelos digitales de terreno y elevaciones que facilitan una diversidad de estudios sobre el territorio.

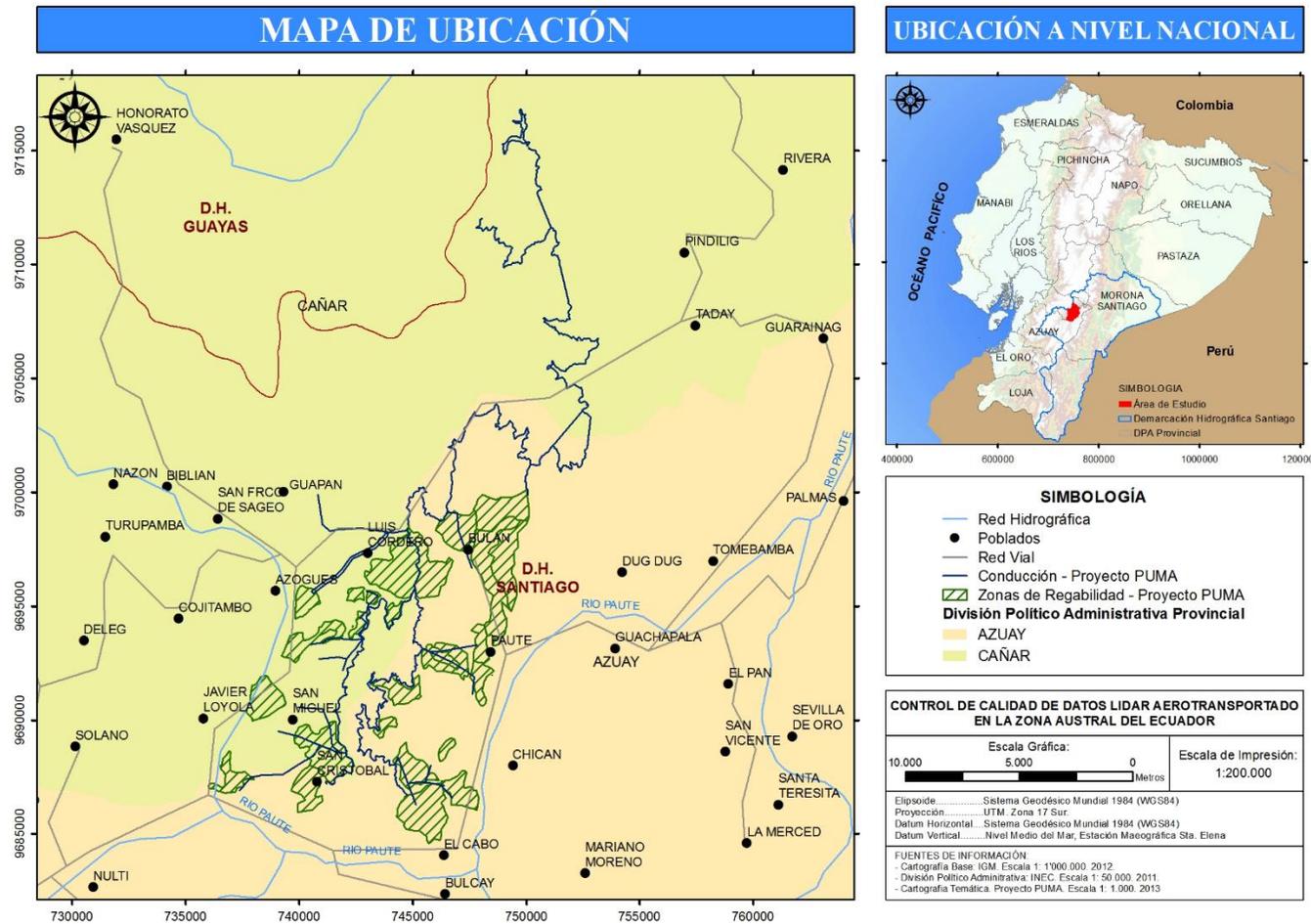
La Secretaría del Agua – Demarcación Hidrográfica Santiago, enmarcada en la ejecución de los estudios del Proyecto para Uso Múltiple del Agua (PUMA) contrató la realización de un vuelo fotogramétrico digital (resolución de 10 cm), combinado con LIDAR (densidad de 1 punto/m²); la superficie volada fue de 15304 ha de las cuales 6748 ha fueron restituidas, obteniendo como productos ortofotografías (resolución de 11 cm), restitución vectorial a escala 1:1000, y el modelo digital de terreno (MDT). Esta información fue generada a fin de desarrollar los estudios definitivos del proyecto, principalmente para diseñar estructuras hidráulicas como la presa, canales de conducción y distribución del agua, plantas de tratamiento de agua, entre otras obras de ingeniería importantes para el proyecto. Además debido a la precisión y actualidad de los datos, se pretende que la información generada pueda utilizarse en futuros estudios relacionados con sistemas de riego y agua para consumo humano, zonificación y planificación territorial, y cualquier otro proyecto que contemple un componente espacial.

2. Métodos

2.1. Zona de estudio

El conjunto de datos LIDAR sobre los que se realizó el control de calidad corresponde a la zona Austral del Ecuador, se encuentra entre los cantones Paute y Azogues (provincias de Azuay y Cañar respectivamente) aproximadamente a 67 Km de la ciudad de Cuenca y a 27 Km de la ciudad de Azogues; a una altura comprendida entre los 2 500 a 3 300 m s.n.m., en donde la Secretaria del Agua - Demarcación Hidrográfica Santiago (SENAGUA - DHS), ejecutó los estudios del Proyecto para Uso Múltiple del Agua (PUMA); para lo cual se ha realizado un vuelo fotogramétrico digital combinado con LiDAR sobre la zona de la captación del agua, canal de conducción y área servida del proyecto (Mapa 1).

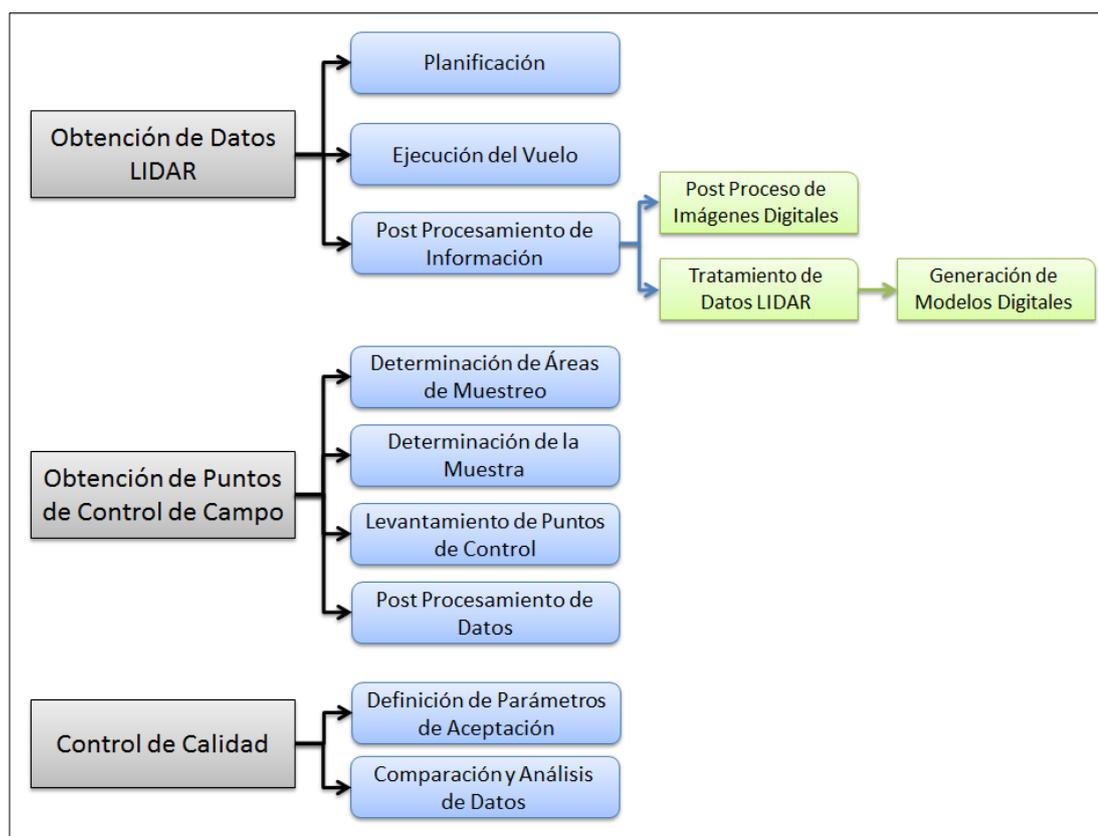
Mapa 1. Ubicación del Área de Estudio



2.2. Metodología

La metodología desarrollada se refiere al control calidad del Modelo Digital de Terreno (MDT), generado a partir de los datos LIDAR levantados para el proyecto PUMA, mediante su comparación frente a elementos puntuales de mayor exactitud capturados con observaciones estáticas DGPS, a partir de procedimientos de muestreo para la revisión y posterior aceptación o rechazo del modelo. La figura 1 muestra un esquema general de la metodología empleada en el desarrollo de este trabajo.

Figura 1. Procedimiento General



Fuente: Elaboración Propia

En esta primera parte se describe el proceso de obtención y tratamiento de información así como la generación de resultados y sus posibles y/o potenciales usos; ya que según mencionan Abad et al, (2008), la calidad tiene aspectos cuantitativos y cualitativos (o descriptivos), estos últimos corresponden al linaje o historia de los datos, el uso o recopilación de casos de uso reales y el propósito o descripción de los usos teóricos para los que fueron producidos los datos; tanto los aspectos cuantitativos como los cualitativos se concretan en elementos de la calidad.

2.2.1. Obtención de información

La recopilación de información comprende en primer lugar la obtención del conjunto de datos LIDAR, sin embargo considerando que en el proyecto se realizó un vuelo combinado con fotografía digital, en párrafos posteriores se describirá el proceso de obtención de la fotografía digital y datos LIDAR; la segunda parte comprende la obtención de puntos de control en campo mediante observaciones DGPS.

2.2.1.1. Obtención del conjunto de datos LIDAR

La obtención de los datos la realizó la empresa Stereocarto S.L. quien fue contratada para ejecutar esta actividad dentro del proyecto PUMA, la descripción de la presente fase (acápite 2.2.1.1) se realiza basados en los informes que presentó ésta empresa. El vuelo se ejecutó en el mes de agosto de 2012, se voló una superficie de 15.304 ha y se restituyó 6748 ha. El flujo de trabajo para la obtención del conjunto de datos LIDAR comprendió las siguientes actividades:

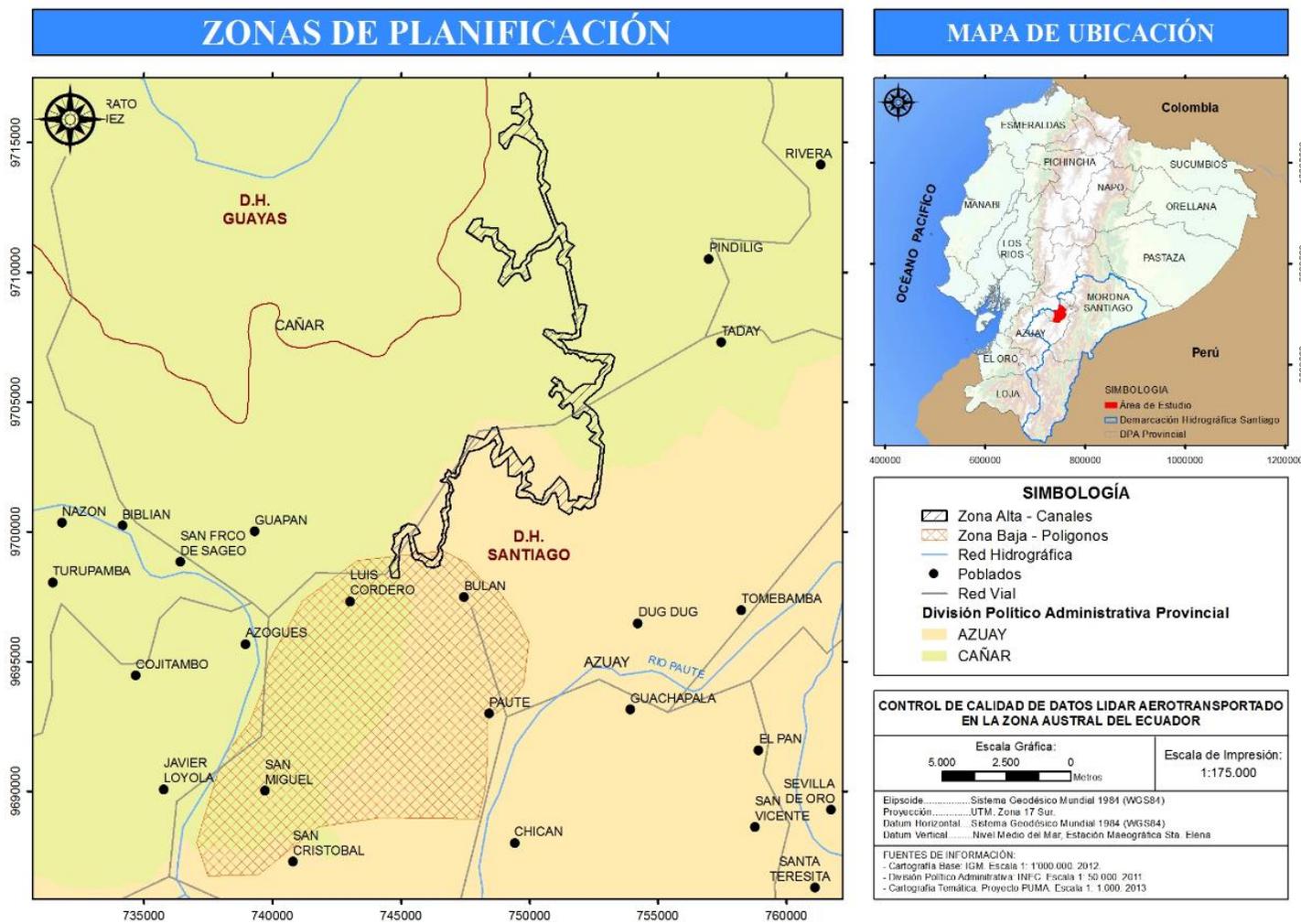
2.2.1.1.1. Planificación del Vuelo

Para la planificación del vuelo ha sido necesario tener en cuenta ciertas consideraciones generales, éstas son:

- Superficie de trabajo: 15.304 ha
- Tamaño medio del píxel por pasada (GSD): 8 cm
- Altura media del vuelo: 800 m
- Dirección de las pasadas: Rumbos Varios
- Recubrimiento longitudinal: 60 % \pm 5 %
- Recubrimiento transversal: 30 % \pm 5 %
- Nº de fotogramas de solape entre pasadas interrumpidas: 4 fotogramas
- Sistema de coordenadas a utilizar para los cálculos: UTM 17 S con referencia a WGS84.

Debido las necesidades del proyecto y las características del área de estudio, se dividió a ésta, en dos zonas para la planificación y ejecución del vuelo; por una parte está la zona alta, en donde se sitúan los canales, y por otra parte está la zona baja en donde se ubica el área de riego del proyecto (Mapa 2).

Mapa 2. Zonas de Planificación.



Una vez definidos los límites de las zonas y considerando los requerimientos técnicos que rigen los trabajos, la empresa a cargo (Stereocarto SL.) realizó la planificación del vuelo combinado con cámara digital y LiDAR. A continuación, se detalla las características básicas de la planificación para cada zona, así como la parametrización de los sensores utilizados.

Tabla 1. Características básicas de la planificación del vuelo y parametrización de los sensores utilizados.

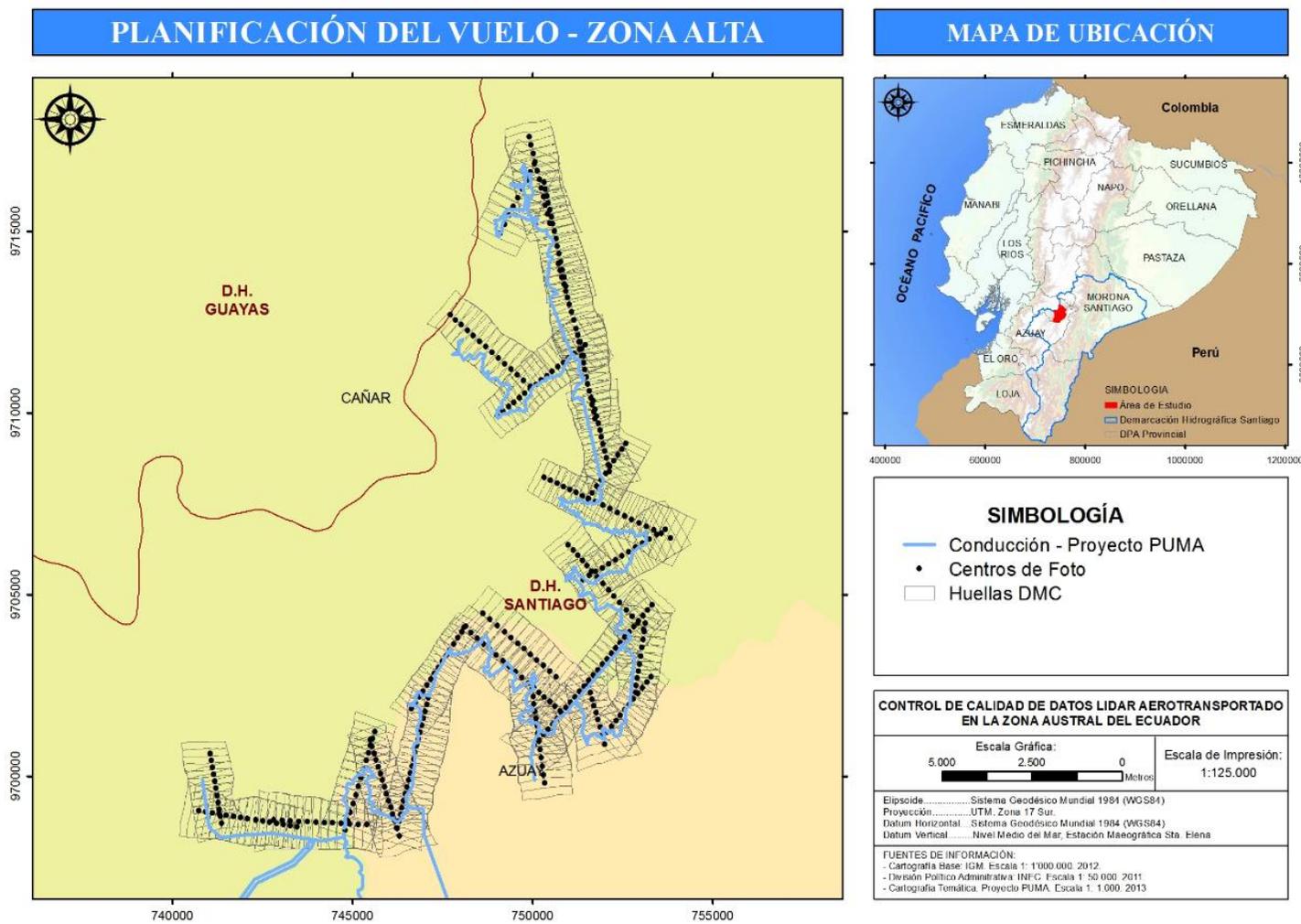
Zona baja (polígonos)	
Altura de vuelo sobre el terreno (m)	800
Número de pasadas	79
Número de fotografías	1.754
Zona alta (canales)	
Altura de vuelo sobre el terreno (m)	700
Número de pasadas	26
Número de fotografías	340
Parametrización de la Cámara Digital en la Zona Baja - Polígonos	
GSD (cm)	8
Recubrimiento longitudinal (%)	60
Recubrimiento transversal (%)	30
Parametrización del Sensor LIDAR en la Zona Baja - Polígonos	
FOV (°)	40
Max. scan rate (Hz)	59,4
Max. laser pulse ate (Hz)	80.100
Laser current (%)	23
Max. point spacing across track (m)	1,78
Max. point spacing along track (m)	1,78
Average point density (puntos / m ²)	1,00
Average point space (m)	1,02
Average point area (m ²)	0,6
Estimated across track accuracy (m)	0,14 - 0,15
Estimated along track accuracy (m)	0,13 - 0,15
Estimated height accuracy (m)	0,07 - 0,09
Parametrización de la Cámara Digital en la Zona Alta - Canales	
GSD (cm)	9
Recubrimiento longitudinal (%)	60
Recubrimiento transversal (%)	30
Parametrización del Sensor LIDAR en la Zona Alta - Canales	
FOV (°)	60
Max. scan rate (Hz)	47,7
Max. laser pulse ate (Hz)	94.700
Laser current (%)	14
Max. point spacing across track (m)	1,61
Max. point spacing along track (m)	1,94

Average point density (puntos / m ²)	0,9
Average point space (m)	1,04
Average point area (m ²)	0,6
Estimated across track accuracy (m)	0,11 - 0,13
Estimated along track accuracy (m)	0,10 - 0,13
Estimated height accuracy (m)	0,07 - 0,09

Los resultados que se obtienen de la planificación del vuelo son:

- Centros de Puntos DMC: Son los centros de proyección planificados, es decir, la ubicación exacta prevista para cada una de las fotos.
- Líneas de LIDAR: Representa el trazado que seguirá el avión, es el mismo para el LIDAR y para la cámara fotogramétrica.
- Huellas DMC: Representa la cobertura de cada una de las fotos proyectada sobre el terreno, es decir, la superficie que aparecerá representada en cada foto.
- Huellas LIDAR: Es la zona que se cubre con datos LIDAR.

Mapa 3. Planificación del Vuelo



La planificación del vuelo culmina con un control de calidad de la misma, los parámetros a evaluar son:

- Cobertura estereoscópica: Toda el área de vuelo debe tener cobertura estereoscópica.
- Recubrimiento longitudinal: 60% + 5%
- Recubrimiento transversal: 30% + 5% tanto en la zona baja como alta.

Para cumplir esta actividad se utiliza la siguiente información de partida:

- Modelo digital del terreno (MDT): Se utilizó el MDT obtenido del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) de la Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM, Shuttle Radar Topography Mission), proyecto internacional de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos (NGA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), con paso de malla 100 metros y sistema de coordenadas WGS84, UTM Zona 17 Sur.
- Coordenadas de los centros de proyección
- Datos de la cámara y escala de vuelo

Los archivos de salida son:

- Base de datos del vuelo: contiene la información para cada fotografía respecto a su escala, recubrimientos longitudinal y transversal.
- Archivo gráfico de las huellas proyectadas en el terreno

2.2.1.1.2. Ejecución del vuelo fotogramétrico digital combinado con LIDAR

La ejecución del vuelo se realizó los días 8, 21, 22, 23 y 24 de Agosto de 2012, debido a que en la zona de trabajo se presentaron las condiciones meteorológicas y de visibilidad óptimas para la ejecución del trabajo, éste consistió en la realización del vuelo fotogramétrico combinado, con GSD nominal de 8 y 9 cm y sensor LiDAR. Los medios técnicos empleados y sus principales características se describen a continuación:

Tabla 2. Características de los medios técnicos empleados

Sensor de captura de imágenes digitales	
Sensor empleado	Digital Mapping Camera (DMC)
Número de serie del sensor	DMC01-0037
Resolución espectral	Cinco bandas (rojo, verde, azul, infrarrojo cercano y pancromático)
Control automático de la exposición	Incluido
Sistema FMC	TD1
Plataforma Giroestabilizadora	T-AS144429 Compensación de 5° en roll y pitch y 30° en heading. Permite control automático de deriva
Sistema de navegación	ASMS de Integraph, permite: <ol style="list-style-type: none"> 1. Planificar el vuelo, determinando los centros de fotos 2. Navegación en tiempo real 3. Control automático de disparo 4. Registro de eventos 5. Registro de datos de captura de cada imagen.
Receptor GPS	NOVATEL Millenium, características: <ol style="list-style-type: none"> 1. 12 canales bi frecuencia siguiendo las portadoras L1 y L2 2. Registro de observaciones superior a 0,1 segundos 3. Modo de observación mediante código y diferencia de fase 4. Algoritmos de dobles diferencias para resolver la ambigüedad de fase 5. Precisión en las coordenadas de la cámara de 10 a 30 cm.
Sistema inercial (IMU)	PosAV-510, características: <ol style="list-style-type: none"> 1. Frecuencia de registro de 200Hz 2. Precisión 0,005° en Omega y Phi, 0,008° en Kappa
Parámetros básicos en imágenes virtuales de alta resolución	
Distancia focal (m)	0,12
Tamaño del sensor (pixel)	13824 x 7680
Tamaño de pixel (μm)	12
Punto principal (mm)	X= 0,0 ; Y= 0,0
Parámetros de distorsión	Imágenes libres de distorsión
Parámetros básicos en imágenes virtuales con resolución multispectral	
Distancia focal (m)	0,03
Tamaño del sensor (pixel)	3456 x 1920
Tamaño de pixel (μm)	12
Punto principal (mm)	X= 0,0 ; Y= 0,0
Parámetros de distorsión	Imágenes libres de distorsión
Sensor de captura de datos LIDAR	
Sensor empleado	ALS50 II
Número de serie	SN 48
Altura de vuelo	200 a 6000 m

Frecuencia de pulsación	Hasta 150000Hz (150000 pulsos / segundo)
Precisión a priori	Hasta 10 cm en altimetría
Número de retornos capturados	4
Campo de visión (FOV)	10 a 75°
Captura de intensidades	Una por pulso
Tecnología MPiA (Múltiples Pulsos en Aire)	Si
Densidad de puntos (puntos / m ²)	Hasta 12
Aeronave	
Marca y modelo	King Air Beechcraft B200
Matrícula	EC-KNT
Características Generales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Velocidad máxima operativa: 545 km/h (339 MPH; 294 nudos,) a 25000 pies (7600 m) 2. Velocidad de crucero: 536 km/h (333 mph; 289 nudos) a 25000 pies (max crucero) 3. Velocidad entrada en pérdida (de calado): 139 km/h (86 mph; 75 nudos) IAS (con flaps abajo) 4. Alcance: 3338 km (2075 mi; 1800 nmi) con máximo de combustible y reserva 45 minutos de reserva 5. Techo de servicio: 10700 m (32800 pies) 6. Régimen de ascenso: 12,5 m/s (2450 pies/min) 7. Carga alar: 201,6 kg/m² (41.3 lb/pie²) 8. Potencia / peso: 220 W/kg (0,14 hp/lb)

Los productos levantados en vuelo son distintos por cada uno de los sensores, se compilan en un formato propio del fabricante; en el caso de la cámara digital, cada disparo captura 8 imágenes, una por cada cámara individual que conforma el sistema; 4 de estas imágenes son pancromáticas y las otras 4 son multiespectrales (rojo, verde, azul e infrarrojo cercano), estas imágenes son capturadas con una resolución radiométrica de 12 bits por píxel.

Por su parte y al mismo tiempo el sistema GPS/INS captura la información de navegación y el tiempo GPS en que la cámara efectúa cada una de las exposiciones, esta información se emplea posteriormente para calcular los parámetros de orientación externa de cada fotografía.

El sistema LiDAR genera una nube de puntos capturando para cada pulso la siguiente información:

- Número de retorno
- Intensidad de la señal retornada
- Ángulo de barrido
- Tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso
- Posición del sensor (GPS/IMU)

Los datos brutos capturados por los sensores son procesados en gabinete para la obtención de los productos finales según los requerimientos establecidos en los pliegos de condiciones técnicas del proyecto. Los productos finales generados por la cámara son:

Tabla 3. Productos obtenidos con la cámara

Imagen	Resolución radiométrica	Resolución geométrica
Composición multispectral RGBI (Rojo, Verde, Azul, Infrarrojo)	8 bits	9cm
Ortoimagen		10 cm

Como producto final del sistema LIDAR se obtienen los Modelos Digitales del Terreno y Superficie con una resolución de 1m.

2.2.1.1.3. Post procesamiento de información

2.2.1.1.3.1. Post proceso de Imágenes Digitales

Consiste en la corrección y normalización de las imágenes brutas captadas por el sensor, mediante este procedimiento, las imágenes se hacen útiles para su posterior explotación; el proceso es el siguiente:

a. Correcciones radiométricas.

Consiste en la corrección de píxeles defectuosos y posterior ecualización del histograma de frecuencias, balanceado y contraste de la imagen.

b. Correcciones geométricas.

Es la corrección de las distorsiones de imagen de cada sensor óptico y la corrección entre el centro geométrico y el centro óptico de cada CCD. En esta fase se consiguen las imágenes de nivel 1.

c. Mosaicado de imágenes simples pancromáticas para conformar la imagen virtual.

Los módulos de los cuatro sensores pancromáticos están dirigidos hacia la escena con ligeros ángulos de inclinación que dan lugar a una representación conjunta con forma de mariposa. Entre las cuatro imágenes existen zonas comunes de solape, que se utilizan para la rectificación y mosaicado de la imagen final de perspectiva cónica de 13865 x 7680 píxeles. Mediante la búsqueda de puntos homólogos por correlación automática entre las cuatro imágenes se consigue ensamblar las mismas, con lo que se obtiene la imagen virtual pancromática. Esta imagen virtual es sometida a un nuevo proceso de corrección radiométrica

que iguala el brillo y el contraste de las cuatro imágenes individuales de las que se compone. Al finalizar este paso se obtienen imágenes de nivel 1a.

d. Obtención de imágenes a color por composición.

En el caso de las imágenes a máxima resolución, se combinan los canales multispectrales con el pancromático, realizando un proceso de pansharpening, el software de posproceso ofrece la posibilidad de emplear dos técnicas diferentes de fusión: IHS (Intensity-Hue-Saturation) o Brovey, la elección entre una y otra depende de las características del terreno y la altura de vuelo. Luego de este proceso se obtienen las imágenes de nivel 1b.

e. Obtención de Imágenes Nivel 2.

Resultan de aplicar a las imágenes de nivel 1b los parámetros de orientación externa obtenidos por georreferenciación directa.

f. Obtención de Imágenes Finales.

Para conseguir las imágenes se requiere la realización previa de paletas de color que serán aplicadas a las imágenes. Para realizar las paletas de color se seleccionan diferentes imágenes a partir de los *thumbnails*. Las imágenes seleccionadas deben ser representativas de toda el área volada durante la misión a procesar, incluyendo zonas urbanas, rurales y, cuando corresponda, imágenes de litoral.

Estas imágenes son procesadas sin aplicar paleta de color y, mediante el software DMC Image Analyst de ZI, se obtiene de forma semiautomática una paleta de color en la que se relaciona cada nivel digital de la imagen original con el que deberá tener la imagen final procesada (se realiza una paleta para cada producto) que será aplicada al resto de imágenes a procesar.

Antes de procesar todas las imágenes del vuelo, se comprueba que la paleta generada cumple con las especificaciones técnicas solicitadas. Para ello, se procesan las imágenes antes seleccionadas (aplicando en este caso las paletas generadas previamente) y una vez procesadas son sometidas a un control de calidad radiométrico, donde se analiza el histograma de cada imagen comprobando los niveles de saturación, niveles digitales sin representación en la imagen, valores medios del histograma, entre otros. En caso de cumplir con el control de calidad, se procede a procesar el resto de imágenes del vuelo, por el contrario, si alguna de las imágenes no cumple el control de calidad radiométrico, se procede a obtener una nueva paleta. Para asegurar una correcta generación de la paleta de colores éstas se obtienen siempre empleando el mismo monitor, el cual se calibra periódicamente y se mantiene en unas condiciones de luminosidad adecuadas.

Una vez procesadas todas las imágenes, éstas son sometidas a un control de calidad radiométrico absoluto para comprobar los niveles de saturación, rango dinámico de las

imágenes y niveles medios del histograma mediante el software PC-Grid desarrollado para tal efecto por Stereocarto. Mediante este software se obtiene una base de datos con información de cada imagen que es analizada por el jefe de proyecto, quien en caso de conformidad aprobará los trabajos realizados y, en caso de encontrar desconformidades, solicitará la corrección de las mismas.

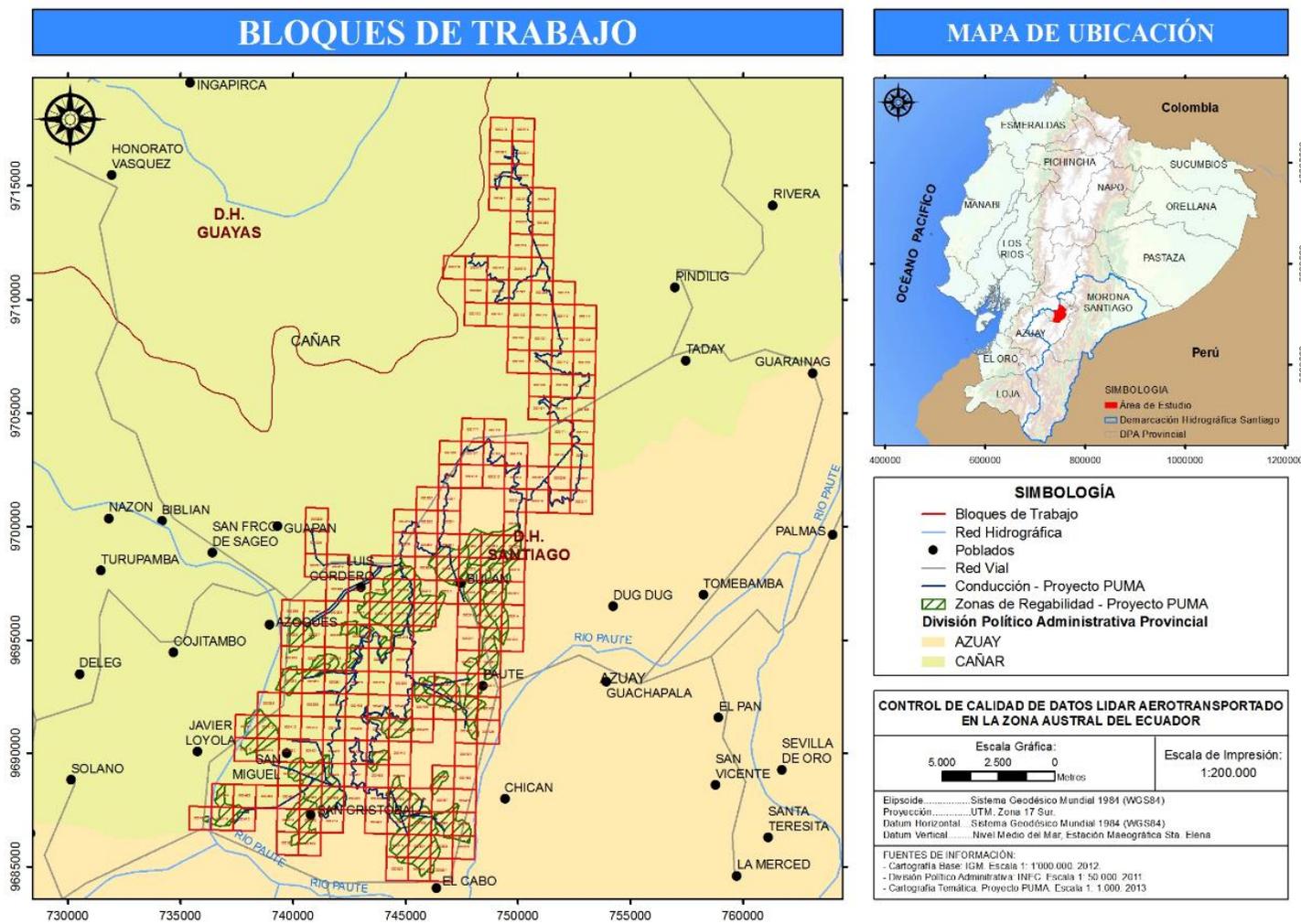
2.2.1.1.3.2. Tratamiento de datos LiDAR

Una vez que se dispone de la nube de puntos LiDAR, ésta recibe distintos tratamientos a fin de generar los productos derivados, a continuación se detallan los procesos que se siguen.

a. División de los datos LiDAR en hojas de trabajo

El sistema LiDAR permite el registro de una gran cantidad de información del terreno, ésta es dividida en hojas para facilitar su análisis, en el caso del proyecto PUMA, la nube de puntos LiDAR ha sido dividida en hojas siguiendo la misma distribución que para las hojas de ortoimágenes, para asegurar una correspondencia unívoca y sencilla entre ambos tipos de datos.

Mapa 4. Distribución de bloques



b. Clasificación automática de los datos LiDAR

Los datos LiDAR son clasificados inicialmente mediante algoritmos matemáticos automatizados que permiten tener una primera categorización de la nube de puntos LiDAR. Según Ibáñez (2008) existen varios tipos de filtros, entre ellos: los basados en la pendiente, basados en la definición de un bloque mínimo, basados en superficies y basados en algoritmos de agrupación / segmentación. Tanto el filtro como los parámetros de configuración de éstos, son establecidos en función de las características de la zona de trabajo; a fin de obtener resultados óptimos. La clasificación inicial para la nube de puntos LiDAR se observa en la tabla que sigue.

Tabla 4. Clasificación Inicial de la nube de puntos LiDAR

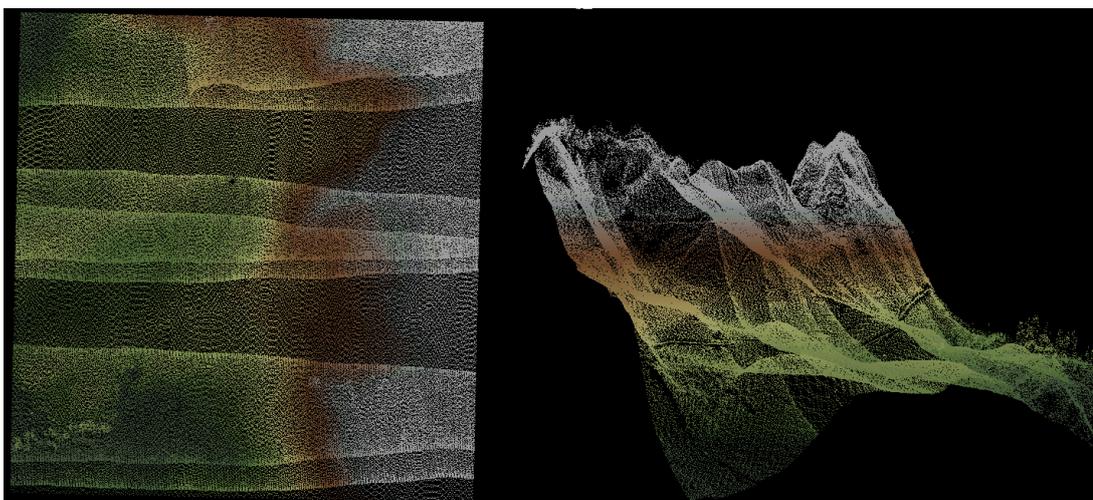
Código LAS	Descriptor	Descripción
1	<i>Default</i> (por defecto)	Es la categoría a la que se le asocia por defecto los puntos de la nube. Luego de clasificada la nube, se asocian a esta categoría los puntos que siendo útiles para la generación de diversos tipos de modelos, no pertenecen ni a la clase Terreno (ground), ni a cualquier otra definida y que sea de utilidad.
2	<i>Ground</i> (Terreno)	Con esta categoría se identifican los puntos que definen el terreno desnudo, es decir, sin la presencia de vegetación, estructuras, etc. Con estos puntos se genera el MDT.
7	<i>Low points</i>	Con esta categoría se identifican los puntos que proceden de falsos ecos capturados por el sensor y que por tanto no tienen utilidad. Esta categoría es descartada para la obtención de los modelos digitales, ya que al no corresponder con ningún tipo de elemento real introducirían errores en los modelos.

c. Revisión y edición de la clasificación automática

La clasificación inicial es revisada por operadores expertos que la refinan para asegurar que sea correcta. Esta revisión se realiza mediante:

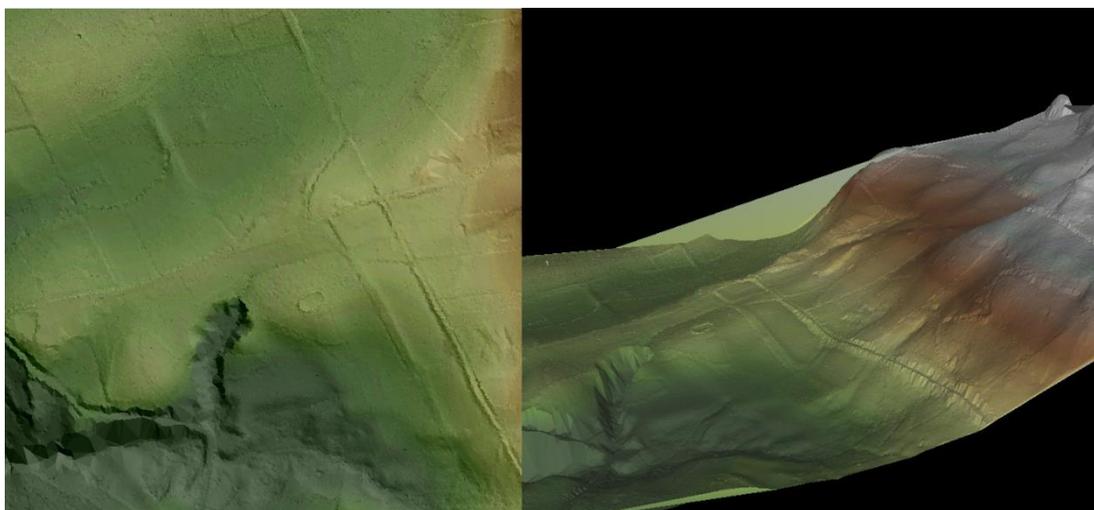
- Inspección directa de la nube de puntos. Para lo cual se usan vistas en planta, perspectiva, perfiles e información gráfica adicional de forma simultánea (imágenes aéreas, ortofotografías, u otras disponibles de forma local o en línea).

Figura 2. Vistas en Planta (I) y Perspectiva (D) de la nube de puntos



- Revisión de mapas de sombras. Facilita la identificación de zonas conflictivas que necesitan de una revisión más exhaustiva para la depuración del modelo. En los mapas de sombras, estas zonas se caracterizan por presentar triángulos muy marcados en zonas que no corresponden creando áreas de sombras artificiales y rompiendo la continuidad natural que tiene el sombreado del modelo.

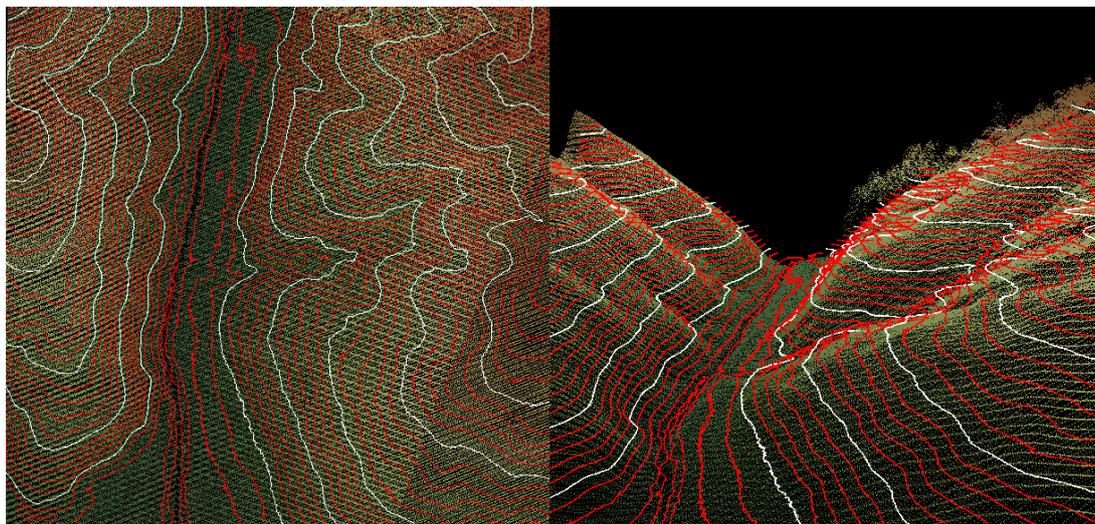
Figura 3. Vistas en Planta (I) y Perspectiva (D) de los mapas de sombras



- Inspección mediante visión estereoscópica. Se revisa la nube de puntos en tres dimensiones sobre los modelos estereoscópicos procedentes del vuelo fotogramétrico, de esta forma se puede identificar si los puntos seleccionados como terreno, edificios, u otras categorías, corresponden realmente con los tipos que tienen asociados.

- Revisión de las curvas de nivel. Se identifican áreas no depuradas adecuadamente. Las áreas que tienen incidencias aparecen reflejadas en las curvas de nivel por la falta de suavidad en el trazado de las mismas, angulosidad de la curva, aparición de conjuntos de curvas concéntricas cerradas de pequeña superficie, etc.

Figura 4. Vistas en Planta (I) y Perspectiva (D) de las Curvas de Nivel



- Generación de Modelos Digitales. En la generación de los diferentes tipos de modelos digitales intervienen diferentes categorías de puntos de la nube LiDAR. Para cada tipo de modelo se escogen, en función de la clasificación de los puntos LiDAR, aquellos que han de intervenir para obtener el resultado deseado.

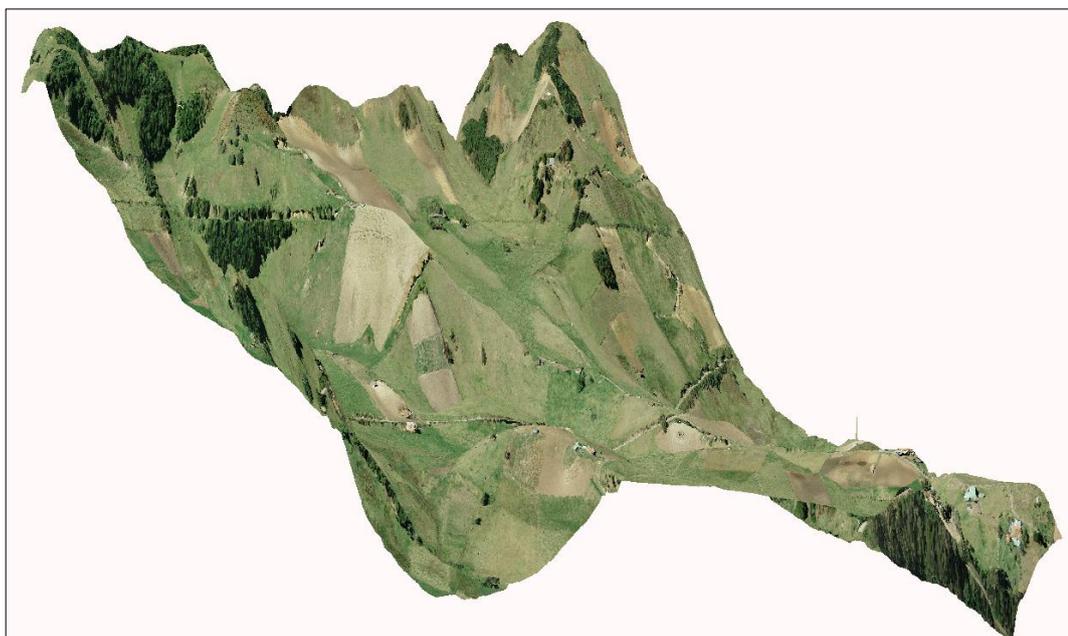
La técnica más empleada para la generación de los modelos digitales es la triangulación de la nube de puntos. Para la inclusión de determinados elementos en los modelos se han empleado técnicas de proyección vertical dado que en determinados casos, muy concretos, proporciona resultados más adecuados según indica Stereocarto.

Los tipos de modelos digitales generados fueron los siguientes:

- Modelo digital del terreno.

Se obtiene empleando la categoría “*Terreno*” de la nube LiDAR, mediante procedimientos de triangulación sobre la misma.

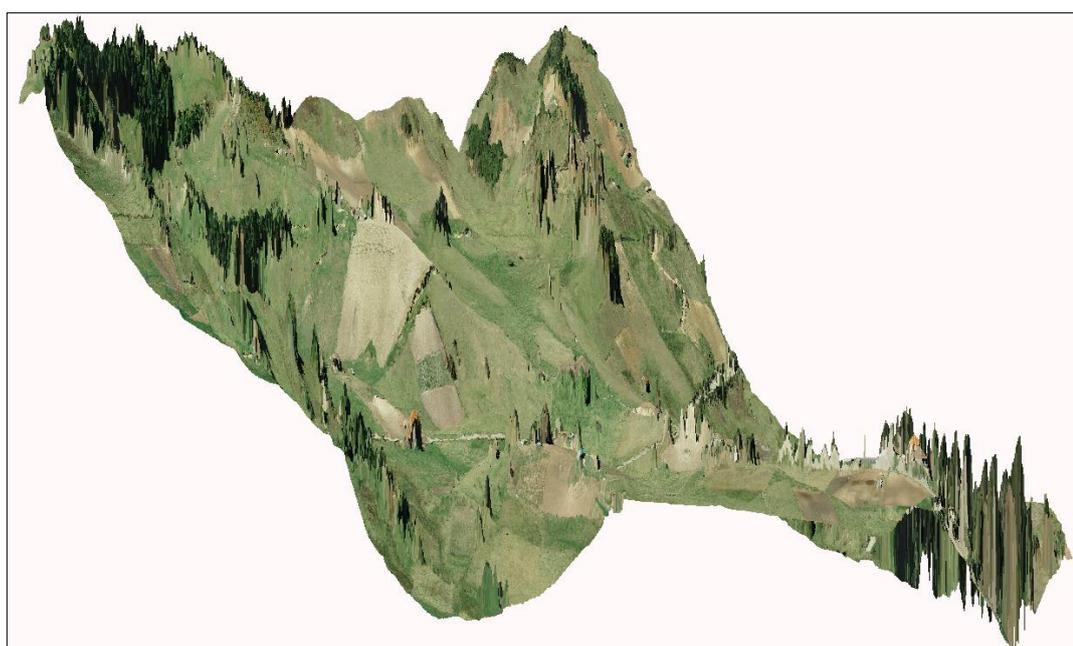
Figura 5. Vista en perspectiva del MDT generado



- Modelo Digital de Superficie

Para la obtención del modelo digital de superficies (MDS) se emplean tanto los puntos *Terreno* y *Por defecto*. Para obtener el modelo digital de superficies se realiza un filtrado de los puntos que corresponden a ecos intermedios y se descartan. El MDS se genera empleando los puntos que han presentado un único retorno o los que corresponden al primer retorno de un pulso con varios ecos.

Figura 6. Vista en perspectiva del MDS generado



2.2.1.2. Obtención de los Puntos de Control de Campo

Según Atkinson, García y Ariza (s/f) se pueden considerar diferentes maneras para dar seguimiento a la calidad o exactitud de la cartografía, entre ellas se encuentran las estimaciones de experto, estudios de coherencia interna, comparación con las fuentes, comparación con fuentes de mayor exactitud y la evaluación de tipo deductivo. Para el desarrollo del presente trabajo se ha optado por una comparación de los datos con fuentes de mayor exactitud, por tanto ha sido necesario levantar información con un DGPS, ya que en nuestro medio es la única forma de asegurar una exactitud superior a la de la cartografía a que se analizará.

La obtención de puntos de control comprende dos fases, la primera se refiere a la planificación y la segunda de ejecución del levantamiento de información. En la fase de planificación se determinan las áreas de muestreo y se define la muestra en cada una de las áreas; en la fase de ejecución, se realizó una campaña de levantamiento de puntos de control y el pos proceso de los datos levantados. A continuación se describen las actividades desarrolladas.

2.2.1.2.1. Determinación de Áreas de Muestreo

El presente trabajo se desarrolló en dos partes, la primera consistió en el control de calidad del MDT correspondiente al área total de restitución del proyecto PUMA es decir 6748 ha, la segunda parte correspondió al control de calidad del MDT en cuatro sub áreas de trabajo las mismas que fueron definidas considerando dos factores influyentes en la calidad de los datos LIDAR (FEMA, 2003; NDEP 2004; Skinner, 2009; ASPRS, 2004): la cobertura de suelo y la pendiente del mismo. En cuanto a la cobertura del suelo se ha tenido en cuenta áreas con vegetación herbácea (pasto y paramo herbáceo) y suelo descubierto y/o urbano; en lo referente a la pendiente, se clasificó al territorio en dos clases: áreas con pendientes menores a 25% (pendientes débiles a irregulares) y áreas con pendientes mayores a 25% (pendientes fuertes a abruptas) según la clasificación de MAG-ORSTOM (1980); la tabla que sigue muestra la combinación de los dos parámetros en la determinación de cuatro sub áreas de interés.

Tabla 5. Sub áreas de muestreo y parámetros para su determinación.

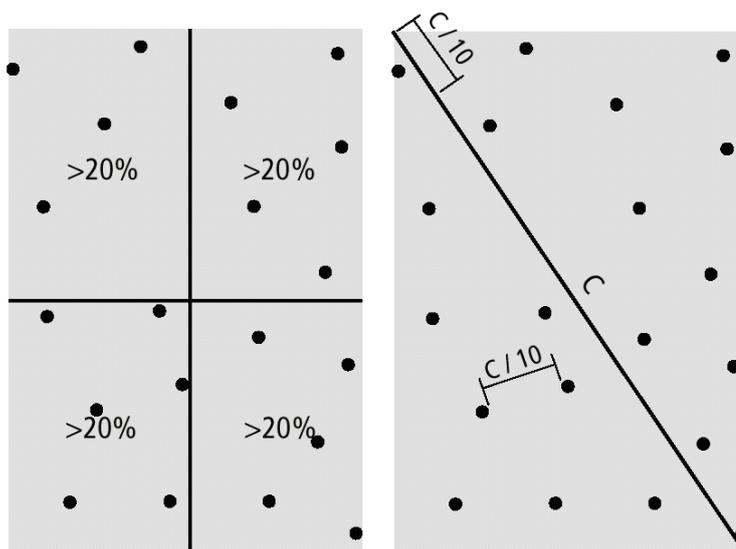
COBERTURA SUELO PENDIENTE	Vegetación Herbácea	Suelo Descubierto y Urbano
Menor a 25%	Vegetación Herbácea - Pendiente menor a 25%	Suelo Descubierto y Urbano - Pendiente menor a 25%
Mayor a 25%	Vegetación Herbácea - Pendiente mayor a 25%	Suelo Descubierto y Urbano - Pendiente mayor a 25%

2.2.1.2.2. Determinación de la Muestra

La metodología más apropiada para realizar un control de calidad sobre un proceso sería analizar el total de los elementos que intervienen en dicho proceso, sin embargo en muchos casos esta actividad no es factible ya que se requiere una inversión considerable de recursos, por tanto generalmente se recurre a un muestreo; con esto se pretende disponer de una serie de elementos correctamente seleccionados de manera que su comportamiento sea extrapolado al total de los elementos y no sea necesario realizar el control sobre el universo. En el muestreo se debe además definir previamente valores límites de aceptación o rechazo del producto (Ariza, 2002a en Mozas, 2007).

Para la elección de la muestra fue necesario tener en cuenta ciertos criterios, el primero es el tipo de muestreo; para el caso se eligió el muestreo aleatorio simple. El segundo, fue la distribución espacial de la muestra, para lo que se procuró realizar una distribución lo más homogénea posible siguiendo las recomendaciones del *Federal Geographic Data Committee* - FGDC - expuesto en la figura 7 (Atkinson, García y Ariza, s/f), de esta forma al área de estudio se la dividió en cuadrantes, los puntos se los repartió de manera que en cada cuadrante del mapa se encuentren al menos un 20 % de los mismos, además la separación entre los puntos no fue inferior a una décima parte de la diagonal del mapa generado para el área de interés.

Figura 7. Distribución homogénea de la muestra según recomendaciones de la FGDC



Fuente: FGDC en Atkinson, García y Ariza, s/f

Asimismo, se tomaron en cuenta otros criterios para la determinación de la distribución espacial de la muestra, estos son:

- a. La necesidad de SENAGUA de validar la información en áreas en donde se emplazaran obras de importancia (por ejemplo la presa).
- b. La facilidad de acceso al punto de muestreo con los equipos necesarios.
- c. La precisión vertical del punto luego de haberlo levantado.

El siguiente criterio es el número de puntos de control a levantar, Ariza y Atkinson (2006) realizan un análisis de varios estándares y/o normas referidas a Metodologías de Control Posicional (MCP) en donde los autores de dichas metodologías recomiendan diversos tamaños de muestra (n), así se tiene que *National Map Accuracy Standard* (NMAS), *Engineering Map Accuracy Standard* (EMAS), *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA); sugieren un tamaño de muestra igual a 20 sitios; el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) en el documento Borrador de especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía, topográfica a cualquier escala del año 2006 define un número de muestras igual a 30; la *Ordnance Survey* (OS) define como numero de muestra adecuado 50, y finalmente *Standardization Agreement* (STANAG) propone 167. Los autores del análisis concluyen que cuando el número mínimo de elementos de control recomendados es igual a 20, el tamaño de la muestra es muy pequeño, sin embargo por su parte Ruano 2008 sugiere que una muestra de 20 puntos es suficiente de acuerdo a la experiencia del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM).

2.2.1.2.3. Levantamiento de los puntos de control

El levantamiento de los puntos de control fue ejecutado por el equipo de Fiscalización y Supervisión del Proyecto PUMA (PROMAS y SENAGUA respectivamente), se utilizaron dos equipos DGPS de marca Trimble modelos R4 y R8, éstos comprenden los siguientes componentes:

Tabla 6. Componentes de los DGPS Usados en el Levantamiento de Información.

Equipo R4	Equipo R8
1 Antena (móvil)	2 Antenas (base y móvil)
1 Trípode	2 Trípodes
1 base nivelante	1 Base nivelante
Flexómetro	1 bastón
Cables de poder y transferencia de datos	Flexómetro
	Cables de poder y transferencia de datos
	Software para pos proceso

Figura 8. Equipo Trimble R4 utilizado para las observaciones DGPS

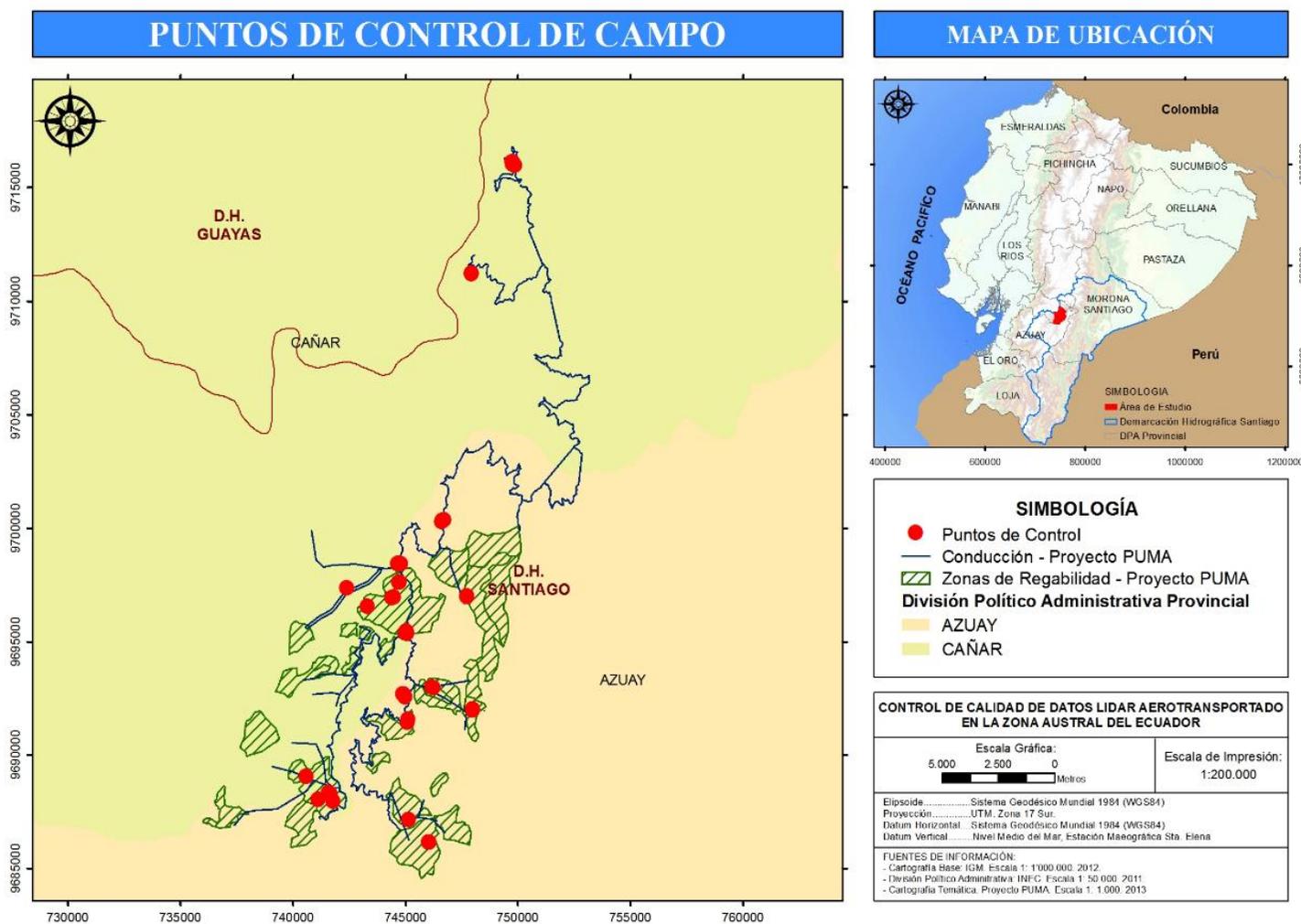


El proceso de medición de los puntos de control se desarrolló mediante un posicionamiento estático rápido, las mediciones fueron continuas, con épocas de 5 segundos, el período de observación varía entre 5 a 20 minutos dependiendo de ciertas condiciones que podrían afectar la precisión de los datos; el PDOP fue inferior a 3 y la máscara de elevación sobre los 10° con respecto al horizonte de la antena.

El procedimiento comprendió como primer paso la instalación de la estación de referencia o estación base en un punto con coordenadas conocidas, para esto, se obtuvo una monografía de punto de control geodésico del Instituto Geográfico Militar (IGM), este punto se encuentra en la terraza del hotel Rivera de la ciudad de Azogues, el mismo fue trasladado a la zona del proyecto, cerca de Huintul en donde se ubicó un punto temporal en el que se instaló la base (Antena R8), de esta manera la distancia entre la antena base y la móvil fue menor y por tanto la precisión de los datos es superior y el tiempo de observación menor.

Una vez instalada la base se procedió al levantamiento de los puntos de control con las dos antenas una R4 y otra R8, para esto se consideró los parámetros para el muestreo expuestos en ítems anteriores. Se levantaron un total de 53 puntos para el control de calidad del modelo digital del proyecto PUMA mediante técnicas DGPS, los mismos que se muestran en el mapa 5.

Mapa 5. Distribución espacial de los 53 puntos de control de campo levantados



2.2.1.2.4. Posproceso

El posproceso se lo realiza con el software Trimble Business Center teniendo disponibles los datos crudos de los puntos georreferenciados, se procede a fijar la base (ubicada en la zona de Huintul) con el control horizontal y vertical con coordenadas conocidas en el sistema WGS84, y a partir de ésta se procesan los datos, los resultados del proceso incluyen los puntos levantados con sus respectivas coordenadas U.T.M., precisiones altimétricas, planimétricas y de distancia, y se presentan en un reporte que el software genera, un resumen de éste se presenta en el anexo 1.

2.2.1.2.5. Selección de los puntos de control

Para el desarrollo de la primera parte de este trabajo, es decir considerando como ámbito de estudio a la superficie total restituída del proyecto PUMA, se eligieron 38 puntos de control de entre los 53 puntos levantados (Tabla 4), con lo que se supera el número de puntos sugerido por Ruano, NMA, EMAS, NSSDA e IPGH. Para llevar adelante la segunda parte, es decir el análisis sobre cada una de las cuatro sub áreas de muestreo especificadas en la tabla 1 (Sub áreas de muestreo y parámetros para su determinación), fueron seleccionados cuatro puntos de muestreo de entre los 38 puntos obtenidos para la superficie total restituída.

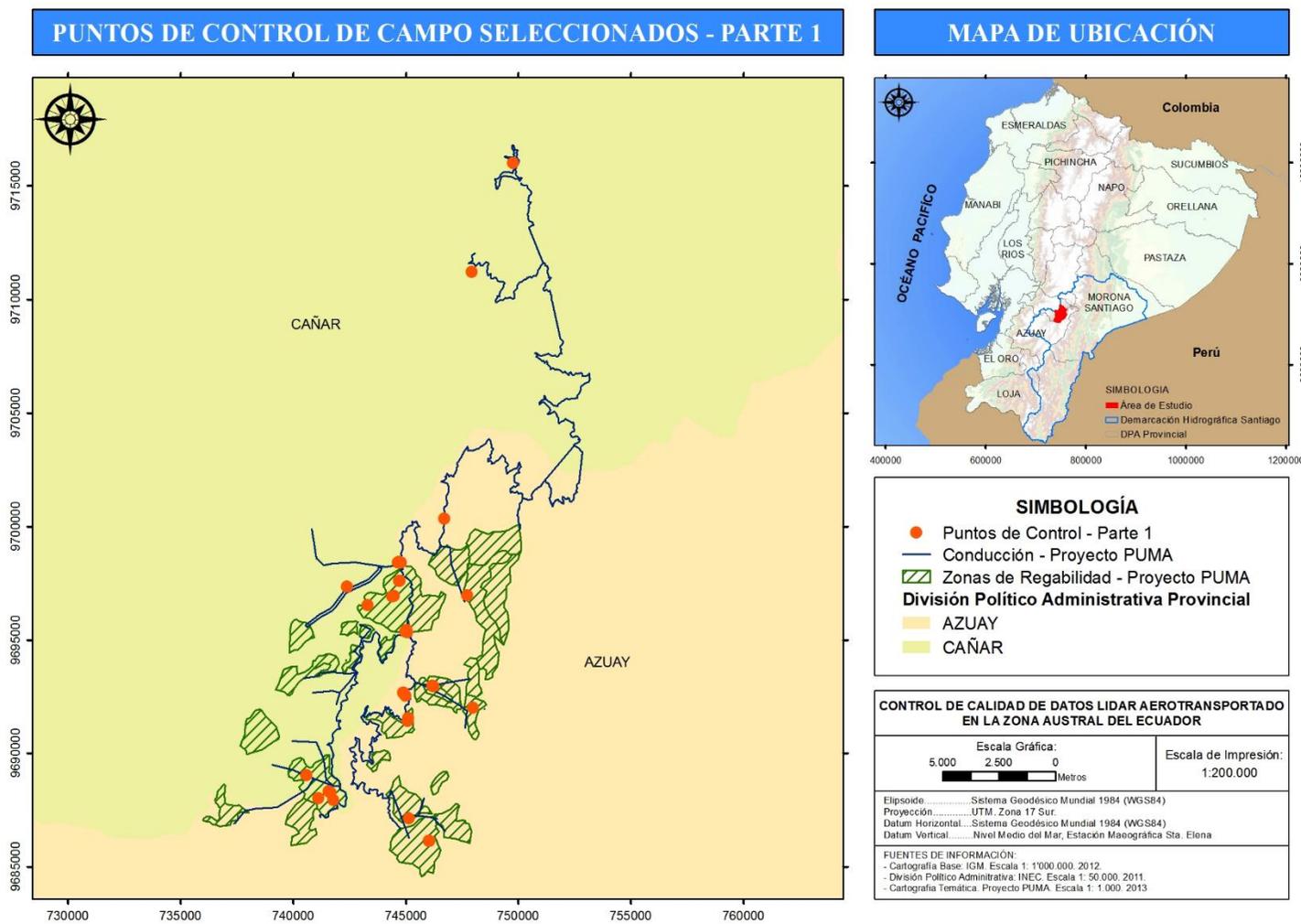
Tabla 7. Puntos seleccionados para el control de calidad sobre la superficie total restituída

N°	Código	Coordenada "x"	Coordenada "y"
1	PUMA 03	744880,109	9692682,194
2	PUMA 05	742384,537	9697365,368
3	PUMA 06	746031,343	9686151,883
4	PUMA 07	746045,212	9686161,503
5	PUMA 08	745090,139	9691430,202
6	PUMA 09	745129,325	9687143,326
7	PUMA 10	744702,858	9698421,021
8	PUMA 11	744480,095	9696944,784
9	PUMA 12	743310,260	9696551,953
10	PUMA 13	746699,303	9700340,034
11	PUMA 15	749764,302	9716016,581
12	PUMA 17	747916,761	9711216,978
13	PUMA 19	744771,868	9698423,203
14	PUMA 20	744771,772	9698416,085
15	PUMA 21	744704,971	9697617,899
16	PUMA 23	745043,534	9695346,279
17	PUMA 24	744898,644	9692686,167
18	PUMA 25	745111,633	9691565,573
19	PUMA 26	746222,906	9692950,409
20	PUMA 27	747972,629	9692006,805
21	PUMA 28	740578,997	9689048,221

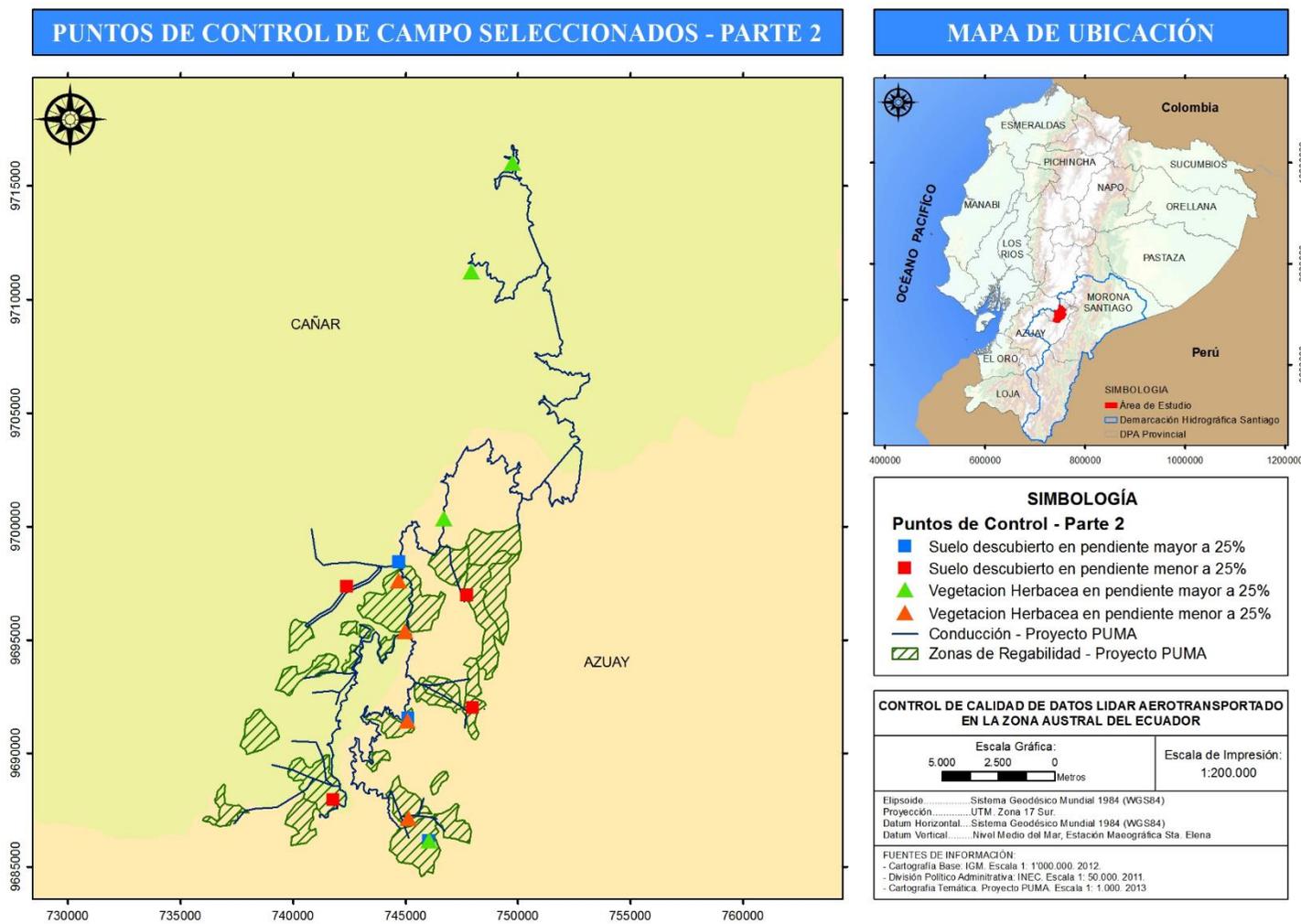
22	PUMA 29	741786,993	9687954,312
23	PUMA 30	744717,045	9697595,430
24	PUMA 31	744972,055	9692544,776
25	PUMA 32	746168,411	9692982,913
26	PUMA 34	744686,100	9698453,710
27	PUMA 35	745033,641	9695393,381
28	PUMA 36	745027,833	9695452,107
29	PUMA 37	741118,704	9688022,886
30	PUMA 38	744979,575	9695384,486
31	PUMA 39	744686,385	9698455,608
32	PUMA 41	741579,238	9688327,520
33	PUMA 45	740594,285	9689045,010
34	PUMA 49	744755,143	9698432,959
35	PUMA 50	744398,682	9696930,677
36	PUMA 51	747718,906	9696973,176
37	PUMA 52	741654,043	9688279,855
38	PUMA 53	744658,654	9698409,669

Para la selección de los 38 puntos de control (Mapa 6) fue necesario analizar los 53 puntos levantados, a fin de verificar la normalidad de los datos elegidos para el control de calidad, en el anexo 2 se presentan los resultados de las pruebas de normalidad realizadas. Por otra parte, se determinó la cobertura de suelo de los puntos de control, la misma que fue observada en el campo y posteriormente verificada visualmente en la fotografía aérea, esta información fue adicionada como atributo a cada punto. Asimismo fue necesario definir la pendiente en la que se encontraban los puntos de control, para conseguirlo, se generó un mapa de pendientes a partir del MDT creado por Stereocarto para el proyecto PUMA, el mismo que tiene una resolución espacial de 1 m por 1 m, se extrajo los valores del mapa generado y se los adicionó a los puntos como un atributo más; esta información (cobertura de suelo y pendientes) se utilizó en la segunda parte del trabajo. Una vez que los 38 puntos fueron seleccionados, se eligió los cuatro mejores puntos para el control de calidad de cada una de las cuatro sub áreas de trabajo, para esto se consideró la precisión vertical más alta y la distribución espacial de los puntos elegidos; el resultado se presenta en el Mapa 7.

Mapa 6. Treinta y ocho puntos de control de campo seleccionados para el análisis de la parte 1



Mapa 7. Puntos de control de campo seleccionados para el análisis de la parte 2



2.2.2. Control de calidad

El control de calidad hace referencia a un conjunto de actividades, métodos y herramientas orientadas a establecer si determinado bien o servicio cumple con las normas predefinidas para su generación. La Organización Internacional de Estandarización (*International Organization for Standardization* – ISO) es la entidad encargada de promover el desarrollo de normas internacionales para la generación tanto de productos como de servicios a nivel internacional. En este contexto, se han desarrollado un grupo de normas específicas para la información geográfica, éste corresponde a la familia ISO 19100 las mismas que incluyen el componente de la calidad en las normas ISO 19113, 19114 y 19138. Ariza y Rodríguez (2008) realizan un análisis entorno a la familia ISO en mención, en el capítulo 8 de dicho documento Ariza y García presentan un estudio referente a las “Normas sobre calidad en información geográfica”; en este acápite se presenta una síntesis de tal estudio, el mismo que ha servido en gran parte para el desarrollo del presente trabajo.

La norma ISO 19113 se refiere a “Principios de la calidad” tiene por objeto establecer los principios para describir la calidad de un conjunto de datos, e informar sobre la misma. Esta norma establece que la descripción de la calidad de una base de datos geográfica puede realizarse mediante información no cuantitativa y cuantitativa. La primera se describe mediante los “elementos generales de la calidad” y es de carácter general, permite conocer el objetivo e historial de la información, asimismo posibles nuevas aplicaciones a más de las comunes; estos elementos generales se resumen en: propósito, uso y linaje del conjunto de datos geográficos. La primera parte del presente trabajo está totalmente ligada a estos elementos generales.

Por su parte la información cuantitativa de la calidad considera que hay aspectos del comportamiento de una base de datos geográficos que se pueden medir, esta información es descrita por los “elementos de la calidad” conocidos también como “componentes de la calidad del dato geográfico”, para cada elemento se establecen subelementos los mismos que permiten concretar el aspecto de calidad al que se refieren los elementos; éstos son:

1. Elemento Compleción: Detalla los errores de los subelementos omisión y comisión en los elementos, atributos y relaciones; es decir, define la presencia de elementos que no deberían estar presentes o la ausencia de otros que si deberían estar en la base de datos.
2. Elemento Consistencia Lógica: Trata del apego a las reglas lógicas del modelo, de la estructura de datos, de los atributos y de las relaciones. Considera los subelementos: consistencia conceptual, de dominio, formato, topológica. Para el caso existe un modelo “lógico” cuyas reglas se incumplen cuando hay: valores fuera de dominio, registros que no se apegan al formato establecido, o relaciones no consideradas en el modelo o la topología.

3. Elemento Exactitud Temporal: Trata de la exactitud conseguida en la componente temporal de los datos. Los subelementos de la exactitud temporal son: exactitud de la medida del tiempo, consistencia temporal, validez temporal. Hace referencia a la corrección de las referencias temporales asignadas a un elemento (informe del error en la medida del tiempo asignado), los eventos o secuencias ordenadas, si se indican, y a la validez de los datos respecto al tiempo.
4. Elemento Exactitud Temática: Describe la exactitud de los atributos cuantitativos o no cuantitativos y de la corrección de las clasificaciones de los elementos y de sus relaciones. Sus subelementos son: corrección de la clasificación, corrección de los atributos cualitativos, exactitud de los atributos cuantitativos. Por tanto, se observan dos niveles distintos de corrección, el de las clases y el de los atributos, diferenciando si éstos últimos son cuantitativos o cualitativos.
5. Elemento Exactitud Posicional: Corresponde a la exactitud alcanzada en la componente posicional de los datos. Los subelementos son: exactitud externa o absoluta, interna o relativa, exactitud para datos en malla. La exactitud absoluta se define como proximidad entre los valores de coordenadas del conjunto de datos en estudio y los valores verdaderos o los considerados como tales. La exactitud relativa se refiere a la posición relativa de los objetos de un conjunto de datos y sus respectivas posiciones relativas verdaderas o calificadas como verdaderas. La exactitud posicional de datos en malla es la proximidad de los valores de posición de los datos en estructura de malla regular a los valores verdaderos o reconocidos como fidedignos.

Los subelementos mencionados se registran con un paquete de siete descriptores obligatorios que informan sobre las medidas, éstos son:

1. **Ámbito:** El ámbito puede definirse como una serie de conjuntos de datos, a la que pertenece el conjunto de datos, el propio conjunto de datos, o una a agrupación más pequeña de datos, localizados físicamente en el conjunto y que comparten ciertas características comunes. Si no es posible identificar un ámbito, éste debe ser el conjunto de datos. Como ámbito se pueden utilizar: tipos de objetos, temas, extensiones espaciales o temporales, entre otros. Se debe identificar al menos un ámbito de la calidad por cada subelemento aplicable.
2. **Medida:** Para cada ámbito de la calidad se debe proporcionar una medida de la calidad, la misma que debe detallar brevemente y denominar el tipo de prueba a aplicar a los datos especificados por el ámbito; también debe incluir los valores límite de los parámetros.
3. **Procedimiento de evaluación:** Se debe proporcionar un procedimiento de evaluación de la calidad para cada medida. Éste siempre debe describir, o hacer referencia a

documentación que especifique la metodología empleada para aplicar cada medida a los datos especificados por su ámbito, se debe incluir un informe de la metodología.

4. Resultado: Se debe proporcionar un resultado por cada medida. El resultado de la calidad puede ser un valor o conjunto de valores numéricos o el resultado de evaluar el valor, o conjunto de valores, obtenidos frente a un nivel de conformidad especificado como aceptable.
5. Tipo del valor: Se debe especificar un tipo, éste se corresponderá a algunas de las tipologías; por ejemplo: byte, entero, real, entre otros.
6. Unidad del valor: Si procede, se debe proporcionar una unidad del valor para cada resultado de la calidad de datos. Así, las unidades correspondientes a una incertidumbre posicional podrán ser: metros (m), decímetros (dm), centímetros (cm), milímetros (mm), etc.
7. Fecha: Se debe proporcionar una fecha para cada medida, lo cual se realizará en conformidad con los requisitos del modelo temporal de la Norma ISO 19108.

La norma ISO 19114 (procedimientos de evaluación de la calidad) tiene como objetivo establecer un marco para la evaluación de la calidad y para informar respecto a esta evaluación, para lo cual establece un proceso estándar que se debe cumplir tanto si se dispone de especificaciones para la evaluación de la calidad como si no se dispone de ellas. Según esta norma, la evaluación de la calidad consiste en la obtención de índices de la calidad de un producto. Los pasos propuestos para cumplir este proceso son:

1. Identificar un elemento, subelemento y ámbito aplicables: Según la Norma ISO 19113, se deben identificar el elemento, subelemento y ámbito de la calidad a evaluar; este proceso se para las diferentes pruebas que sean requeridas por las especificaciones del producto, o de acuerdo a los requisitos de usuario.
2. Identificar una medida de la calidad. Es necesario definir para cada prueba a desarrollar: una medida de la calidad, el tipo de valor y, si es aplicable, la unidad de medida.
3. Elegir y aplicar un método para la evaluación de la calidad. Este paso guarda relación directa con las normas ISO 2859 y 3159. Es necesario elegir un método adecuado para la evaluación de la calidad de las medidas identificadas.
4. Establecer el resultado de la calidad de los datos. Con la aplicación del método se obtiene un resultado cuantitativo, un valor o conjunto de valores, una unidad de medida y la fecha de la prueba.
5. Determinar la conformidad. El resultado de la conformidad (cumple / no cumple) es la comparación del resultado cuantitativo de la calidad con un nivel de conformidad para

la calidad predefinido en las especificaciones del producto o requerimientos del usuario.

La norma ISO 19138 tiene por objeto normalizar las medidas de la calidad a aplicar a la Información Geográfica, es decir, utilizar un conjunto de medidas que siendo conocidas, puedan ser de fácil y correcta interpretación por parte del productor y del usuario. La forma para normalizar las medidas es mediante la definición de un conjunto o selección de ellas y dotándolas de especificaciones que las definan de manera inequívoca, a estas especificaciones se las denomina en la norma “componentes técnicos” y son los siguientes:

1. Nombre de la medida. Si existe un nombre definido se lo debe usar, caso contrario se puede proponer uno apropiado.
2. Alias: Hace referencia a otro nombre o abreviatura reconocidos para la medida. Puede haber más de un alias.
3. Elemento de la calidad del dato: El establecido de acuerdo a la norma ISO 19113.
4. Subelemento de la calidad del dato: El establecido de acuerdo a la norma ISO 19113.
5. Medida básica: Se trata de la medida básica que es de aplicación en este caso y según son determinadas por esta propia norma.
6. Definición: Establece el concepto fundamental de la medida.
7. Descripción: Hace referencia a la medida y sus métodos de cálculo, incluyendo fórmulas, figuras, definición de los tipos de error en los que se basa, entre otros.
8. Parámetro: Es una variable auxiliar que utiliza la medida, se puede incluir nombre, definición, descripción, etc y puede ser necesario más de uno por ejemplo el parámetro de la tolerancia para los *overshoots* / *undershoots*.
9. Tipo de valor: Se trata de la tipología del dato que soportará el resultado, ejemplo: booleano, byte, entero, doble, etc.
10. Estructura: Es la estructura que se debe usar para informar sobre el resultado de la calidad, ésta puede ser un dato único, un vector, una matriz, entre otras.
11. Fuente: Referencia o cita la(s) fuente(s) bibliográfica sobre la medida de la calidad.
12. Ejemplo: Ejemplo(s) de aplicación de la medida y de su resultado.
13. Identificador: Valor entero que funciona como identificador único de la medida en un sistema de registro como ISO 19135.

De acuerdo a lo expuesto este trabajo evaluó la exactitud posicional externa sobre el ámbito del proyecto PUMA, por tanto se hace necesario evidenciar que el control posicional en cartografía es un proceso que evalúa la calidad de un producto o proceso a fin de determinar si cumple o no con los requisitos o especificaciones, lo que finalmente permite aceptar o

rechazar los productos desde una perspectiva posicional; el aspecto estadístico debe estar siempre presente en estos procesos para poder derivar en conclusiones válidas. Ariza, F.J.; Atkinson, A.D. (2006)

2.2.2.1. Definición de parámetros de aceptación

La escala de representación de la cartografía generalmente establece los criterios de exactitud de ésta. López-Cuervo (1996), en Mozas 2007 explica que “el límite de percepción del ojo humano es de 0.25 milímetros, con un error no superior a 0.2 milímetros. Por tanto el error acumulado que tiene un punto no debe superar este umbral trasladado a la escala del producto”. En consecuencia, “para una escala de módulo “M”, el umbral de exactitud posicional es igual a $0.2 \times M$, es decir, para cartografía a escala 1: 1000 el umbral de exactitud es igual a 20 cm. Estadísticamente, se debe tomar una tolerancia en función del grado de confianza con el que se desee tener los puntos del producto” Ariza, (2002a) en Mozas (2007); por su parte, Ruano (2008) propone que la precisión para una cartografía a escala 1: 1000 deberá ser 0.25 m, es decir el intervalo de la curva de nivel dividido para cuatro.

En contexto, considerando que el modelo digital generado para el proyecto PUMA se encuentra a una escala 1: 1000 debido a que se creó a partir de una nube de puntos con una densidad de un punto por m^2 , y que la precisión a priori de LIDAR es aproximadamente 15cm (Ibáñez, 2008; Skinner, 2009); acogiendo lo sugerido por Ruano, para el presente control de calidad el error máximo permisible será de 25 cm.

2.2.2.2. Comparación y análisis de datos

Para efectuar el análisis de datos se ha generado un archivo vectorial de tipo puntos a partir de las observaciones GPS seleccionadas para tal efecto, estos datos son considerados como verdaderos debido a la precisión con la que fueron levantados, basados en lo expuesto por la ASPRS, 2004 quienes señalan que los datos testigo (levantados en terreno) deben ser al menos tres veces más precisos que el conjunto de datos a evaluar; entonces, los puntos testigo cumplen este requisito pues el máximo error vertical reportado para los puntos elegidos según los informes de procesamiento de las líneas base del GPS, es de 0.043 m (Anexo 1). El siguiente paso consistió en extraer los datos de elevación del MDT generado a partir de la nube de puntos LIDAR, esta información se agrega a los atributos de los puntos de GPS generados en el paso anterior.

Para realizar el análisis de los datos se estudiaron varias soluciones propuestas por distintos autores, Atkinson, García y Ariza (s/f); investigan cinco test para el control de calidad posicional en cartografía, éstos son:

1. El National Map Accuracy Standard (NMAS) que es el test empleado por el USGS desde 1947,

2. El Test EMAS / ASPRS Standar (Enineering Map Accuracy Standard/ American Society of Photogrammetry and Remote Sensing). Este test proporciona la exactitud de mapas topográficos a gran escala. Fue desarrollado por la American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) junto con la American Society of Civil Engineers y el American Congress on Surveying and Mapping.
3. Test de la Fórmula de Koppe. emplean coeficientes derivados empíricamente para estudiar los efectos de las pendientes del terreno sobre el error medio en la componente vertical, según las relaciones establecidas por Koppe. : se emplea como alternativa al test NMAS
4. Test del USGS de categorías de exactitud de MDT propios de la ingeniería cartográfica empleado por el USGS para definir la exactitud de sus modelos digitales del terreno (MDT). el test está basado en el empleo de umbrales para el error máximo y el error medio cuadrático (RMSE).
5. Test NSSDA del Federal Geographic Data Committee (FGDC) con la obtención del RMSE para XY por un lado, y para Z por otro, calcula el error real de la muestra analizada en función de un determinado nivel de confianza impuesto por el usuario (generalmente el 95 %). Este test nos muestra un índice de calidad de la cartografía en unidades reales sobre el terreno. Este test viene a sustituir al NMAS y al ASPRS.

Por otra parte, a nivel nacional Ruano (2008) sugiere como norma adaptarse a la metodología de la *National Standard for Spatial Data Accuracy* - NSSDA (1998), además la norma ISO 19138 presenta al RMSE entre una de sus medidas propuestas.

Por lo expuesto, para este trabajo se acogió la propuesta de Ruano con lo que se aplicó la metodología NSSDA con un coeficiente de exactitud posicional a un 95% de confianza. Considerando los parámetros de aceptación descritos en el numeral 2.2.2.1, el paso siguiente consistió en determinar si la cartografía ha alcanzado el estándar de exactitud vertical predefinido.

3. Resultados y Discusión

Como resultado de la primera parte de este trabajo, se ha comparado las alturas de los puntos de control de campo frente a las alturas del MDT de los 38 puntos elegidos para el área total de restitución del proyecto, mediante lo cual se ha calculado el error medio cuadrático, los resultados se observan en la tabla que sigue.

Tabla 8. Análisis de datos en estudio versus observados

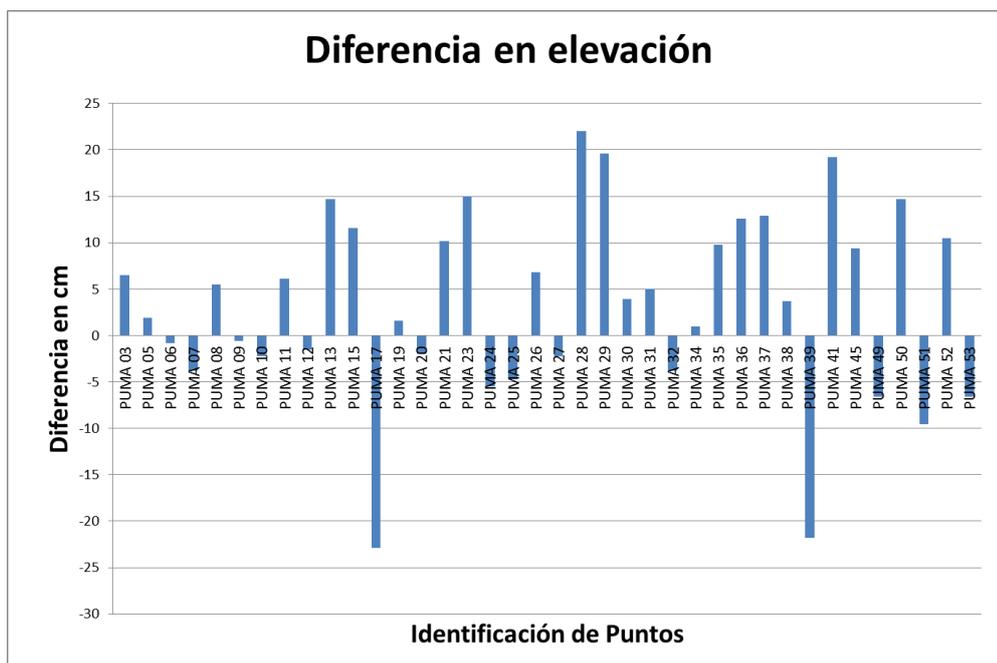
Código	Elevación GPS m s.n.m.	Elevación MDT m s.n.m.	Diferencia (m)	Diferencia (cm)	Diferencia ² (cm)
PUMA 03	3046,118	3046,183	0,065000	6,5000	42,250
PUMA 05	2819,314	2819,333	0,019000	1,9000	3,610
PUMA 06	2729,906	2729,898	-0,008000	-0,8000	0,640
PUMA 07	2729,730	2729,692	-0,038000	-3,8000	14,440
PUMA 08	3000,171	3000,226	0,055000	5,5000	30,250
PUMA 09	2795,450	2795,444	-0,006000	-0,6000	0,360
PUMA 10	3004,353	3004,331	-0,022000	-2,2000	4,840
PUMA 11	2928,775	2928,836	0,061000	6,1000	37,210
PUMA 12	2885,933	2885,918	-0,015000	-1,5000	2,250
PUMA 13	3042,276	3042,423	0,147000	14,7000	216,090
PUMA 15	3337,940	3338,056	0,115908	11,5908	134,347
PUMA 17	3292,733	3292,962	-0,228914	-22,8914	524,016
PUMA 19	3013,746	3013,762	0,015963	1,5963	2,548
PUMA 20	3013,706	3013,686	-0,019965	-1,9965	3,986
PUMA 21	2941,392	2941,494	0,101896	10,1896	103,828
PUMA 23	3025,671	3025,821	0,150045	15,0045	225,135
PUMA 24	3040,695	3040,640	-0,055107	-5,5107	30,368
PUMA 25	2968,647	2968,600	-0,046902	-4,6902	21,998
PUMA 26	2815,506	2815,574	0,067975	6,7975	46,206
PUMA 27	2424,517	2424,495	-0,021883	-2,1883	4,789
PUMA 28	2860,746	2860,966	0,220064	22,0064	484,282

PUMA 29	2978,386	2978,582	0,196031	19,6031	384,282
PUMA 30	2940,483	2940,522	0,039000	3,9000	15,210
PUMA 31	3037,323	3037,373	0,050000	5,0000	25,000
PUMA 32	2823,262	2823,224	-0,038000	-3,8000	14,440
PUMA 34	3014,539	3014,549	0,010000	1,0000	1,000
PUMA 35	3021,249	3021,347	0,098000	9,8000	96,040
PUMA 36	3019,901	3020,027	0,126000	12,6000	158,760
PUMA 37	2859,851	2859,980	0,129000	12,9000	166,410
PUMA 38	3044,995	3045,032	0,037000	3,7000	13,690
PUMA 39	3014,467	3014,249	-0,218000	-21,8000	475,240
PUMA 41	2931,653	2931,845	0,192000	19,2000	368,640
PUMA 45	2860,417	2860,511	0,094000	9,4000	88,360
PUMA 49	3012,670	3012,604	-0,065996	-6,5996	43,555
PUMA 50	2924,183	2924,330	0,147078	14,7078	216,319
PUMA 51	2406,332	2406,236	-0,095916	-9,5916	91,999
PUMA 52	2943,146	2943,251	0,104977	10,4977	110,202
PUMA 53	3010,317	3010,251	-0,066000	-6,6000	43,560
Suma					4246,148
Promedio					111,741
RMSE					10,571
NSSDA					20,719

De acuerdo a los resultados obtenidos, el RMSE es menor a 25 cm por tanto la cartografía ha alcanzado el estándar de exactitud vertical predefinido.

Por otra parte se ha realizado un análisis de sistematismos y distribución de los puntos de control de acuerdo a lo propuesto por Ruano (2008), mediante la obtención de un gráfico de barras se confirma si en las observaciones realizadas existen o no sistematismos, y en caso de que existan, que tan notorios son. En este trabajo se aprecian los vectores de desplazamiento entre los puntos de control y los datos del MDT, en la figura 9 se evidencia que no existen patrones de tendencia de los vectores, pues se distinguen valores positivos y negativos, expresando sistematismos muy poco pronunciados.

Figura 9. Análisis de sistematismos



Además, en las tablas que siguen; se presentan los resultados del análisis para cada una de las sub áreas de interés, realizados en la segunda parte de este trabajo.

Tabla 9. Análisis de datos en estudio versus observados, para el subárea uno (suelo descubierto en pendiente menor a 25%)

Código	Elevación GPS m s.n.m.	Elevación MDT m s.n.m.	Diferencia (m)	Diferencia (cm)	Diferencia ² (cm)
PUMA 05	2819,314	2819,333	0,019000	1,9000	3,610
PUMA 27	2424,517	2424,495	-0,021883	-2,1883	4,789
PUMA 29	2978,386	2978,582	0,196031	19,6031	384,282
PUMA 51	2406,332	2406,236	-0,095916	-9,5916	91,999
				Suma	484,679
				Promedio	121,170
				RMSE	11,008
				NSSDA	21,575

Tabla 10. Análisis de datos en estudio versus observados para el subárea dos (suelo descubierto en pendiente mayor a 25%)

Código	Elevación GPS m s.n.m.	Elevación MDT m s.n.m.	Diferencia (m)	Diferencia (cm)	Diferencia² (cm)
PUMA 06	2729,906	2729,898	-0,008000	-0,8000	0,640
PUMA 10	3004,353	3004,331	-0,022000	-2,2000	4,840
PUMA 25	2968,647	2968,600	-0,046902	-4,6902	21,998
PUMA 39	3014,467	3014,249	-0,218000	-21,8000	475,240
				Suma	502,718
				Promedio	125,679
				RMSE	11,211
				NSSDA	21,973

Tabla 11. Análisis de datos en estudio versus observados para el subárea tres (vegetación herbácea en pendiente menor a 25%)

Código	Elevación GPS m s.n.m.	Elevación MDT m s.n.m.	Diferencia (m)	Diferencia (cm)	Diferencia² (cm)
PUMA 08	3000,171	3000,226	0,055000	5,5000	30,250
PUMA 09	2795,450	2795,444	-0,006000	-0,6000	0,360
PUMA 21	2941,392	2941,494	0,101896	10,1896	103,828
PUMA 38	3044,995	3045,032	0,037000	3,7000	13,690
				Suma	148,128
				Promedio	37,032
				RMSE	6,085
				NSSDA	11,927

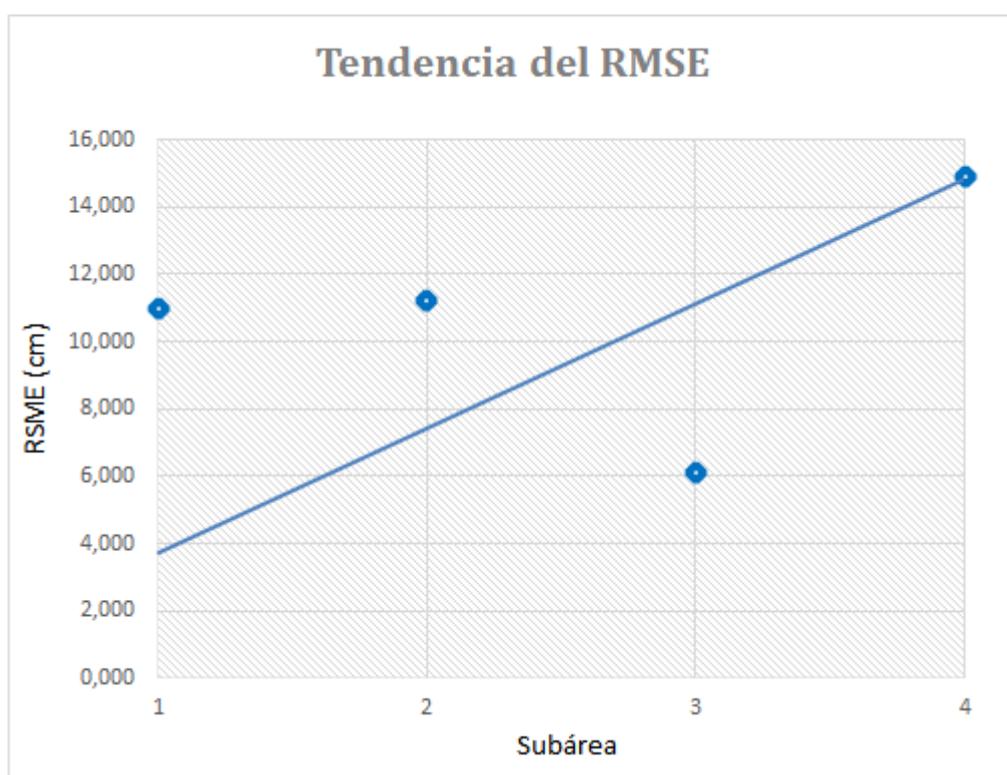
Tabla 12. Análisis de datos en estudio versus observados para el subárea cuatro (vegetación herbácea en pendiente mayor a 25%)

Código	Elevación GPS m s.n.m.	Elevación MDT m s.n.m.	Diferencia (m)	Diferencia (cm)	Diferencia² (cm)
PUMA 07	2729,730	2729,692	-0,038000	-3,8000	14,440
PUMA 13	3042,276	3042,423	0,147000	14,7000	216,090
PUMA 15	3337,940	3338,056	0,115908	11,5908	134,347
PUMA 17	3292,733	3292,962	-0,228914	-22,8914	524,016
				Suma	888,893
				Promedio	222,223
				RMSE	14,907
				NSSDA	29,218

De acuerdo a estos resultados se aprecia que cuando el territorio en estudio presenta pendientes débiles a irregulares (de 0 a 25%) y no existe cobertura herbácea, la precisión es mayor, conforme se presentan pendientes fuertes a abruptas (mayores a 25%) la precisión disminuye, en presencia de vegetación herbácea sobre pendientes débiles a irregulares el RMSE disminuye pero nuevamente se incrementa cuando la vegetación herbácea se encuentra en pendientes mayores a 25%; en todos los casos la cartografía ha alcanzado el estándar de exactitud vertical predefinido.

Según lo expuesto por FEMA, 2003; NDEP 2004; Skinner, 2009; ASPRS, 2004; en presencia de vegetación y pendientes fuertes, la precisión de los datos LIDAR disminuye, lo cual se puede observar en la figura 10, sin embargo en este trabajo ha resultado que en la subárea tres (vegetación herbácea en pendiente menor a 25%), la precisión de los datos es mayor que la dos y la uno; esto podría ser debido a la variabilidad de los datos y es inherente a un proceso de muestreo.

Figura 10. Análisis de Tendencia del RMSE



4. Conclusiones

Los objetivos del presente trabajo se han cumplido, pues se han recopilado los datos y se ha realizado un análisis sobre ellos, éstos cumplen con los requisitos de calidad sugeridos por organizaciones relacionadas con el manejo de cartografía como el APRS, USGS, IPGH, entre otros; así mismo cumplen con los parámetros propuestos por el IGM (quien también asume la propuesta del NSSDA) según el análisis realizado en la primera parte de este trabajo.

La precisión de los datos LIDAR se ve directamente influenciada por la cobertura de suelo y la pendiente del terreno por tanto son factores que se deben considerar al momento de la planificación del vuelo.

Los entes rectores en el manejo de la cartografía a nivel nacional deben normar de forma definitiva las metodologías de control de calidad cartográfico, ya sea asumiendo las propuestas emitidas por organismos internacionales, emitiendo unas propias o una combinación de las dos, ya que en el territorio ecuatoriano poseemos características propias que deben ser tomadas en cuenta.

Es imprescindible que se determine la calidad de la información geográfica y se la dé a conocer al usuario mediante los metadatos o reportes pertinentes, de esta manera se da un valor agregado a la información y se garantiza la integridad de la misma.

5. Referencia Bibliográficas

- American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS (2004). *ASPRS guidelines, Vertical accuracy reporting for LiDAR data, Version 1.0.*
- Arellano Sánchez, Javier; Betts Gómez, Sandra; Ramírez Rodríguez, Olivia. *Gestión de datos LIDAR a través de SIG y base de datos geoespacial.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Ariza López, Francisco Javier y Atkinson Gordo, Alan David James. (2006). *Informe al CT-148 de AENOR, Metodologías de control posicional: visión general y análisis crítico.*
- Ariza López, F.J.; Rodríguez Pascual, A.F. (2008). *Introducción a la normalización en información geográfica: la familia ISO 19100.* España.
- Atkinson Gordo, Alan David James; García Balboa, José Luis; Ariza López, Francisco Javier. *Los diferentes test para el control de calidad posicional en cartografía.* Departamento de Expresión Gráfica de la Universidad de Extremadura.
- Estornell, J. (2011). *Análisis de los factores que influyen en la precisión de un MDE y estimación de parámetros forestales en zonas arbustivas de montaña mediante datos LIDAR.* Universidad Politécnica de Valencia.
- Federal Emergency Management Agency - FEMA (2003). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners. Appendix A: Guidance for Aerial Mapping and Surveying.* Federal Emergency Management Agency.
- García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009). *Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo.* *GeoFocus (Artículos), nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157*
- Ibáñez, E. M. (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 Cataluña.
- Instituto Geográfico Militar (IGM). (2006). *Primer Borrador de Especificaciones Técnicas Generales para la Realización de Cartografía Topográfica a Cualquier Escala.* 29pp. Quito Ecuador.
- Kornus W. y Ruiz A. (2003). *Strip Adjustment of LIDAR Data.* Dresden Saxony Alemania
- MAG, PRONAREG – ORSTOM (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Programa Nacional de Regionalización Agraria - Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre –

- Mer). (1980). *Mapa de suelos de la sierra*. 1:50.000. Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador.
- Mesas Carrascosa F. J. (2012). *Control de calidad en procesos fotogramétricos*. En: *Experto Universitario en Evaluación de la Información Geográfica (4ª Edición)*. Máster Universitario en Evaluación y Gestión de la Calidad de la Información Geográfica (1ª Edición). Universidad de Jaén. Jaén, España.
- Mozas Calvache, Antonio Tomás. (2007). Tesis Doctoral: *Control de Calidad Posicional en Cartografía por Elementos Lineales*. Jaen España.
- National Digital Elevation Program – NDEP (2004). *Guidelines for Digital Elevation Data Version 1.0*
- Pfeifer, N., Oude Elberink, S. y Filin, S. (2005). *Automatic tie elements detection for laser scanner strip adjustment*, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Proceedings of Laserscanning*, 36, pp. 174-179.
- Ruano Nieto, Miguel E. (2008). *Primer Borrador Control de la Exactitud Posicional en Cartografía*. 16 pp. Quito Ecuador
- Ruiz, A y Kornus, W. (2003). *Experiencias y aplicaciones del LIDAR*. V Semana Geomática. Barcelona España.
- San José, A., (2011). *Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10*. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M.E.J., Black, A., Hoffmann L., Pfister, L. (2008). *Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63, p 283–296.
- Sevilla, M. J. (1991). *Criterios de Precisión Cartográfica*, Catastro, N° 8, p 12 - 20.
- Skinner, Kenneth D; (United States Geological Survey - USGS). (2009) *Evaluation of LiDAR - Acquired Bathymetric and Topographic Data Accuracy in Various Hydrogeomorphic Settings in the Lower Boise River, Southwestern Idaho, 2007*. Virginia EEUU.
- Wehr, A. y Lohr, U. (1999). *Airborne laser scanning-an introduction and overview*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, pp. 68-82.

6. Anexos

Anexo 1. Resumen del reporte de procesamiento de líneas base.

Código	Coordenada "x"	Coordenada "y"	Elevación GPS	Precisión Horizontal (m)	Precisión Vertical (m)	Tiempo de Observación (Minutos)	Satélites Disponibles (GPS)	Satélites Disponibles (GLONNAS)
PUMA 01	746634,175	9700317,119	3052,059	0,004	0,006	10	9	5
PUMA 02	746664,371	9700321,256	3043,357	0,004	0,007	5	10	5
PUMA 03	744880,109	9692682,194	3046,118	0,007	0,017	5	10	5
PUMA 04	747725,210	9696994,028	2404,716	0,012	0,019	5	8	3
PUMA 05	742384,537	9697365,368	2819,314	0,006	0,009	20	11	6
PUMA 06	746031,343	9686151,883	2729,906	0,013	0,018	5	10	7
PUMA 07	746045,212	9686161,503	2729,730	0,013	0,018	5	9	7
PUMA 08	745090,139	9691430,202	3000,171	0,009	0,019	5	11	6
PUMA 09	745129,325	9687143,326	2795,450	0,012	0,018	5	9	7
PUMA 10	744702,858	9698421,021	3004,353	0,004	0,011	5	9	6
PUMA 11	744480,095	9696944,784	2928,775	0,004	0,006	15	11	7
PUMA 12	743310,260	9696551,953	2885,933	0,006	0,008	10	12	7
PUMA 13	746699,303	9700340,034	3042,276	0,007	0,010	40	10	8
PUMA 14	749844,434	9715988,377	3314,530	0,011	0,016	10	10	7
PUMA 15	749764,302	9716016,581	3337,940	0,021	0,030	10	10	7
PUMA 16	749752,269	9716058,430	3327,171	0,045	0,053	15	11	6
PUMA 17	747916,761	9711216,978	3292,733	0,011	0,017	10	9	6
PUMA 18	749749,339	9716127,163	3326,434	0,027	0,030	5	11	7
PUMA 19	744771,868	9698423,203	3013,746	0,004	0,005	9	10	8
PUMA 20	744771,772	9698416,085	3013,706	0,002	0,004	20	9	7
PUMA 21	744704,971	9697617,899	2941,392	0,005	0,010	10	11	5
PUMA 22	744403,082	9696917,505	2925,318	0,008	0,012	10	10	7
PUMA 23	745043,534	9695346,279	3025,671	0,003	0,005	10	10	7
PUMA 24	744898,644	9692686,167	3040,695	0,007	0,017	10	10	6
PUMA 25	745111,633	9691565,573	2968,647	0,009	0,020	5	11	6
PUMA 26	746222,906	9692950,409	2815,506	0,008	0,013	5	11	6
PUMA 27	747972,629	9692006,805	2424,517	0,019	0,023	5	12	7
PUMA 28	740578,997	9689048,221	2860,746	0,004	0,009	5	11	6
PUMA 29	741786,993	9687954,312	2978,386	0,007	0,010	5	12	6
PUMA 30	744717,045	9697595,430	2940,483	0,004	0,008	15	11	5
PUMA 31	744972,055	9692544,776	3037,323	0,007	0,017	5	10	5
PUMA 32	746168,411	9692982,913	2823,262	0,007	0,011	7	12	6
PUMA 33	747973,169	9691976,245	2426,544	0,011	0,015	5	12	8
PUMA 34	744686,100	9698453,710	3014,539	0,004	0,006	5	10	7
PUMA 35	745033,641	9695393,381	3021,249	0,015	0,020	5	10	6
PUMA 36	745027,833	9695452,107	3019,901	0,004	0,006	5	9	7
PUMA 37	741118,704	9688022,886	2859,851	0,007	0,010	5	9	6
PUMA 38	744979,575	9695384,486	3044,995	0,005	0,005	40	10	7
PUMA 39	744686,385	9698455,608	3014,467	0,007	0,009	51	11	7
PUMA 40	744689,178	9698452,497	3014,489	0,003	0,004	10	9	8
PUMA 41	741579,238	9688327,520	2931,653	0,003	0,005	15	12	6
PUMA 42	745042,555	9695390,300	3020,368	0,016	0,035	5	8	5
PUMA 43	746609,920	9700267,297	3060,602	0,004	0,007	11	10	6
PUMA 44	747932,981	9711206,930	3289,330	0,010	0,023	14	10	5
PUMA 45	740594,285	9689045,010	2860,417	0,005	0,023	62	11	9
PUMA 46	749749,394	9716127,218	3326,558	0,041	0,057	15	11	8
PUMA 47	749724,762	9716125,178	3333,181	0,036	0,075	15	10	7
PUMA 48	744771,769	9698416,076	3013,693	0,003	0,005	10	9	8
PUMA 49	744755,143	9698432,959	3012,670	0,003	0,006	10	10	7
PUMA 50	744398,682	9696930,677	2924,183	0,005	0,008	9	10	7
PUMA 51	747718,906	9696973,176	2406,332	0,033	0,043	5	6	0
PUMA 52	741654,043	9688279,855	2943,146	0,009	0,014	5	12	6
PUMA 53	744658,654	9698409,669	3010,317	0,003	0,008	5	8	6

Anexo 2. Pruebas de Normalidad

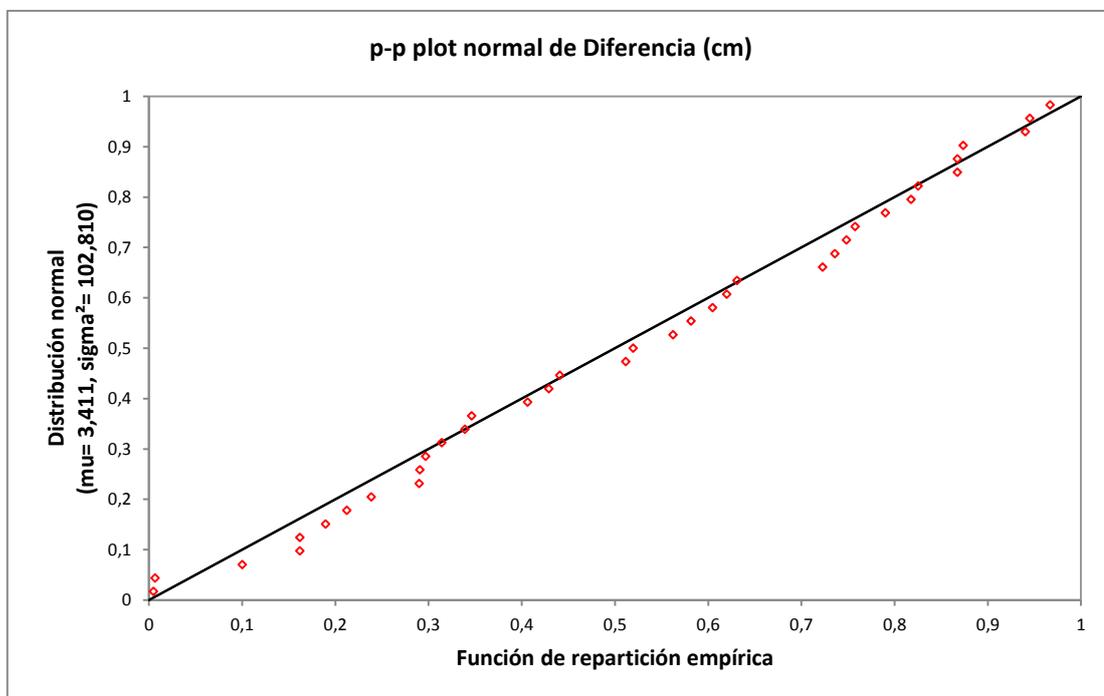
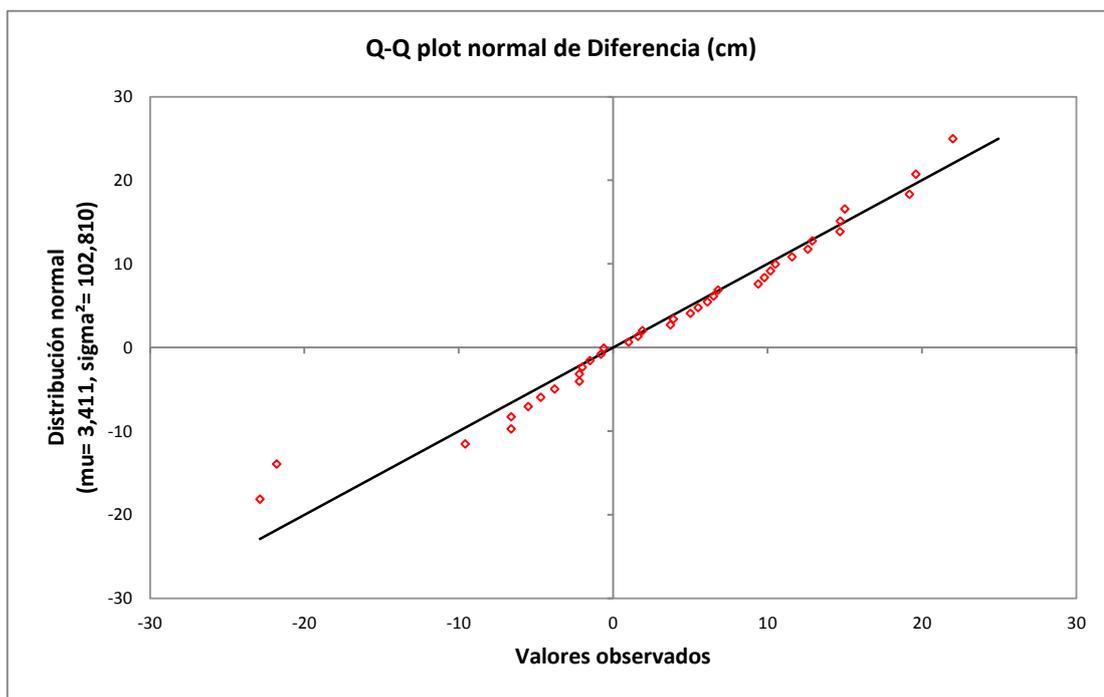
Nivel de significación: 0,05

Resultados para la muestra Diferencia (cm):

Estadísticas descriptivas:

	Diferencia (cm)
Núm. de valores utilizados	38
Núm. de valores ignorados	0
Mínimo	-22,891
Primer cuartil	-2,200
Mediana	3,800
Tercer cuartil	10,498
Máximo	22,006
Rango	44,898
Media	3,411
Curtosis (Pearson)	0,187
Asimetría (Pearson)	-0,473
CV (desviación típica/media)	2,972
Varianza estimada	102,810
Desviación típica estimada	10,140
Desviación típica de la media	1,645
Límite inf. IC de la media	0,078
Límite sup. IC de la media	6,744

Nota: la desviación típica y el intervalo de confianza de la media son válidos únicamente si la muestra resulta de un muestreo aleatorio simple



Prueba de Shapiro-Wilk:

W (valor observado)	0,966
p-value unilateral	0,292
Alpha	0,05

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0,050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad no es significativa.

Prueba de Jarque-Bera:

JB (valor observado)	2,217
JB (valor crítico)	5,991
GDL	2
p-value unilateral	0,330
Alpha	0,05

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0,050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad no es significativa.

Prueba de Anderson-Darling:

A ² de Anderson-Darling	0,309
p-value unilateral	0,542
Alpha	0,05

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0,050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad no es significativa.

Prueba de Lilliefors:

D	0,083
D (estandarizado)	0,510
p-value	0,735
Alpha	0,05

Conclusión:

Al umbral de significación $\text{Alfa}=0,050$ no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad no es significativa.