



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA**

CALIBRACIÓN LIDAR

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A:

JAVIER ARELLANO SÁNCHEZ

T U T O R:

DR. VÍCTOR MANUEL VELASCO HERRERA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE DE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicado a mis familiares, amigas, amigos, compañeras y compañeros de trabajo.

En gratitud y bendecido por la vida.

Agradecimientos

Al Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera y a los miembros del comité sinodal, los Doctores Michel Grutter de la Mora, Jorge Prado Molina, Román Álvarez Béjar, Raúl Aguirre Gómez, por sus valiosos comentarios para mejorar la estructura y contenido de la tesis.

A las autoridades del INEGI que me apoyaron para poder cursar los estudios de maestría. A mis compañeros Maestro José Víctor Chávez García, Ing. Luis Guerrero Chávez, Ing. José Valentín Tenorio Zamarripa, Lic. Sandra Yazmín Betts Gómez, Ing. María Esther Rentería García, Maestro Francisco A. Hansen Albites, Celia Juliana María Castruita Vargas, quienes me brindaron asesoría y apoyo técnico permanente sobre la tecnología LiDAR y temas afines.

A todos los compañeros de la Subdirección de Control de Operaciones Geodésicas y de la Dirección de Modelado Topográfico y Operaciones Aéreas en la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del INEGI, que de una u otra forma participaron en la implementación de la tecnología LiDAR en el INEGI.

A mi familia y amigos, por todo el apoyo y comprensión durante el tiempo dedicado a la maestría y al trabajo de tesis.

Contenido

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
DOMINIO DE LA TESIS.....	1
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
<i>Problema a resolver</i>	2
<i>Objetivo de la investigación</i>	3
<i>Justificación de la investigación</i>	3
<i>Hipótesis de la investigación</i>	3
<i>Plan de trabajo</i>	3
<i>Creación del prototipo</i>	4
<i>Método de desarrollo</i>	5
<i>Diseño del experimento</i>	5
<i>Productos</i>	5
APORTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO (TESIS).....	6
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	7
LA PERCEPCIÓN REMOTA	7
<i>Sensores pasivos</i>	7
<i>Sensores activos</i>	8
<i>Proceso de Percepción remota</i>	8
<i>Espectro electromagnético</i>	9
<i>Características de la radiación electromagnética</i>	10
LASER	11
<i>Componentes del láser</i>	12
<i>Aplicaciones</i>	13
LA TECNOLOGÍA LIDAR.....	13
<i>Comportamiento del rayo láser</i>	14
<i>Características de los datos LiDAR</i>	15
<i>GPS/IMU</i>	18
FUENTES DE ERROR.....	23
<i>Errores Aleatorios en LiDAR</i>	23
<i>Errores sistemáticos en LiDAR</i>	24
CALIBRACIONES.....	25
ERRORES EN LA MEDICIÓN DE LA DISTANCIA.....	25
CALIBRACIÓN EN LABORATORIO.....	26
ALINEACIÓN DE LABORATORIO DE IMU/ESCÁNER.....	26
<i>Alineación de los subsistemas LiDAR</i>	26
<i>Desalineaciones de la mira entre el INS y el escáner láser</i>	28
ERRORES DE DESALINEACIÓN.....	29

<i>Alabeo (roll)</i>	29
<i>Cabeceo (pitch)</i>	30
<i>Pendiente por Cabeceo</i>	31
<i>Deriva (heading)</i>	31
<i>Torsión</i>	32
<i>Error de distancia</i>	32
<i>Error de intensidad</i>	33
<i>Error en escala</i>	33
MÉTODOS DE CALIBRACIÓN.....	33
CAPÍTULO 3 LIDAR EN EL INEGI	41
LÍNEA DE PRODUCCIÓN LIDAR.....	43
<i>Productos</i>	47
NUBE DE PUNTOS LIDAR AJUSTADA AL TERRENO.....	47
DATOS LÁSER NATIVOS.....	49
IMÁGENES GENERADAS CON NIVELES DE INTENSIDAD.....	49
MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (MDE).....	49
DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS LÁSER COLECTADOS.....	50
CALIBRACIÓN DE DATOS LIDAR EN EL INEGI.....	52
<i>Antecedentes</i>	52
<i>Análisis de desplazamientos</i>	54
<i>Resultado</i>	55
UBICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN LIDAR.....	56
CAPÍTULO 4 MODELO EXPERIMENTAL	58
DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	58
FUNDAMENTO.....	60
METODOLOGÍA APLICADA.....	61
<i>Planeación</i>	61
<i>Ejecución para determinación de valores angulares y entrega de resultados</i>	61
<i>Validación</i>	61
DESARROLLO.....	62
<i>Apoyo geodésico simultáneo a vuelo</i>	64
<i>Puntos de control terrestre</i>	64
<i>Validación del vuelo y de la calidad de los datos</i>	65
PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN.....	66
<i>Alabeo</i>	66
<i>Cabeceo</i>	68
<i>Pendiente por Cabeceo</i>	70
<i>Deriva</i>	72
<i>Torsión</i>	73
<i>Distancia</i>	74
<i>Generación del archivo de registro</i>	76

<i>Verificación de la calibración con datos del vuelo a 5 800 m de altura</i>	77
VERIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO.....	79
<i>Requerimiento de vuelo para calibración</i>	79
<i>Actividades realizadas para la validación del vuelo</i>	81
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	82
<i>Alabeo</i>	82
<i>Cabeceo</i>	84
<i>Pendiente por Cabeceo</i>	86
<i>Deriva</i>	87
RESULTADOS.....	90
VERIFICACIÓN DE LOS VALORES DE PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN.....	90
CONCLUSIONES DEL PROCEDIMIENTO APLICADO	91
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	94
INTRODUCCIÓN.....	94
APORTACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	95
LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	96
PRODUCTO DE DIVULGACIÓN.....	98
COMENTARIOS FINALES.....	98
APÉNDICE A	99
GLOSARIO	99
REFERENCIAS.....	111

Índice de Imágenes

IMAGEN 2.1. ELEMENTOS BÁSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA	9
IMAGEN 2.2. LONGITUDES DE ONDA Y FRECUENCIAS	9
IMAGEN 2.3. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	10
IMAGEN 2.4. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	11
IMAGEN 2.5. COLIMADOR LÁSER	13
IMAGEN 2.6. COMPORTAMIENTO DEL LIDAR EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUPERFICIE EN CONTACTO.....	14
IMAGEN 2.7. COMPONENTES DEL SISTEMA LIDAR	16
IMAGEN 2.8. DESALINEACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS.....	27
IMAGEN 2.9. DESALINEACIÓN POR ALABEO (VISTA DE PERFIL LÍNEAS VOLADAS EN SENTIDO INVERSO)	30
IMAGEN 2.10. DESALINEACIÓN POR CABECEO EN UN PERFIL LÍNEAS VOLADAS EN SENTIDO INVERSO	30
IMAGEN 2.11. PENDIENTE POR CABECEO.....	31
IMAGEN 2.12. PRESENCIA DEL ERROR POR DERIVA	32
IMAGEN 2.13. EFECTO POR TORSIÓN	32
IMAGEN 2.14. ERROR POR DISTANCIA	33
IMAGEN 3.1 MODELOS DE SENSORES LIDAR EN EL INEGI.....	41
IMAGEN 3.2. BLOQUES DE PRODUCCIÓN LIDAR EN AMBIENTE SIG	42
IMAGEN 3.3. DETALLE DE CARACTERIZACIÓN DE UN PROYECTO LIDAR	42
IMAGEN 3.4. CRONOGRAMA GENERAL DE UN PROYECTO LIDAR	43

IMAGEN 3.5. MODELO DE PRODUCCIÓN CON ÉNFASIS EN ACTIVIDADES GEODÉSICAS	44
IMAGEN 3.6. DELIMITACIÓN DE PROYECTO POR BLOQUES CARTOGRÁFICOS	46
IMAGEN 3.7. CONTROL DE PRODUCCIÓN POR LÍNEA DE BARRIDO.....	46
IMAGEN 3.8. AJUSTE DE LÍNEAS A CAMPOS DE CONTROL.....	47
IMAGEN 3.9. DETALLE DE METADATO DE NUBE DE PUNTOS	47
IMAGEN 3.10. SUPERFICIE DE PRODUCCIÓN 2004-2010	48
IMAGEN 3.11. SUPERFICIE DE PRODUCCIÓN POR MODELO DE SENSOR	48
IMAGEN 3.12. IMAGEN DE INTENSIDAD (AEROPUERTO TOLUCA, EDOMEX).....	49
IMAGEN 3.13. REPRESENTACIÓN DE MODELO DE SUPERFICIE Y DEL TERRENO DEL VOLCÁN DE FUEGO, COLIMA.....	50
IMAGEN 3.14. DIFERENCIAS ALTIMÉTRICAS ENTRE PUNTOS TRASLAPADOS.....	53
IMAGEN 3.15. DIFERENCIAS ALTIMÉTRICAS ENTRE PUNTOS EN EL LADO DERECHO DEL TRASLAPO.	53
IMAGEN 3.16. ESCALONAMIENTO EN EL MDE POR DESPLAZAMIENTO DE PUNTOS EN ÁREAS DE TRASLAPO.	54
IMAGEN 3.17. DISEÑO GEOMÉTRICO DEL VUELO.....	54
IMAGEN 3.18. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DESPUÉS Y ANTES DE AFINACIÓN	56
IMAGEN 4.1. DOMO EN ZONA DE CALIBRACIÓN	59
IMAGEN 4.2. DISEÑO GEOMÉTRICO DEL VUELO.....	63
IMAGEN 4.3. LÍNEAS DE VUELO PARA COMPROBACIÓN DE CALIBRACIÓN	63
IMAGEN 4.4. PANTALLA PRINCIPAL DE SOFTWARE ALSPP; CORRECCIÓN DE PARTIDA POR ALABEO	66
IMAGEN 4.5. SELECCIÓN DE ÁREA Y DETERMINACIÓN DE LA MAGNITUD DEL ERROR EN ALABEO.....	67
IMAGEN 4.6. CORRECCIÓN DE LA DESALINEACIÓN POR ALABEO EN LA ORILLA OESTE DE LA LÍNEA DE BARRIDO	68
IMAGEN 4.7. CORRECCIÓN DE LA DESALINEACIÓN POR ALABEO EN LA ORILLA ESTE DE LA LÍNEA DE BARRIDO	68
IMAGEN 4.8. VALOR DE CORRECCIÓN DE PARTIDA POR CABECEO	68
IMAGEN 4.9. LÍNEA PARALELA A LOS EJES DE VUELO CON SELECCIÓN DE ÁREA PARA DETERMINAR MAGNITUD DEL ERROR.....	69
IMAGEN 4.10. CORRECCIÓN DE LA DESALINEACIÓN POR CABECEO	70
IMAGEN 4.11. FIJACIÓN DE ERROR EN 0 POR PENDIENTE DE CABECEO	70
IMAGEN 4.12. SELECCIÓN DE UN ÁREA CON PENDIENTE REGULAR.....	71
IMAGEN 4.13. DETERMINACIÓN DE LA MAGNITUD DEL ERROR	71
IMAGEN 4.14. PANTALLA PRINCIPAL DE ALSPP; CORRECCIÓN DE PARTIDA POR DERIVA	72
IMAGEN 4.15. SELECCIÓN EN MDS PARA DETERMINACIÓN DEL ERROR POR DERIVA	72
IMAGEN 4.16. MAGNITUD DE LA DESALINEACIÓN POR DERIVA.....	73
IMAGEN 4.17. INTRODUCCIÓN DEL VALOR DE CORRECCIÓN ESTIMADO PARA DERIVA	73
IMAGEN 4.18. REDUCCIÓN DE LA DESALINEACIÓN POR DERIVA	73
IMAGEN 4.19. OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE CORRECCIÓN POR DISTANCIA	75
IMAGEN 4.20. DESPLIEGUE DE NUBE DE PUNTOS DE LÍNEAS COLECTADAS.....	77
IMAGEN 4.21. CONTROL DE PROYECTO MEDIANTE ÍNDICES POR LÍNEA EN SIG	78
IMAGEN 4.22. COMPARACIÓN DE MDS ANTES Y DESPUÉS DE CALIBRACIÓN	78
IMAGEN 4.23. DISEÑO GEOMÉTRICO DEL VUELO PARA CALIBRACIÓN.....	79
IMAGEN 4.24. COBERTURA DE LÍNEAS (SESIÓN B).....	81
IMAGEN 4.25. DESALINEACIÓN OBSERVADA SOBRE EL EJE X, ENTRE LA IMU Y EL LÁSER	82
IMAGEN 4.26. MODELO PARA DETERMINAR MAGNITUD DE ERROR POR ALABEO.....	83
IMAGEN 4.27. REVISIÓN DE EFECTIVIDAD DE CORRECCIÓN DE ERROR POR ALABEO PARA ACEPTACIÓN.....	83
IMAGEN 4.28. REVISIÓN DE DIAGNÓSTICO DE ERROR POR CABECEO	84
IMAGEN 4.29. ÁREA CON PENDIENTE REGULAR PARA GENERAR PERFIL Y DIAGNÓSTICO DE ERROR POR CABECEO	85
IMAGEN 4.30. PERFIL Y DIAGNÓSTICO DE ERROR POR CABECEO.....	85

IMAGEN 4.31. COMPROBACIÓN DE CORRECCIÓN DE ERROR POR CABECEO	85
IMAGEN 4.32. ANÁLISIS INICIAL DEL ERROR DERIVADO DE LA PENDIENTE POR CABECEO.....	86
IMAGEN 4.33. TRAZO DE PERFIL PARA ESTIMAR EL ERROR DE LA PENDIENTE POR CABECEO	87
IMAGEN 4.34. PERFIL PARA DETERMINAR MAGNITUD DEL ERROR SOBRE LA RUTA EN AMBAS SUPERFICIES.....	87
IMAGEN 4.35. VERIFICACIÓN DE LA PENDIENTE DEL ERROR POR CABECEO	87
IMAGEN 4.36. VERIFICACIÓN DE DESALINEACIÓN POR DERIVA	88
IMAGEN 4.37. ÁREA CON PENDIENTE REGULAR EN LA DIRECCIÓN DE LA RUTA	89
IMAGEN 4.38. TRAZO DE PERFIL SOBRE LA RUTA PARA VERIFICAR COINCIDENCIA DE SUPERFICIES	89
IMAGEN 4.39. VERIFICACIÓN PARA COMPROBAR QUE LOS PERFILES COINCIDAN CON EL VALOR AJUSTADO DEL ERROR POR DERIVA	89
IMAGEN 4.40. DESPLIEGUE DE NUBE DE PUNTOS	91
IMAGEN 4.41. MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE DE DATOS PROCESADOS.....	91
IMAGEN 4.42. [A Y B] COMPARACIÓN GRÁFICA DE MÉTODOS DE CALIBRACIÓN	93

Índice de Tablas

TABLA 1.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	5
TABLA 2.1. MAYORES FUENTES DE ERROR QUE AFECTAN LA EXACTITUD EN LA DETERMINACIÓN DE PUNTOS LIDAR	18
TABLA 2.2. DIAGNÓSTICO DE MEDICIONES.....	24
TABLA 3.1. TAMAÑO DE ARCHIVOS LIDAR	51
TABLA 3.2. TAMAÑO DE ARCHIVOS LAS POR UNIDAD	51
TABLA 3.3. RANGO DE VALORES CONFIGURABLES PARA COLECTA DE DATOS LIDAR.....	52
TABLA 3.4. TAMAÑO DE ARCHIVOS POR TIPO DE SENSOR	52
TABLA 3.5. AFINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	55
TABLA 3.6. UBICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DENTRO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.....	57
TABLA 4.1. UBICACIÓN DE LOS CAMPOS DE CONTROL	64
TABLA 4.2. REVISIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE VUELO.....	65
TABLA 4.3. PARÁMETROS DE CORRECCIÓN CALCULADOS.....	76
TABLA 4.4. PARÁMETROS PARA ARCHIVO DE REGISTRO	76
TABLA 4.5. DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA DE LOS DATOS DE VERIFICACIÓN.....	77
TABLA 4.6. TABLA PARA VALIDAR CUMPLIMIENTO DE CARACTERÍSTICAS DE VUELO	80
TABLA 4.7. VALORES CALCULADOS	90
TABLA 4.8. DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ESTADOS.....	90

Resumen:

Keywords: LiDAR, Calibración, Unidad de Medida Inercial, GPS.

La implementación de tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging, por sus siglas en inglés) dentro del sistema de producción cartográfica digital en el INEGI para utilizarse en la generación de MDE (Modelos Digitales de Elevación), bajo estándares de exactitud posicional, depende en gran medida de contar con una calibración rigurosa de los datos adquiridos en cuanto a la geometría de los diferentes componentes.

Los sistemas GPS/INS integrados proporcionan los datos de navegación complementando la adquisición de datos LiDAR. La calidad de la solución de navegación es determinante para la exactitud de los puntos colectados en o sobre el terreno. Para asegurar lo anterior es necesario conocer la relación entre los componentes del sistema.

La tesis propone la definición de un procedimiento de calibración adaptable a cambios tecnológicos y condiciones de operación, así como de capacidad instalada que asegure la determinación de ángulos de desalineación entre la cabeza del láser y la unidad de medición inercial, mediante el modelado de los errores, para asegurar la exactitud posicional de los datos colectados.

Abstract:

The implementation of LiDAR (Light Detection and Ranging) technology within the digital cartography production process in the INEGI, to be used for DEM (Digital Elevation Model) generation according to positional accuracy standards, greatly depends on a strict calibration of the obtained data with respect to the geometry of the various components.

The GPS/INS integrated systems provide navigation data complementing the acquisition of LiDAR information. The quality of the navigation solution is critical for the accuracy of the points collected in the area. Nevertheless, in order to ensure the previous it is necessary to know the accurate spatial relation between the navigation sensor and the laser scanner.

The thesis proposes the definition of a calibration procedure flexible to technological changes and operation conditions, and with the installed capacity that guarantees the disalignment angle determination between the laser head and the Inertial Measurement Unit by error modelling, to ensure the positional accuracy of the collected data.

Keywords: LiDAR, Calibration, Inertial Measurement Unit, GPS.

Capítulo 1 Introducción

Dominio de la tesis

Percepción remota activa, mediante:

1. Sistema Láser Aerotransportado que a través de la luz obtiene valores altimétricos de puntos en y sobre la superficie terrestre, emitiendo pulsos y grabando la señal reflejada. Con la combinación de los datos registrados por el sistema se determina la posición de puntos (X, Y) y su elevación (Z), para hacer una recreación de los mismos y aplicarlos en la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE).
2. Implementación de tecnología LiDAR en el sistema de producción cartográfica digital en el INEGI para utilizarse en la generación de MDE, dentro de su línea de producción normalizada, proyectos especiales y de soporte para realización de soluciones geomáticas.

Planteamiento de la investigación

El sistema LiDAR combina elementos diseñados para la detección y medición de puntos con un sensor a bordo de una plataforma aérea, dichos elementos son:

- Un distanciómetro láser, que emite pulsos y capta sus retornos (también conocidos como ecos o rebotes), los cuales se convierten en información de altimetría.
- Sistema de Barrido, compuesto por un espejo que forma parte del mecanismo que oscila de manera sincronizada a una frecuencia programada, distribuye los rayos del láser en la superficie objetivo.
- Un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), provee de posición a la información bajo un sistema y marco de referencia geodésicos, con lo que se determina la precisión y exactitud de los objetos en o sobre el terreno.

- Un Sistema de Navegación Inercial (INS, por sus siglas en inglés), permite medir la orientación del sensor, el sistema mide los ángulos con una precisión de 0.001 grados, lo que permite compensar mediante un sistema de control servo-mecánico los movimientos bruscos del sensor a bordo de la plataforma (hacia adelante, atrás, a los lados).

Las mediciones que se realizan con el sistema tienen como objetivo determinar valores altimétricos mediante la detección de luz y distancia. Sin embargo el valor numérico no corresponde al valor real de la magnitud que se mide porque los resultados que se obtienen en el proceso de medición son aproximados debido a la presencia de diversas fuentes de error.

Para tratar de manera analítica los valores colectados y obtener resultados exactos, es necesario valorar el error asociado a la magnitud en cuestión durante el proceso de medición. Todas las medidas están afectadas en algún grado por un error debido a imperfecciones inevitables del instrumento de medida, los recursos informáticos usados, condiciones meteorológicas, las variables con las que se registra la información y las condiciones de operación subyacentes. Toda medida necesariamente estará acompañada de un valor estimado del error de la medida y de las unidades empleadas. Por lo que es necesario asegurar la correcta funcionalidad de cualquier sistema LiDAR que se use para aplicaciones cartográficas.

Problema a resolver

El problema que aquí se plantea se refiere a la necesidad de diseñar actividades de campo y gabinete que permitan establecer un procedimiento particular de calibración de los datos provenientes del sensor LiDAR.

Con el fin de avanzar en el conocimiento y la aplicación de la percepción remota activa mediante un láser aerotransportado, se expone la presente investigación para contribuir en la elaboración de procedimientos de trabajo afines, determinar

especificaciones mínimas para obtener nubes de puntos LiDAR, útiles para generar Modelos Digitales de Superficie y del Terreno.

Se puede resumir que el problema consiste en detectar y corregir errores sistemáticos en los datos para asegurar su completitud y consistencia lógica, mediante la articulación de un procedimiento de calibración comprobado.

Objetivo de la investigación

El objetivo principal de este trabajo es definir un procedimiento de calibración de los datos provenientes del sistema LiDAR, mediante el modelado de los errores, que asegure completitud y exactitud de nube de puntos ajustada al terreno para la generación de Modelos Digitales de Elevación.

Justificación de la investigación

A nivel internacional no existe un procedimiento específico de calibración que tenga como fin la determinación continua de valores de los parámetros de ajuste a los ángulos de desalineación del sensor, de la torsión del espejo y de distancia aplicables a la generación de la nube de puntos ajustados al terreno. Además se pretende contribuir en futuras investigaciones y generar bibliografía propia que facilite incursionar en el conocimiento de la tecnología por interés académico o laboral.

Hipótesis de la investigación

El diseño de un procedimiento flexible de afinación de la calibración permitirá profundizar en las características propias de cada tipo de error y sus fuentes para preverlos y corregirlos mediante el monitoreo del comportamiento de los datos procesados.

Plan de trabajo

La solución consistirá en:

- Determinación precisa del corrimiento entre la antena GPS y la IMU
- Evaluación de la presencia de errores sistemáticos en los datos debidos a valores inadecuados de los parámetros de calibración
- Determinación de las características específicas para la captura de los datos (aéreos y terrestres)
- El procesamiento geodésico para generar nube de puntos
- Generación de MDE por línea de vuelo para medir diferencias entre los modelos generados para detectar errores sistemáticos en los datos

La parte inicial de la investigación se enfoca a la comprensión de los modelados que se emplean para relacionar las medidas del sensor LIDAR aerotransportado y los efectos de los errores.

Se procederá a identificar y describir con claridad los tipos de error y fuentes que afectan la exactitud posicional y espacial de los datos; determinación del vector de posición entre el GPS y la IMU; los requerimientos operativos y de acopio de datos; especificación detallada del procedimiento de calibración y comprobaciones.

Para la determinación de los ángulos de desalineación se dispondrán de varias líneas de vuelo a diferentes alturas con traslapeo y con diferentes ángulos de barrido sobre una zona predeterminada que permitan la localización de discrepancias horizontales y verticales entre los datos. Se establecerá control geodésico terrestre para proceso y ajuste de datos altimétricos.

Creación del prototipo

Campo: Configuración del vuelo especial para identificar y resolver cada tipo de error presente. Definir métodos de medición y exactitudes de puntos GPS auxiliares.

Gabinete: Separación e integración de datos para procesos de corrección GPS (aire-tierra), cálculo de trayectoria, combinación de datos IMU-GPS, obtención del archivo de solución, generación de la nube de puntos (archivos láser) usando los valores vigentes de los parámetros de calibración y en su caso determinar los nuevos valores.

Método de desarrollo

Para la captura de datos, se posicionará de manera simultánea al levantamiento de los datos, una estación GPS de referencia, a fin de realizar la corrección diferencial y obtener la posición de los puntos en la superficie.

Para el levantamiento de datos geodésicos, se emplearán métodos estático y estático rápido para obtener puntos auxiliares terrestres con GPS; en cuanto a los valores de calibración se utilizarán un procedimiento heurístico y determinístico.

Diseño del experimento

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	SEMANAS					
	1	2	3	4	5	6
Planeación del vuelo						
Vuelo						
Proceso de los datos						
Ajuste de los datos						
Calibración						
Afinación de la calibración						
Generación de Modelos Digitales						
Documentación de la calibración						

Tabla 1.1. Cronograma de Actividades

Productos

- Vector de posición antena GPS-IMU
- Datos colectados conforme a un plan geométrico predefinido
- Datos GPS colectados, procesados y ajustados al marco geodésico nacional
- Obtención de trayectoria del sensor
- Datos combinados GPS-IMU
- Datos ajustados al terreno
- Ángulos para ajustar desalineación del sensor
- Bitácoras
- Procedimiento para calibración

Aportación de la investigación

La principal aportación que se pretende lograr es la documentación del procedimiento para determinar los valores de los parámetros de afinación de la calibración que asegure la exactitud posicional de los datos colectados con el sistema LiDAR, se adquiera mayor conocimiento y dominio de la tecnología, lograr una menor dependencia en procedimientos que pueden ser resueltos por el propio usuario.

Articular la calibración como un proceso obligado contribuirá para la mejor exactitud posicional de los datos. Mediante el monitoreo permanente de discrepancias en los datos colectados se determina la necesidad de realizar la afinación en la calibración del sistema.

Organización del documento (tesis)

- Capítulo 1 Contextualiza la investigación mediante su planteamiento formal.
- Capítulo 2 Refiere el Marco Teórico.
- Capítulo 3 Describe el uso y experiencias de LiDAR en el INEGI.
- Capítulo 4 Aborda el trabajo de la investigación, metodología y comprobación de resultados.
- Capítulo 5 Se expresan las aportaciones y las líneas de la investigación futuras.

Capítulo 2 Marco Teórico

La Percepción Remota

Es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación de fenómenos terrestres y extraterrestres, mediante sensores a bordo de plataformas aéreas y espaciales que obtienen información sobre la cual se puede medir y hacer análisis espacial. La idea consiste en obtener información a distancia sin necesidad de entrar en contacto con un objeto de estudio.

La adquisición de información a distancia implica la existencia de un flujo de energía entre el sensor y el objeto observado. Todos los cuerpos (planetas, seres vivos, objetos inanimados, etc.) emiten radiación o la reflejan, la cantidad y tipo de esta radiación emitida depende fundamentalmente de sus características físicas y de su temperatura. Para la observación de la Tierra a distancia, se utiliza una amplia gama de sensores que se clasifican en pasivos y activos.

Sensores pasivos

Algunos sensores pasivos recogen simultáneamente datos de diferentes bandas espectrales. Las mediciones sobre diferentes zonas del espectro electromagnético aportan una amplia información sobre distintos aspectos del medio ambiente. Por ejemplo, la radiación ultravioleta se utiliza para monitorizar los niveles de ozono en las capas altas de la atmósfera; las bandas visible e infrarroja permiten determinar la salud de la cubierta vegetal (cultivos, bosques), y los captadores sensibles a la radiación infrarroja térmica sirven para determinar la temperatura del suelo, de las nubes y de la superficie de los mares.

La percepción remota pasiva depende de luz diurna, por lo que de noche y con presencia de nubes no es posible realizar observaciones. La observación de las regiones tropicales no es fácil con esta modalidad de percepción remota, a causa de la frecuente presencia de densas coberturas de nubes en estas zonas. Asimismo son

difíciles de observar las regiones polares durante los periodos invernales, debido a la reducida iluminación solar que reciben.

Sensores activos

El sol representa la fuente principal de la mayoría de la energía electromagnética registrada por los sistemas de sensores remotos (excepto RADAR, LiDAR y SONAR).

Los sensores activos incorporan su propia fuente de energía y emiten una radiación que al reflejarse desde una determinada superficie, es recogida por ellos mismos. Entre los sensores activos, distinguimos el radar y el LiDAR.

EL LiDAR al operar con longitudes de onda mayores (superior al tamaño de las gotas de agua en la atmósfera) evita la absorción; asimismo, al ser un haz artificial puede manipularse la forma en la que se emite la radiación, para así obtener el máximo de información.

La energía dispersada se recibe, se amplifica y se analiza para determinar la localización y las propiedades de los objetos. Al poder medir el tiempo que tarda un impulso de radiación en ir y volver, se puede conocer la distancia recorrida y generar así modelos digitales de elevación.

Proceso de Percepción remota

La percepción remota es el resultado de la interacción entre tres elementos fundamentales: una fuente de energía, un campo de visión instantáneo (IFOV, por sus siglas en inglés) o escena y un captador o sensor (Ver Imagen 2.1.).

La fuente de energía es la que "ilumina" al campo de visión instantáneo emitiendo una onda electromagnética. El campo de visión instantáneo o escena es la porción de la superficie terrestre observada por el sensor montado en la plataforma. Su dimensión varía, en función del tipo de sensor. El sensor mide la energía solar reflejada por el IFOV y puede encontrarse en un satélite o en un avión distante del objetivo a una altura cientos de metros a miles de kilómetros.



Imagen 2.1. Elementos básicos de la Percepción Remota

Los sensores puestos en los satélites miden la radiación electromagnética reflejada y posteriormente reenvían esta información a La Tierra mediante un emisor. En La Tierra una red de estaciones de recepción se encarga de recibir y almacenar estos datos. En los sensores aerotransportados o terrestres la información es almacenada en medios magnéticos de manera directa.

Espectro electromagnético

La radiación electromagnética comprende una amplia variedad de frecuencias y de longitudes de onda (Imagen 2.2.) que abarcan desde los rayos gamma a las ondas de radio.

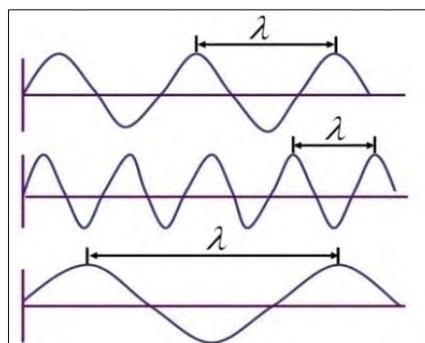


Imagen 2.2. Longitudes de onda y frecuencias

Una onda electromagnética (Imagen 2.3.) es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio y sus aspectos teóricos están relacionados con la solución en forma de onda que admiten las ecuaciones de Maxwell. A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse.

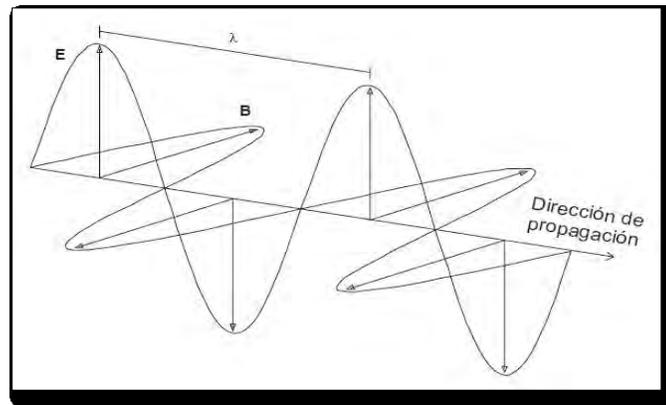


Imagen 2.3. Radiación electromagnética

Características de la radiación electromagnética

- Las ondas electromagnéticas transportan energía radiante y son todas semejantes (independientemente de cómo se generen) y sólo se diferencian en su longitud de onda y frecuencia.
- Se propaga en el vacío a la velocidad de la luz.
- Cuando incide sobre la superficie de un cuerpo, una parte es reflejada y el resto transmitida.
- La intensidad de las ondas electromagnéticas disminuye con el cuadrado de la distancia.

Las frecuencias fluctúan entre 10 a la cuarta y 10 a la veinte ciclos por segundo, correspondiendo las frecuencias más bajas a las longitudes de ondas mayores y las frecuencias altas a longitudes de onda menores. Todas estas emisiones constituyen el denominado espectro electromagnético (Imagen 2.4.)

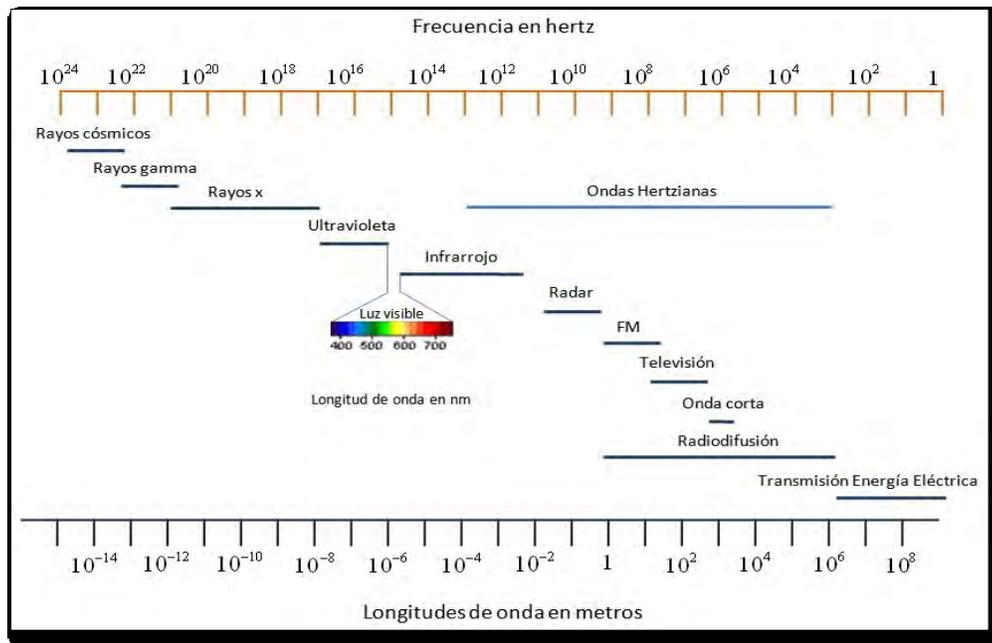


Imagen 2.4. Espectro electromagnético

Interacciones de la radiación con la materia

Todos los objetos de la superficie terrestre reciben radiación emitida por otros cuerpos, fundamentalmente del Sol. En función de las características del objeto, la energía Incidente puede seguir tres caminos:

- Reflejarse: La radiación es regresada al espacio
- Absorberse: La radiación incrementa la energía del objeto
- Transmitirse: La radiación se transmite a otros objetos

La relación entre la radiación incidente y la reflejada se le denomina albedo, cuanto más reflectante es un material mayor es su valor de albedo. El albedo anual promedio de La Tierra, incluyendo la atmósfera, es de 34%. El 75% del albedo terrestre está causado por la reflexión de las nubes.

LASER

Formado con las siglas de Light Amplificación by Stimulated Emission of Radiation, o sea, amplificación de la luz por emisión estimulada de la radiación.

El término puede entenderse como una frecuencia específica de luz que pasa por un prisma y se concentra de manera tal que aun una fuente de luz relativamente baja puede proyectarse a una distancia relativa con poca divergencia.

El láser presenta tres cualidades: está colimado, es coherente y es monocromático. Un láser es capaz de emitir los fotones en un rayo sumamente angosto y que no solo resulta definido en su totalidad sino que además es coherente y, en ciertas ocasiones, también está polarizado. La luz emitida es casi monocromática, puesto que su longitud de onda es una sola, lo que le impide tener variedad de colores en su composición

Toda luz está conformada por ondas luminosas. En la luz normal, estas ondas tienen diferentes direcciones y cuentan con diversas longitudes de onda. En la luz láser, en cambio, todas las ondas tienen la misma longitud de onda, la misma dirección y además concuerdan en su fase. Es por eso que se dice que un rayo láser es un haz de luz coherente. <http://es.onaik.com/2009/03/laser.html>

Componentes del láser

- Un medio amplificador, como un tubo de vacío, en el cual se encuentran los átomos a excitar.
- Un generador de energía de alto voltaje utilizado para excitar los átomos a niveles de energía más altos.
- Un resonador óptico formado por dos espejos altamente pulidos: uno de reflexión total y otro de reflexión parcial. Éstos reflejan los fotones coherentes de un lado a otro para repetir el proceso de emisión estimulada continuamente hasta que se forma un diluvio de fotones coherentes que, a una cierta magnitud, el espejo semitransparente no puede sostener y forma el láser.

El láser cuenta con un sistema colimador (Imagen 2.5.) muy preciso cuya tarea es homogeneizar las trayectorias o rayos emitidos por el láser. El objetivo de la colimación es que el eje óptico de cada lente o espejo coincida con el rayo central del sistema.

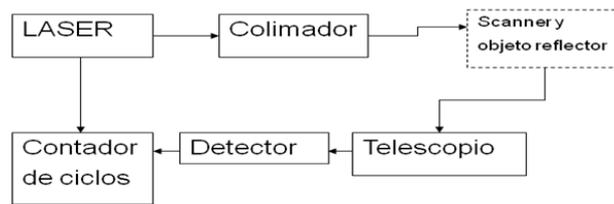


Imagen 2.5. Colimador láser

Aplicaciones

Desde su invención a mediados del siglo pasado, se han encontrado aplicaciones en: exploración científica, medicina, tecnologías de la información, robótica, soldadura o sistemas de corte en sectores industriales y militares, entre muchas otras.

Dentro de las vastas aplicaciones del láser está la que corresponde a la generación de información geográfica a través de la medición de distancias (telemetría), valiéndose de la percepción remota, obteniéndose una gran densidad de medidas sobre diversos tipos de terreno y logrando exactitudes posicionales centimétricas. Se considera una tecnología rápida y exacta para obtención directa de datos de posición tridimensionales densos de superficies físicas.

La tecnología LiDAR

Dentro de las características que destacan el uso de sensores LiDAR está su capacidad de obtener datos rápidos y exactos sobre grandes áreas (por lo general, miles de kilómetros cuadrados), sólo limitados por condiciones meteorológicas adversas, tráfico aéreo en grandes ciudades. Puede operar sin limitantes de horario, las cubiertas vegetales no impiden contar con datos altimétricos del terreno, por la capacidad de los impulsos para colarse entre los espacios del follaje.

El resultado del procesamiento es una malla de puntos con datos de posición (X, Y) y de elevación (Z) en intervalos predefinidos, suficientemente densa para derivar diversos productos fotogramétricos.

Un típico sistema LiDAR transmite rápidamente impulsos de luz que se reflejan sobre el terreno; un láser genera el impulso que se refleja en función de la superficie que

alcanza y se registra en el sensor. El emisor del impulso (diodo láser) genera las pulsaciones de la luz con extremada rapidez (miles de veces por segundo), pero la velocidad de la luz es tal que el sensor del receptor es sensibilizado por el retorno del impulso antes que la próxima pulsación sea emitida.

La tecnología LiDAR se basa en la exactitud de medida del tiempo de viaje del pulso láser desde el transmisor al objetivo y de regreso al receptor.

El tiempo de viaje de un pulso es dos veces la distancia entre la velocidad de la luz.

La distancia entre el sensor LiDAR y el objetivo se determina por el producto del tiempo y la velocidad de la luz entre dos.

No obstante, sólo hay un registro de una distancia que se complementa con datos de las componentes de posición y altitud.

Comportamiento del rayo láser

El rayo láser se comporta de acuerdo a la característica de los objetos que capte (Imagen 2.6.), de manera general podemos evaluar el comportamiento en función del tipo de superficie que toque.

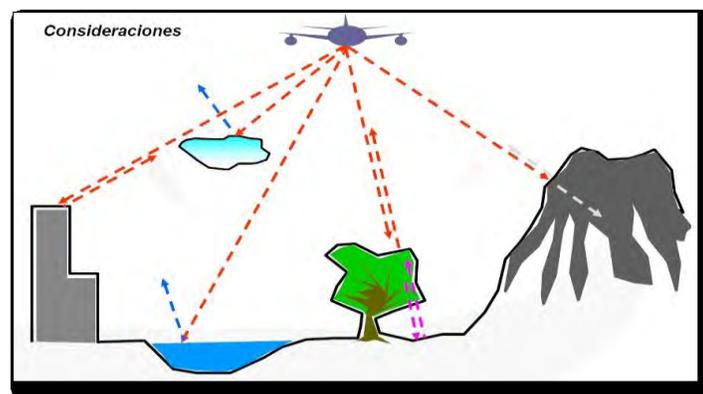


Imagen 2.6. Comportamiento del LiDAR en función del tipo de superficie en contacto

1. En una superficie sólida (Suelo y objetos culturales), el rayo se reflejará sin ningún problema y se tendrán rebotes con determinada intensidad.
2. En el agua, el rayo láser no retorna y no se obtiene información por la capacidad

- de absorción que tiene este compuesto sobre la radiación infrarroja.
3. En vegetación, el rayo puede captar en primer lugar información de la copa del un árbol, ya que algunos rayos se reflejan y retornan al sensor en el avión (primer rebote), otra parte de los rayos atraviesan entre las hojas hasta llegar al suelo y generan un rebote adicional, así se obtiene al mismo tiempo información del dosel y del terreno. En caso de tener una tarjeta electrónica multipulso se pueden obtener más de dos rebotes.
 4. En lugares con asfalto fresco o presencia de cenizas, se pueden obtener rebotes aunque atenuados.

Características de los datos LiDAR

Las características más importantes de los datos con respecto al ajuste por franjas son la distribución irregular de puntos, la exactitud de los puntos láser, el impacto de la divergencia del rayo (tamaño de la huella) y la dependencia de la señal de retorno sobre las características físicas de la superficie. Aunque estas características son importantes para el procesamiento de datos en general, tienen un efecto específico sobre los procesos de ajuste por franja por lo que se ofrece un repaso breve.

Los sistemas LiDAR son sistemas multisensores y dinámicos, conllevan fuentes potenciales de errores sistemáticos y aleatorios, posibles. Debido a la complejidad y la estructura interconectada del sistema, no todos los errores pueden ser observados en las discrepancias entre líneas. Los sistemas incorporan al menos tres sensores principales: GPS y sensores de navegación INS¹, y el dispositivo láser de barrido (imagen 2.7.); adicionalmente el espejo es un componente en movimiento del sistema que tiene sus propios problemas de codificación de posición, siendo el desgaste y la histéresis mecánica que puede degradar aún más la exactitud de los datos adquiridos.

En general, los errores en los datos de escaneo láser pueden derivarse de la calibración del sensor (errores de medición), la falta de sincronización, y la desalineación entre los diferentes sensores. Baltsavias (1999) presenta una visión

¹ Un sistema de navegación inercial, INS por sus siglas en inglés (Inertial Navigation System), es un sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, sensores de movimiento (acelerómetros) y sensores de rotación giróscopos para calcular continuamente mediante estima la posición, orientación, y velocidad (dirección y rapidez de movimiento) de un objeto en movimiento sin necesidad de referencias externas.

general de las relaciones y fórmulas básicas relativas al error de escaneo láser aerotransportado, y Schenk (2001) proporciona un análisis de error inicial en LiDAR. Incluso después de la calibración del sistema, algunos errores pueden estar presentes en los datos, donde los errores de navegación generalmente dominan. Los errores se ven como las discrepancias entre los datos de líneas superpuestas y en las superficies de control del terreno. La mayoría de estos errores sistemáticos se pueden corregir usando el ajuste de líneas superpuestas (con o sin control en tierra) al eliminar las discrepancias entre éstas.

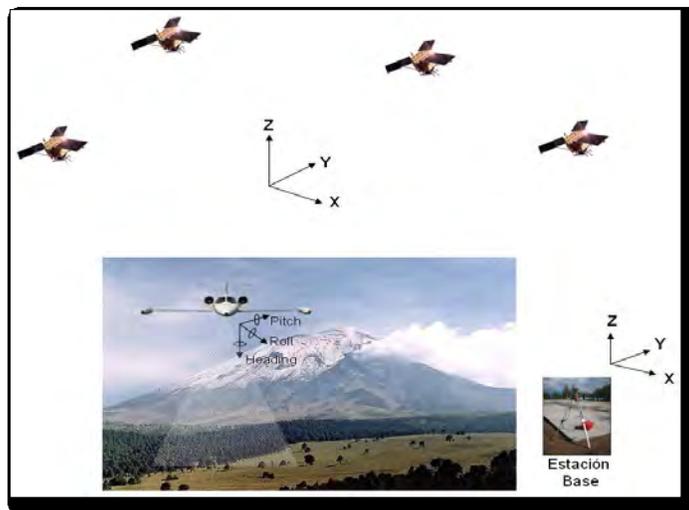


Imagen 2.7. Componentes del sistema LiDAR

El LiDAR se basa en la georreferencia directa y la posición de un punto láser medido al tiempo que se calcula t_p con la ecuación 2.1.

$$r_M(t_p) = r_{M,INS}(t_p) + R_{INS}^M(t_p) \cdot \left[R_L^{INS} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(\beta(t_p)) \\ \cos(\beta(t_p)) \end{bmatrix} \cdot d_L t_p + b_{INS} \right] \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Dónde:

- $r_M(t_p)$ Coordenadas 3D del punto laser en el marco cartográfico, coordenadas 3D INS (origen), en el marco cartográfico proporcionadas por
- $r_{M,INS}(t_p)$ GPS/INS (solución de navegación referidas al origen del marco del cuerpo del INS
- $R_{INS}^M(t_p)$ Matriz de rotación entre el cuerpo del INS y el marco cartográfico
- R_L^{INS} Matriz de la mira entre el marco del láser y el marco del cuerpo INS

d_{L,t_P}	Medición de la distancia (distancia del punto de referencia del sensor láser al punto del objeto)
b_{INS}	Vector de desviación de la mira (vector entre el punto de referencia del sensor láser y el origen de INS) definido en el marco del cuerpo INS
$\beta(t_P)$	Ángulo de escaneo definido en el marco del sensor láser (x_L es la dirección del vuelo, y_L a la derecha y z_L hacia abajo).

Con base en la ecuación 2.1., la exactitud del punto láser en un marco cartográfico se puede determinar aplicando la ley de la propagación del error. Para una mayor documentación se pueden consultar trabajos anteriores sobre los errores y la recuperación de los parámetros del modelo en (Baltsavias, 1999; Schenk, 2001, y Filin, 2003 a, b) y un trabajo más reciente sobre varios términos de la estimación del error en Csanyi May, 2007). Sin embargo, la dificultad en aplicar la teoría en casos prácticos es la dependencia del tiempo de algunos parámetros (se modelan en función del tiempo). En una interpretación simplificada, no hay una separación clara entre los términos de error sistemático y estocástico para periodos más largos, ya que varios componentes podrían tener comportamiento no estacionario en términos de cambios sobre intervalos que van de minutos a horas. En la navegación son factibles estimaciones grandes del error debido a que los componentes pueden cambiar lentamente con el tiempo y podrían considerarse como derivas (drifts) con respecto a los otros componentes estocásticos con mayor dinámica. Éstos podrían modelarse más adelante como términos de error sistemático para periodos más cortos, como para el tiempo que lleva coleccionar datos en una línea de vuelo. De lo anteriormente expuesto proviene la necesidad de ajustes por líneas de vuelo, ya que estos términos de error podrían cambiar de manera importante entre y dentro de los levantamientos, semejante a las experiencias con la triangulación aérea asistida por GPS con líneas de vuelo largas (Ackerman, 1994). Lo antes expuesto evidencia la dificultad para obtener estimaciones confiables de los términos de error. En la Tabla 2.1 se pueden observar algunas de las fuentes básicas de error generalmente aceptadas y los valores típicos, que se pueden utilizar para un análisis de propagación del error para la exactitud de la nube de puntos. Además, la importancia de estos valores es que pueden proporcionar un límite más bajo del que puede esperarse, siendo realista, de una corrección basada en el ajuste por líneas utilizando métodos basados en la calibración del sensor.

	Errores	Valores típicos
Solución de navegación (GPS/INS)	<ul style="list-style-type: none"> Errores en la posición y la orientación de la plataforma del sensor (errores de desplazamiento y orientación) 	δ_x, δ_y : 2 a 5 cm; δ_z : 4-7 cm δ_v, δ_ϕ : 10-30arcsec δ_k : 20-60
Calibración del sensor láser	<ul style="list-style-type: none"> Error de la medición de la distancia Error del ángulo de escaneo Error en la calibración de la distancia basada en la reflectancia 	δ_r : 1-2 cm δ_β : 5arcsec [-20-10] cm
Calibración dentro del sensor	<ul style="list-style-type: none"> Desalineación de la mira entre los marcos del cuerpo INS y del sensor láser (errores de desplazamiento y angular) Error en el brazo de palanca medido (vector entre la antena GPS y el punto de referencia INS) 	$\delta_{xb}, \delta_{yb}, \delta_{zb}$: <1 cm $\delta_{vb}, \delta_{\phi b}$: 10 arcsec δ_{kb} : 20 arcsec $\delta_{xa}, \delta_{ya}, \delta_{za}$: <1 cm
Errores diversos	<ul style="list-style-type: none"> Efecto de la divergencia del rayo (huella) Características del terreno y el objeto Sincronización del tiempo Transformaciones del sistema de coordenadas Refracción atmosférica Rigidez del montaje del sensor Rigidez en la instalación del sensor 	[0-5] cm

Tabla 2.1. Mayores fuentes de error que afectan la exactitud en la determinación de puntos LiDAR

GPS/IMU

Los sistemas GPS/IMU se han utilizando con cámaras analógicas y digitales aerotransportadas para proporcionar la georreferenciación directa o para apoyar el proceso de aerotriangulación. Los sistemas de GPS/IMU también han sido integrados a los sistemas LiDAR aerotransportados para proporcionar la información georreferenciada del barrido láser y así calcular la posición tridimensional de cada pulso sobre la superficie del terreno.

La tecnología del GPS puede proporcionar una alta exactitud de posición y velocidad uniforme generalmente en un rango de hasta 20Hz; sin embargo, tiene varios defectos incluyendo la dependencia de la visibilidad entre la antena GPS y los satélites por obstrucción de la señal, especialmente en un ambiente urbano. El GPS no proporciona

información exacta de la orientación, generalmente la frecuencia de grabación de datos no es lo suficientemente alta para las aplicaciones aerotransportadas.

La integración de ambas tecnologías proporciona una solución homogénea altamente exacta en: la posición, la velocidad y la orientación, con una alta frecuencia de datos.

Las medidas crudas del GPS y la velocidad calculadas se aplican para calibrar el error de la Unidad de Medición Inercial, usando el filtro Kalman para mezclar los datos del GPS y de la IMU generando una solución óptima en el sistema integrado. Consiste en dos pasos principales: predicción y actualización. La predicción es sobre el estado del sistema y su covarianza para la siguiente época basada en la información de la época actual usando un modelo dinámico del error del sistema. Por su parte, la actualización corrige los errores en el vector predicho del estado y su covarianza basados en el modelo de la observación usando las medidas. En un sistema de GPS/IMU, el vector del estado está integrado por: error de la posición, error de la velocidad, error de la orientación, y los sesgos del acelerómetro y giróscopo, error del factor de escala y no-ortogonalidad.

IMU

Una unidad inercial o IMU (por sus siglas en inglés) es un dispositivo que integra tres giróscopos y tres acelerómetros junto con un reloj que permite asignar tiempo a los valores medidos por los sensores inerciales y los mecanismos de calibración de dichos sensores a posibles perturbaciones debidas a cambios de temperatura o a otros agentes externos; una computadora a bordo resuelve la posición y la velocidad. Este tipo de unidades implementa internamente tres ejes ortogonales sobre los cuales se montan los sensores de manera que a cada eje le es asignado un acelerómetro y un giróscopo. La información suministrada por una IMU es la aceleración lineal y la velocidad angular correspondiente a cada uno de los ejes de un sistema de tres ejes ortogonales con el correspondiente valor de tiempo común para estos seis valores. La frecuencia típica de salida de datos de una unidad inercial oscila entre los 50 y 400 Hz, en función de sus características.

El principio básico de navegación de la IMU es la ley de movimiento de Newton. Las medidas del giróscopo se utilizan para calcular la orientación de los ejes utilizando un marco de referencia geográfico local (norte local, este y altura). Por tanto, esta orientación se usa para transformar la aceleración en los ejes al marco local. El cambio de la velocidad se puede calcular con una integración sobre la aceleración, mientras que el cambio de la posición con otra integración sobre el cambio de la velocidad. Por tanto la posición, la velocidad y la orientación se pueden calcular a lo largo de la serie de tiempo a partir de una posición y velocidad inicial conocida.

GPS

Las posiciones varían en precisión de metros hasta centímetros, dependiendo del tipo de receptores y cómo se utilicen (métodos de levantamiento). Un receptor calcula su posición utilizando un método llamado "rango o distancia satelital", tiene dos bloques importantes de información: la distancia entre el receptor y cada satélite (4 o más); la ubicación exacta en el espacio de cada uno de esos satélites.

Las posiciones GPS no son cien por ciento precisas, están influenciadas por algún tipo de error. Para dirigir la atención a las exactitudes, se deben conocer algunos de los errores de las posiciones que se obtienen. Cada uno de los siguientes errores tiene un impacto en la exactitud de las posiciones GPS.

Error Orbital. Las posiciones de los satélites obtenidas a partir de la información de la señal son una predicción de la ubicación del satélite en un momento dado, y pueden diferir ligeramente de la posición real. Si bien se toman medidas para predecir las mejores posiciones (o las órbitas), no se puede predecir perfectamente todo el tiempo.

Errores del Reloj. Los satélites y receptores necesitan relojes muy precisos para hacer su trabajo. El más pequeño error puede desviar el rango de medición desde el receptor al satélite por decenas, centenas o miles de metros. Por ejemplo, 10 nanosegundos (0,00000001 segundos) de error podrían causar un error de 3 metros de distancia.

Retardo ionosférico y troposférico. Ocurre cuando las señales del satélite se retrasan en su viaje al receptor al viajar por una zona de partículas cargadas, llamado la ionosfera, por encima de la tierra ya través de nuestra atmósfera.

Error por multitrayectoria. Se origina por el rebote de la señal en algún objeto cercano antes de llegar a la antena.

Ruido del receptor. Esta es una función de qué tan bien un receptor GPS puede medir la señal proveniente del satélite. Algunos son mejores que otros.

Niveles de exactitud GPS

La latitud y longitud horizontal o las "coordenadas" se les conoce como coordenadas en 2D. Con la altura de la posición GPS las coordenadas son 3D. La posición horizontal es más precisa que la altura, esto es porque los satélites que se utilizan para calcular la posición son visibles por encima de la antena, ninguno es visible por debajo de la misma.

Posición absoluta de un punto. La posición de un punto tiene una precisión de unos 10 metros aproximadamente en 2D y 16 m en 3D. Se calcula a partir de un solo receptor GPS. El receptor GPS utiliza las señales de radio enviadas desde al menos 4 satélites para medir la distancia (rango del satélite) y calcular la ubicación. Generalmente se usan receptores económicos.

Posicionamiento Diferencial. La precisión de posicionamiento, en modo diferencial, varía de 0.5 a 5 m (2D) y 0.8 a 8 m (3D), en función de varios factores. El GPS Diferencial o DGPS, requiere del uso de dos receptores. Uno colocado en un punto ubicado en una posición conocida y publicada. Otro denominado móvil. Ambos colectan datos de los mismos satélites al mismo tiempo. A continuación, los datos se procesan para eliminar errores en cada una de las posiciones. El nivel de precisión es con calidad cartográfica, útil para trabajar con un Sistema de Información Geográfica (SIG) o con fines cartográficos.

Posicionamiento con fase portadora. Este es el más alto nivel de precisión posible, utilizando el GPS. El método es idéntico al posicionamiento diferencial con algunas excepciones notables. Se deben utilizar receptores geodésicos, debe asegurarse visibilidad satelital, evitar lugares con multitrayectoria, zona despejada para recepción satelital. Las posiciones se obtienen con exactitudes centimétricas, [**< 1 cm a 30 cm (2D), >1 cm a 45 cm (3D)**]

Métodos de levantamiento con GPS

Estático. Los receptores se quedan fijos en ubicaciones seleccionadas. Generalmente utilizado en observaciones de líneas base superiores a 15 km. Es sencilla de realizar aunque lenta al requerir entre una o varias horas de observación según la longitud de la línea base, a mayor distancia debe incrementarse el tiempo de observación. Es recomendable liga a estaciones de operación continua para determinar sus coordenadas con estándares de exactitud posicional, en México el marco de referencia geodésico físico es la Red Geodésica Nacional Activa.

Estático rápido. Es una técnica muy eficiente para medir muchos puntos que están muy cerca uno del otro. Se usa una estación base y uno o varios equipos móviles. Las exactitudes posicionales están condicionadas a distancias menores a 10 km, para obtener exactitudes cartográficas se recomienda el uso de receptores de doble frecuencia y corrección diferencial de fase portadora.

Cinemático. Para registro de puntos de detalle con inicialización estática del receptor de 10 a 15 minutos para corregir ambigüedades; una vez inicializado, se puede movilizar a los otros puntos por levantar, ocupando cada uno con una tasa de frecuencia pequeña (segundos); con inicialización al vuelo (OTF), no se requiere inicialización estática, al inicio de la medición el receptor móvil puede comenzar a desplazarse y automáticamente se registran los datos al intervalo predefinido.

Errores que afectan a la posición GPS durante la colecta de datos LiDAR

- Cambios de satélites, ocasionan cambio de geometría
- Pérdidas de la señal de un satélite, afectan la geometría

- Derivas e incluso saltos debidos a una nueva solución de ambigüedades (en los giros, sobre todo)
- Cambios de la tropósfera y la ionósfera
- Altura de los satélites sobre el horizonte
- Errores en las transformaciones entre los sistemas de referencia (espejo, IMU, antena GPS)

Fuentes de Error

Durante las medidas de un fenómeno o estudio de un objeto, los errores al azar son más obvios, dando lugar a datos no reproducibles y que no tienen sentido. La observación con la misma combinación de variables, e incluso el control en sí mismo, no pueden ser duplicados debido a que ciertos eventos aleatorios estarán presentes siempre. Debe tenerse claro que no habrá dos medidas exactamente iguales.

Mediante el análisis de la diferencia de los datos, se puede deducir si las diferencias en los mismos se pueden explicar por algo natural. Así un error aleatorio ocurrirá cuando se hace algo diferente en cada evento.

Los errores sistemáticos también están presentes durante las medidas y son más difíciles de detectar; los datos y los resultados pueden parecer constantes y reproducibles. Existe el riesgo de estar haciendo algo de lo que no se tenga control o conocimiento, por lo que las medidas estarán mal y posiblemente se estén desviando por una magnitud constante y con un determinado gradiente.

Errores Aleatorios en LiDAR

Para cada punto medido en el terreno, la propagación del error ayuda a determinar el error asociado en la exactitud posicional de cada uno. Conociendo las exactitudes de cada componente del sistema, esto es sensor LiDAR, GPS, IMU y los parámetros de la mira, entonces se puede predecir la calidad posicional del producto final. Lo anterior, no resolvería los efectos de interacción aleatoria con la atmósfera, la respuesta del rayo en diferentes tipos de terreno con cubierta vegetal o sin ella, menos los de interpretación, pero si provee de evidencia del error en la huella láser (exactitud final de la nube de puntos) resultado de las mediciones de cada componente.

Errores sistemáticos en LiDAR

Las mediciones que se realizan con el sistema conllevan errores sistemáticos en la nube de puntos ajustada, estos errores están presentes en las mediciones del ángulo del espejo, las distancias medidas, las mediciones del GPS/IMU. El diagnóstico en las mediciones y en los parámetros de calibración se apoya en factores causantes y su efecto, así como la dependencia de las magnitudes observables, como se describe en la tabla 2.2.

Causa	Efecto	Magnitudes	Consideración
Error por desviación de la mira (desviación espacial entre el punto de disparo del rayo láser y la unidad GPS/INS)	Desplazamiento constante en el espacio del objeto, considerando la orientación constante.	Depende de los parámetros del sistema (altura de vuelo y ángulo de vista)	Los componentes del efecto en las direcciones horizontales se afectan con la dirección del vuelo
Sesgos angulares (ángulos de la IMU y de espejo)	Afecta las coordenadas horizontales más que las coordenadas verticales.	La magnitud y los componentes del impacto dependen de los parámetros del sistema (altura de vuelo y ángulo de vista)	Se debe asegurar control geodésico y la exactitud posicional, así como distancia al control
Sesgo de la distancia	Afecta más a las alturas que a las coordenadas horizontales.	El efecto será independiente de la altura de vuelo del sistema.	Dependerá del ángulo de vista del sistema (las magnitudes del impacto en las regiones del nadir y fuera del nadir serán diferentes)

Tabla 2.2. Diagnóstico de mediciones

Los sesgos sistemáticos y su efecto en una superficie derivada cuyo escaneo es lineal sobre un terreno relativamente plano con una trayectoria en línea recta considerando una orientación **constante sobre la dirección "Y"** son:

Sesgo en la desviación de la mira

- Altura de vuelo: efecto independiente de la altura de vuelo.
- Dirección de vuelo: efecto dependiente de la dirección del vuelo, excepto para el **incremento de "Z"**.
- Ángulo de vista: efecto independiente del ángulo de vista.

Sesgo angular de la mira

- Altura de vuelo: efecto aumenta con la altura de vuelo.

- Dirección de vuelo: efecto cambia con la dirección del vuelo.
- Ángulo de vista: efecto cambia con el ángulo de vista, excepto para el incremento de "X".

Sesgo de la distancia del rayo láser

- Altura de vuelo: efecto independiente de la altura de vuelo.
- Dirección de vuelo: efecto independiente de la dirección del vuelo.
- Ángulo de vista: efecto depende del ángulo de vista, excepto para el incremento de "Y".

Sesgo angular del rayo láser

- Altura de vuelo: efecto incrementa con la altura de vuelo.
- Dirección de vuelo: efecto cambia con la dirección del vuelo, excepto para el incremento de "Y"
- Ángulo de vista: efecto cambia con el ángulo de vista, excepto para el incremento de "X".

Calibraciones

Los ángulos de desalineación representan la mayor necesidad dentro de un proceso de calibración. Las diferencias angulares entre el láser y el INS se resuelven después del vuelo de colecta de datos.

Hay varios parámetros de calibración que no se pueden medir de manera directa, siendo la mayor fuente de error los ángulos de desalineación entre el marco del cuerpo del INS, definido por sus tres acelerómetros, y el marco del escáner, definido como un punto y una serie de ejes en el espejo del escáner, además de otros errores asociados al escáner. A continuación se hace una reseña de errores y parámetros de calibración

Errores en la medición de la distancia

- Variaciones de la frecuencia nominal del oscilador
- Retardos electrónicos que dependen de la temperatura y del envejecimiento
- Diferencias en el potencial máximo de la señal del impulso de salida y del eco
- Variaciones de la presión atmosférica
- Variaciones de temperatura y de la humedad del aire

Calibración en laboratorio

Algunos parámetros de calibración están determinados en fábrica y por lo general deberían permanecer fijos:

- Retardo del codificador
- Corrección del ángulo de escaneo
- Retraso electrónico del sistema
- Orientación del sensor determinado por la IMU
 - Alabeo y cabeceo (roll & pitch): 0.0025°
 - Deriva (Heading) aproximadamente el doble
- Desalineación entre la IMU y el rayo láser
- Desplazamiento (Offset) entre la IMU y el rayo láser
- Orientación del plano de barrido
- Dirección de la vertical. Se mide en laboratorio pero el montaje de la unidad puede provocar torsiones

Alineación de laboratorio de IMU/Escáner

- Se ajusta el haz del láser para que esté en el plano en que se mueve la normal al espejo
- Se ajusta el espejo para que gire según el eje balanceo de la IMU
- Cuando el espejo está en $\Theta=0$, en la IMU balanceo = cabeceo = 0
- Se realiza barriendo sobre unas dianas en posiciones conocidas
- Alineación de los subsistemas LiDAR

Alineación de los subsistemas LiDAR

Como ya se mencionó, los tres componentes del sistema no tienen una alineación perfecta (Imagen 2.8.) por lo que es necesario conocer su interrelación.

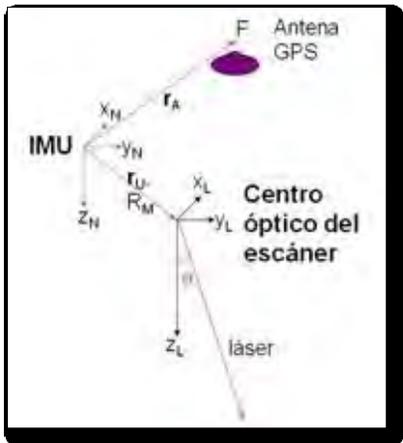


Imagen 2.8. Desalineación de los subsistemas

Los errores de desalineación angular (cabeceo, alabeo y deriva) entre el sistema de medición inercial y el escáner pueden ser relativamente pequeños, pero su impacto en la posición de los puntos depende de la altura de vuelo y el ángulo de escaneo. La posición del sistema puede ser afectada cada vez que se cambia de aeronave o recibe un fuerte golpe.

Como se ha visto, la presencia de errores sistemáticos proviene de los subsistemas y errores de calibración de los datos, entre otros aspectos.

Los errores de la IMU pueden deberse a varios factores. Los tipos más comunes de error son: la deriva, el factor de escala, la inclinación, el movimiento aleatorio, el ruido y otros.

El factor de escala es la proporción entre un cambio en la señal de salida y el cambio en la entrada. La mayoría de los sensores proporcionan la señal de salida en forma directamente proporcional a la señal de entrada. Sin embargo, si la calibración de la IMU no es perfecta, el movimiento detectado será siempre un porcentaje muy pequeño o muy grande.

El factor de escala del acelerómetro solamente causa error cuando hay aceleración. Los factores de escala se enumeran a veces como un porcentaje. Por ejemplo, un factor de escala del 1% en un ambiente donde hay una aceleración de 2g puede proporcionar una incertidumbre de 20 mg. Los sensores más precisos tienen factores de escala más pequeños.

Las mediciones realizadas por los giróscopos también tienen errores de factor de escala, lo cual es importante porque estos sensores miden la velocidad angular para determinar la orientación. El factor de escala por tanto, es una parte importante en los errores de las lecturas del sensor y suele referirse en unidades de ppm.

Otro tipo de indicador de la calidad de la IMU lo constituye el sesgo (bias), causado generalmente por malas calibraciones, imperfecciones durante la fabricación, el ambiente y aparece cuando no hay entrada de información. El sesgo se mide en unidades de gravedad (g) para un acelerómetro y un cambio de ángulo sobre el tiempo de un giro. Como en cualquier otro tipo de error, a menor valor, mejor sensor.

Por otra parte, es necesario considerar la ocurrencia de los errores aleatorios ya que éstos tienen una incidencia directa sobre los errores descritos anteriormente. La deriva aleatoria diaria y las condiciones naturales en el ambiente pueden cambiar el factor de escala y el sesgo, en cerca de 10 veces comparadas con su funcionamiento en el movimiento aleatorio. Las condiciones naturales que propician la incidencia de errores son: temperatura, cantidad de vibración y campos magnéticos al paso del tiempo. También debe considerarse que el envejecimiento de los componentes internos y otra contaminación pueden causar un cambio lento sobre el tiempo.

Desalineaciones de la mira entre el INS y el escáner láser

En un sistema LiDAR aerotransportado, los sensores de navegación están separados, mientras que la antena GPS está instalada en la parte superior del fuselaje, la INS está conectada al sistema LiDAR en el interior de la aeronave, por lo que la relación espacial entre los sensores debe conocerse con gran exactitud.

El marco del INS suele considerarse como el sistema de referencia local, porque la solución de navegación se calcula en este marco. La relación espacial entre el escáner láser y el INS está definida por la desviación y la rotación entre los dos sistemas. El componente crucial es la rotación, ya que la distancia al objeto amplifica el efecto de una inexactitud angular, mientras que el efecto de una inexactitud en la desviación no depende de la altura de vuelo y la desviación se puede determinar de antemano con exactitud. Las coordenadas de un punto láser son una función de la orientación externa del sensor láser y del vector de la distancia láserica. La ecuación de observación es:

$$P_{\text{Local}} = R_{\text{Orientación}} \cdot (R_{\text{Desalineación}} \cdot R_{\text{ángulo escaneo}} \cdot \gamma_{\text{distancia láserica}} + \Delta f_{\text{brazo de nivelación}}) + APC_{\text{Local}}$$

Donde:

P_{Local}	Son las coordenadas tridimensionales de un punto láser en el marco cartográfico local;
$R_{\text{Orientación}}$	Es la matriz de rotación entre el marco INS y el marco cartográfico, medido por el GPS y el INS;
$R_{\text{Desalineación}}$	Es la matriz de la mira entre el marco láser y el marco del INS;
$R_{\text{ángulo escaneo}}$	Es la matriz de transformación de la distancia láserica al marco láser con el ángulo de escaneo;
$\gamma_{\text{distancia láserica}}$	Es la distancia láserica del punto de disparo al objetivo;
$\Delta f_{\text{brazo de nivelación}}$	Es la desviación entre el punto de disparo del láser y el centro de fase de la antena GPS en el marco del cuerpo;
APC_{Local}	Son las coordenadas tridimensionales del Centro de Fase de la Antena GPS en el marco cartográfico local.

La ecuación anterior ofrece la relación general entre las diferentes partes del sistema, es claro que es un sistema lineal. Conociendo los efectos de los ángulos de desalineación sobre las coordenadas de las huellas láser se puede recuperar la desviación de los ángulos con base en un método geométrico por etapas, ya que cada tipo de desalineación tiene distintas características de influencia sobre la posición de un punto.

Errores de desalineación

Alabeo (roll)

Es la desalineación en radianes sobre el eje X (dirección de la línea de vuelo), entre la IMU y el láser (Imagen 2.9.), **provoca un plano horizontal "inclinado" la cual podrá identificarse al comparar en los extremos de dos pasadas y en vista de perfil la elevación o hundimiento del barrido de cada línea respecto a la que se compara.**

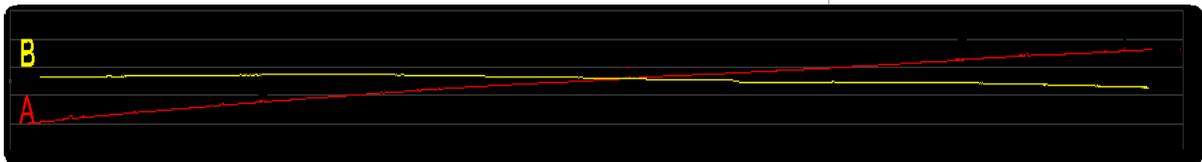
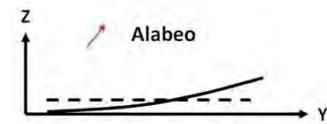
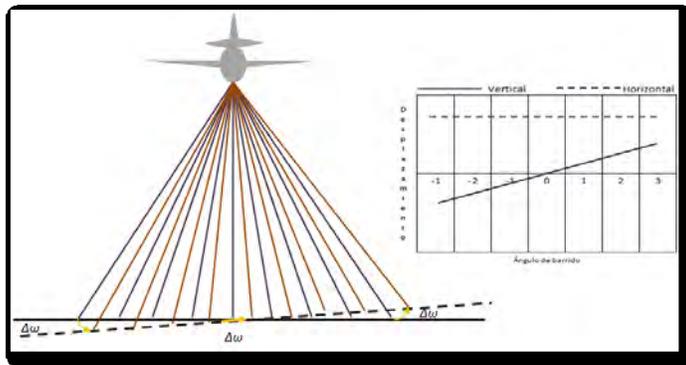


Imagen 2.9. Desalineación por Alabeo (vista de perfil líneas voladas en sentido inverso)

Cabeceo (pitch)

Es la desalineación en radianes sobre el eje Y, entre la IMU y el láser (Imagen 2.10.) provoca un plano horizontal “hundido”, se puede observar por el desplazamiento de los datos hacia adelante o hacia atrás en referencia con el sentido de vuelo y, al contrario del error por alabeo, no se aprecia sobre superficies planas.

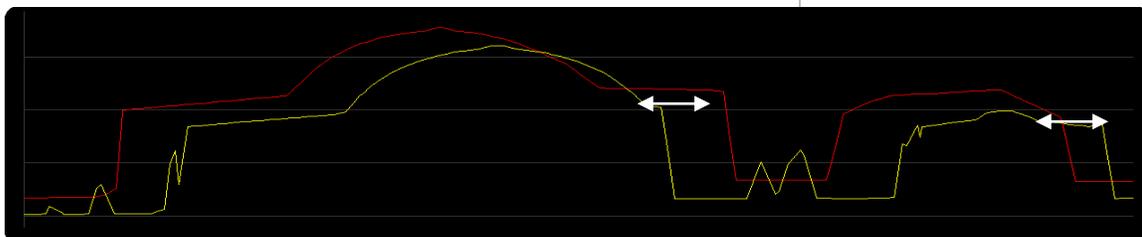
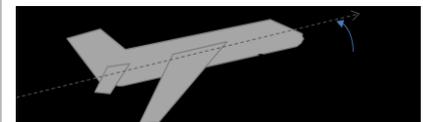
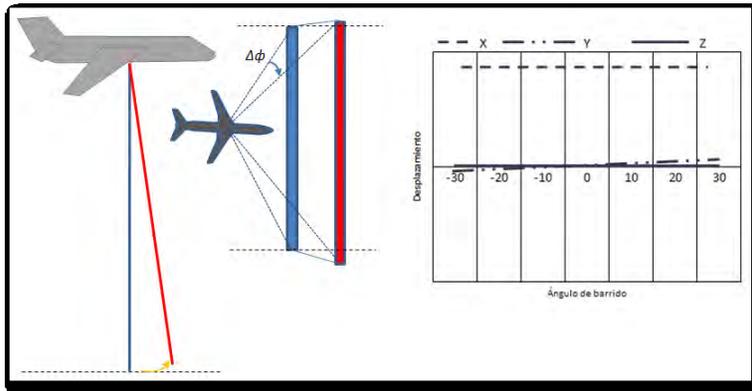


Imagen 2.10. Desalineación por cabeceo en un perfil líneas voladas en sentido inverso

Pendiente por Cabeceo

Se define como una diferencia en el cabeceo entre la mitad del ancho de barrido y el borde del mismo, debido a que la superficie del espejo giratorio no es exactamente plana. En este caso, las líneas escaneadas no son rectas sino que están un poco curvadas (Imagen 2.11.) La pendiente del error por cabeceo se determina en radianes por grado.

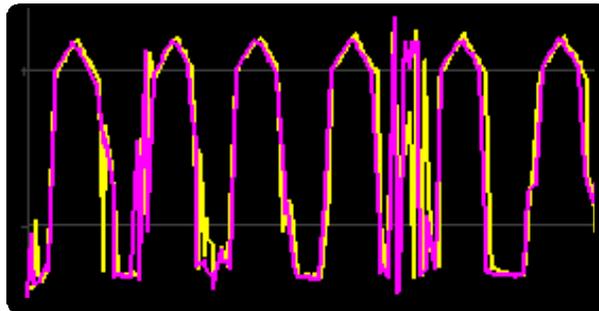
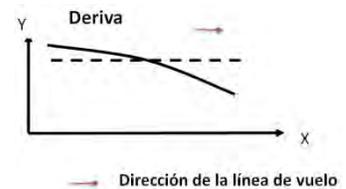
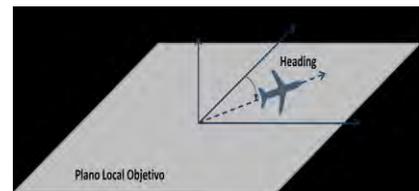
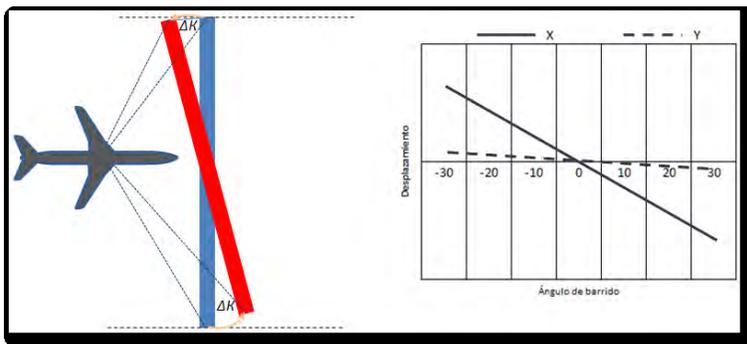


Imagen 2.11. Pendiente por cabeceo

Deriva (heading)

Corresponde a la desalineación, en radianes, sobre el eje Z entre la IMU y el láser (Imagen 2.12.) provoca **Plano horizontal "girado"**, una rotación positiva moverá los datos hacia adelante a la izquierda o hacia atrás a la derecha, una rotación negativa moverá los datos hacia adelante a la derecha y hacia atrás a la izquierda.



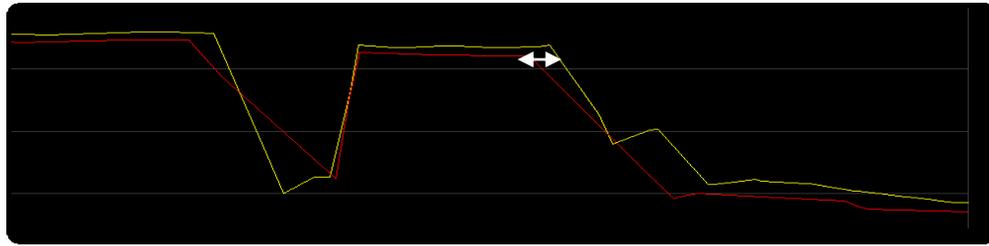


Imagen 2.12. Presencia del error por Deriva

Torsión

Se relaciona con la elasticidad o cuerda del eje del espejo conforme acelera o desacelera (Imagen 2.13.) Es máximo en el extremo del ancho de barrido y se origina cuando el espejo de escaneo está en aceleración máxima ocasionando que su ángulo real difiera con el determinado por el codificador. Provoca que el plano horizontal se eleve o se hunda en sus extremos, así como un desplazamiento en X, Y de los datos. No existe efecto de torsión en el centro del ancho de barrido, la aceleración del espejo es igual a cero. Cuando hay torsión, en las orillas del barrido se genera una disposición de los puntos en forma de "sonrisa" o su efecto contrario de "ceño".

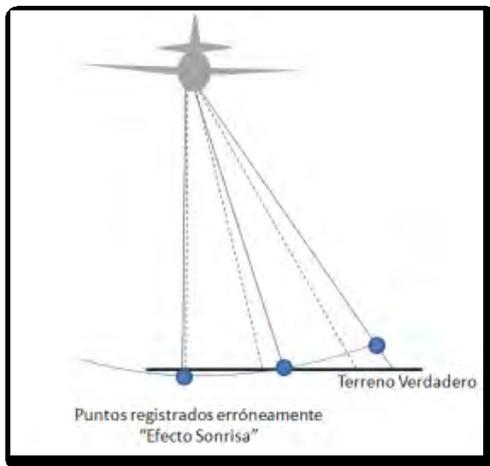
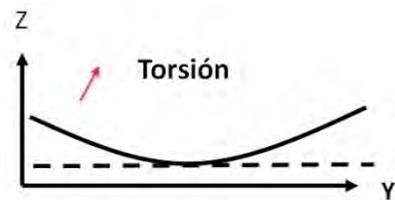


Imagen 2.13. Efecto por Torsión



Error de distancia

Ocurre por un retraso eléctrico del tiempo dentro del conjunto del escáner que podría llevar a un desplazamiento constante en la distancia medida, (Imagen 2.14.) Para

determinar la magnitud de este error, es necesario realizar una comparación entre los puntos obtenidos con el sistema y puntos de apoyo terrestre sobre una zona plana a lo largo del ancho de barrido de líneas levantadas.

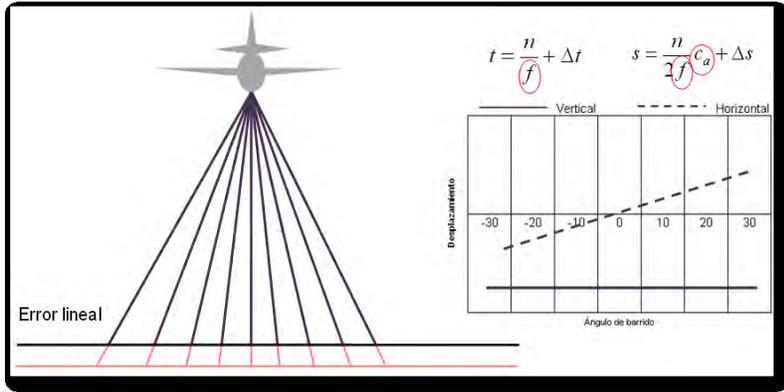
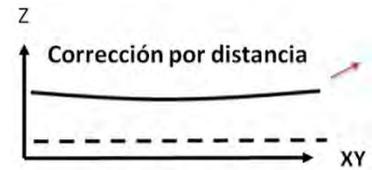


Imagen 2.14. Error por Distancia



Detalle

Error de intensidad

Se aplica cuando la velocidad del impulso láser cambia por la respuesta de los objetos en que incide y puede estimarse la distancia menor o mayor que la verdadera, en una superficie oscura los regresos son más lentos y la distancia aparentará ser mayor y en una superficie más clara es menor. Para su corrección, se genera una tabla de la IBRC (corrección de la distancia basada en la intensidad) con los valores de alcance por cada margen de intensidad. La tabla que se genere mostrará una cantidad a restar de la corrección de la distancia para cada intensidad de 0 a 255.

Error en escala

Provoca distorsión **en acerico (en alfiletero) o "almohadilla" (pillow)** y variación del ancho de pasada.

Métodos de calibración

No existen procedimientos estandarizados de calibración, se podrían hacer calibraciones todos los días, al principio y al final de proyectos largos.

Para determinar los parámetros de calibración, se deben reunir los datos de las pasadas superpuestas en una superficie conocida. Los errores de una desalineación y los errores del escáner se relacionan con la dirección del vuelo. Si las franjas se vuelan en dirección opuesta se hacen más evidentes los errores.

La calibración puede ser completa con vuelos repetidos con diferente constelación GPS y a diferentes alturas; o bien, comprobación de la calibración a la altura del proyecto. Las calibraciones sobre área plana se deben realizar a la misma altitud a la que se volarán los proyectos.

Antes del vuelo se debe realizar un análisis de las condiciones de recepción de datos GPS en vuelo y en Tierra, tales como cantidad mínima y máxima de satélites, valores de geometría satelital, relación señal ruido, entre otros.

Un aspecto clave que es necesario cuidar para que no sea fuente de errores engañosos es la medición de la separación entre la IMU y la antena GPS y se realiza por lo general con estaciones totales; el objetivo del procedimiento de medición es encontrar la relación espacial. Las diferencias obtenidas o corrimientos en tres dimensiones se aplican en el posproceso de los datos para garantizar la exactitud posicional de los millones de puntos láser. Errores significativos originarán errores en las posiciones de los puntos.

Las diferencias o corrimientos en tres dimensiones entre el láser y el INS se resuelven posteriormente al vuelo de colecta de datos.

En la actualidad no existen métodos normalizados para realizar una calibración, no obstante el conocimiento de diversos métodos y técnicas aportan información para la toma de decisiones y se adaptan a procedimientos propios de acuerdo a las características del sensor con que se cuente, el tipo de aeronave, la línea de producción cartográfica, las dimensiones territoriales a cubrir, entre otros, que permiten prever y detectar necesidades de calibración.

De manera general y sin abordar los aspectos matemáticos correspondientes, se describen brevemente algunos métodos de calibración, extraídos de diversos documentos técnicos, que sirven como referencia obligada para determinar con mayor eficiencia y eficacia un procedimiento particular de calibración que asegure la completitud y continuidad de la nube de puntos.

El ajuste manual es un método de calibración cada vez menos recomendable, para hacerlo se requiere que el sensor vuele sobre una superficie conocida o tenga puntos de control. A partir de lo anterior, se hacen comparaciones de los datos en la franja volada mediante perfiles, de existir desalineación los efectos serán visibles por la desviación de los perfiles que se comparan, entonces se aplican correcciones manuales y se realiza un nuevo procesamiento de los datos y así sucesivamente. Los parámetros se van cambiando hasta que las áreas traslapadas coinciden; se seleccionan las áreas más planas posibles para poder corregir el alabeo y el cabeceo. Para la deriva, es necesario seleccionar áreas que contengan elementos de naturaleza antrópica con elevaciones altas; se usan dos líneas de vuelo, cada línea toma un lado del objeto seleccionado, se busca corregir la distorsión del objeto cambiando el parámetro de deriva y observando las distorsiones, se continúa hasta hacer coincidir los lados del objeto.

Conforme se estiman los ángulos de desalineación, se van estimando los errores del escáner que son apreciables por la distorsión sistemática del perfil de datos con relación a la superficie de control seleccionada, se debe continuar aplicando correcciones dependiendo del modelo del error utilizado en el sensor hasta lograr obtener superficies suavizadas. Aunque efectivo, el método implica mucho tiempo hombre-máquina y no se cuenta con datos estadísticos que hagan fiable la calibración ante la posibilidad de que existan errores locales o variaciones drásticas en la superficie observada, la solución no considera a todo el conjunto de datos.

Otro método propuesto se enfoca en la calibración de la desalineación de la mira, propuesto por Vaughn y colab. (1996) y Krabill y colab. (2000). Se trata de coleccionar datos sobre una superficie de nivel (cuerpo de agua) o una superficie bien conocida,

para luego variar los grados del alabeo y el cabeceo, correlacionando las mediciones de distancia de la superficie seleccionada y así derivar las estimaciones para la desalineación de alabeo y cabeceo. La desventaja de este método es que los errores de deriva no se pueden recuperar con facilidad.

El método de calibración más analítico busca modelar los efectos de la desalineación dentro de una ecuación de observación y efectuar un ajuste por mínimos cuadrados. Aunque los datos láser tienen una proyección central los puntos de control son difíciles de medir debido a que cada punto láser se toma en una época distinta provocando que sea imposible obtener una solución de posición y orientación derivada de las observaciones. Sin embargo, los autores consideran la posibilidad de combinar los puntos de épocas distintas para recuperar los efectos sistemáticos de los errores de calibración.

Algo destacable de tomar en cuenta es que los puntos láser se distribuyen en un patrón pseudoaleatorio en el terreno y no tienen conectividad como en una imagen donde cada pixel está conectado a otro y tiene ciertas relaciones de vecindad. Actualmente no hay forma de dirigir el escáner a un determinado punto de control para ayudar en la calibración, además de que su resolución es baja derivado de la divergencia del rayo láser al contacto con el terreno. Aunque los puntos de control sean impactados por el láser, las mediciones serían imprecisas derivadas del tamaño de la huella que provoca que los bordes no sean claros.

No obstante, los parámetros desconocidos se pueden modelar de manera explícita y estocástica con análisis directo y estadístico de sus efectos, a partir de este método han surgido varias propuestas de calibración adicionales.

El Departamento Holandés de Servicios Geodésicos propuso un método sencillo (Crombaghs, Brugelmann, de Min, 2000) que resuelve la desalineación de alabeo y cabeceo. En este método, las diferencias entre las franjas de traslape se modelan con una superficie de tres parámetros, las coordenadas del punto en el marco de franjas local, la desviación vertical de la franja y los parámetros de alabeo y cabeceo. Se

utilizan observaciones hechas de parches de datos (nubes de puntos) del sistema láser aerotransportado. La elevación resultante provee un promedio con una exactitud mayor a la de puntos individuales. Se introducen los puntos de liga en la ecuación de mínimos cuadrados y se van resolviendo los parámetros para cada franja, en su caso se añaden los puntos de control, de estar disponibles para la solución. Cuando no se tiene control se busca que las franjas se obtengan con las mayores diferencias entre ellas. Los resultados arrojaron una reducción en errores de traslape; sin embargo requiere modelación adicional del error de deriva.

En un método de calibración descrito por Burman (2000), se añade la desalineación de la deriva y también se incluyen los errores atmosféricos GPS (variación del dátum). Más que resolver los parámetros lineales, este método describe los ángulos de mira como una matriz de rotación. Este método se puede implementar con o sin control terrestre. Sin el control terrestre, no se puede determinar el error del dátum, por lo tanto se considera que sea cero. A diferencia del método anterior, basado en la superficie de nivel, este método aprovecha las superficies inclinadas para determinar la desalineación. Con estas superficies, las diferencias más grandes se pueden ver en el traslape de las franjas. Los puntos de interés para los puntos de liga se encontraron pasando un detector de bordes Sobel sobre una imagen de altura rasterizada. Sin embargo, la vegetación y las estructuras irregulares sobre la superficie interfirieron con la extracción automatizada de puntos. Se necesitó la intervención manual para obtener puntos de observación apropiados. Los puntos correspondientes se encontrarían en las otras franjas y las observaciones se integrarían a una ecuación de mínimos cuadrados. Se resuelve un conjunto de ángulos de desalineación para el conjunto entero de datos. Sin embargo, el análisis de los resultados indicará otras fuentes de error.

En otro método, se realiza el incremento de parámetros para incluir las velocidades de deriva del INS. Presentado por Behan, Maas y Vosselman (2000) como el método de Crombaghs, emplea puntos de liga en un marco local de coordenadas; necesita que los puntos de control terrestre dentro del área de la comisión resuelvan 9 parámetros por

franja. Los autores tratan de aplicar un algoritmo de extracción de puntos de liga automatizados para buscar los gradientes en los datos de elevación. Sin embargo, debido a los problemas asociados con la oclusión y la resolución, se recurre a observaciones manuales. Sus resultados mostraron la mayor reducción en el error residual. Sin embargo, como se resolvieron los parámetros con base en las franjas, este método no es una verdadera calibración de los errores sistemáticos, sino un ajuste polinómico subsecuente a la comisión aérea.

Un método propuesto por Morín (2002) consiste en permitir la determinación de los ángulos de desalineación de la mira en el nivel global más que en el de franjas. El modelo de calibración comienza con la ecuación de observación simple del sistema LiDAR. La ecuación es el modelo base del que se pueden añadir los parámetros adicionales. Para agregar un parámetro para el error del escáner debido a la torsión, se debe expandir el ángulo del escáner.

Los parámetros desconocidos se pueden resolver observando los puntos de control en los datos del Sistema Láser Aerotransportado. El uso de los puntos de control cuenta con que se va a formar un modelo de mínimos cuadrados paramétrico y se va a encontrar una solución única para los parámetros de calibración. Sin embargo, aconseja implementar un método de calibración que no se basa en los puntos de control terrestre conocidos.

Una forma de resolver la ecuación de observación es analizar rasgos diferentes aunque no controlados en el área de traslape. Estos rasgos podrían ser semejantes a los usados en la fotogrametría convencional como marcas de caminos; sin embargo se deben evitar los rasgos no continuos, como bordes de construcciones debido a la posibilidad incrementada de una mala medición. Los errores de calibración dan como resultado discrepancias de coordenadas entre los rasgos comunes. Por lo tanto, se puede encontrar una solución de calibración al disminuir estas discrepancias, lo cual implica poder observar un rasgo en al menos cuatro franjas con traslape.

Si los efectos de los errores de calibración no se relacionan en las observaciones de rasgos, el promedio de las coordenadas de rasgos debería estar cercano al valor de la posición verdadera.

La discrepancia entre la posición media y la posición observada del punto viene a ser la información del cierre defectuoso necesaria para resolver los parámetros desconocidos mediante la solución por mínimos cuadrados, usando la forma paramétrica (Krakiwsky y Abousalem, 1995; Kuang, 1996)

Como modelo no lineal, este procedimiento se debe iterar hasta que haya convergido una solución, es decir, si el sensor IMU se orienta aproximadamente al marco del láser, los ángulos de mira deberían ser muy pequeños. Un aproximado inicial de 0 para los ángulos de mira debería bastar para comenzar el proceso de iteración. La calidad de los resultados depende de una cantidad suficiente de descorrelación de los errores de calibración en las posiciones de rasgos observadas. A su vez, esto depende de las características de los datos determinadas por la planificación del vuelo.

El sistema de navegación inercial se tiene que inicializar para que pueda detectar y establecer el marco local de nivel. Por lo general, se efectúa manteniendo estable la plataforma ALS (Airborne Laser Scanner, por sus siglas en Inglés) y permitiendo que los giróscopos INS detecten el marco local de nivel (Shwartz y Wei, 2000). En las áreas de ondulación geoidal significativa, la inicialización INS puede afectarse mediante una deflexión grande de la vertical. Esta deflexión tendrá sesgo el resto de la solución de navegación. Para compensar, las correcciones se pueden introducir durante la integración de los datos de navegación con los datos de distancia, o se pueden ajustar dentro del ajuste de franjas subsecuente a la comisión.

Como se ha podido observar en los casos retomados de otros autores, se trata de diseñar el modelado matemático a partir de datos existentes. En todos los casos se observa la combinación y la complementación de aspectos manuales y automatizados, por lo que podemos resumir que los métodos generales de los cuales se derivan otros métodos o técnicas de calibración son:

1. Manual

- a) Prueba y error, se aplica a perfiles de franjas superpuestas y consiste en definir valores de los parámetros, de manera interactiva, hasta llegar a un ajuste de los puntos, entre las diferentes pasadas que se ajusten visualmente; tienen el inconveniente de consumo de tiempo excesivo y un mayor esfuerzo, no se obtienen datos estadísticos.
- b) Manual determinístico, a través de cálculos geométricos se hace la estimación de los valores de los parámetros

A pesar de la necesidad de cada sistema ALS para determinar estos parámetros de calibración, no hay actualmente ningún método estándar.

- 2. Automático, no requiere ningún control de tierra y se basa en el uso de tres o más franjas traslapadas y voladas en diferentes direcciones. Las diferencias de superficie de las distintas franjas sobre la misma área se consideran como observaciones y se formula un ajuste para determinar los ángulos de desalineación de la mira.

En general, todos los métodos de calibración requieren el acopio de datos especiales que incluyen el diseño geométrico de vuelo.

Capítulo 3 LiDAR en el INEGI

El INEGI ha implementado diversas fuentes de percepción remota para asegurar la generación de productos cartográficos útiles en la toma de decisiones relacionadas con el desarrollo nacional en diversos campos. A partir del 2004, se incorporó el uso de la tecnología. Su principal aplicación, hasta ahora, es la generación de Modelos Digitales de Elevación. Actualmente se disponen de dos sistemas los cuales se muestran en las imágenes 3.1.



Imagen 3.1 Modelos de sensores LiDAR en el INEGI

La línea de producción conlleva la realización de levantamientos de campo sobre determinadas regiones, definidas mediante unidades o bloques de producción (Imagen 3.2.), su finalidad es generar soluciones geomáticas para aplicar estrategias y programas de evaluación, atención y mitigación de desastres naturales, principalmente.

La aplicación de la tecnología en todo proyecto exige el conocimiento técnico y geográfico; en la parte geográfica se debe estudiar la caracterización del proyecto por lo que es esencial conocer la extensión y la región fisiográfica del país donde se realizará el levantamiento, identificar condiciones climáticas y meteorológicas, aspectos demográficos, entre otros aspectos.

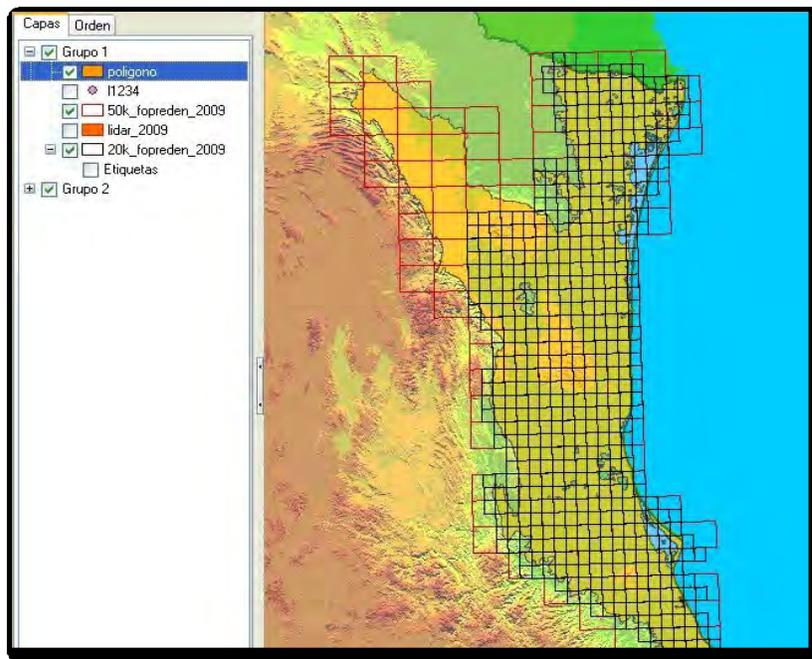


Imagen 3.2. Bloques de producción LiDAR en ambiente SIG

La caracterización de un proyecto (Imagen 3.3.) permite una mejor toma de decisiones con respecto a las mejores épocas del año para trabajar, determinación de costos operativos, identificación de las condiciones de operación considerando tipo de suelos, vegetación, clima, población, fenómenos naturales recurrentes en la región, entre otros aspectos.



Imagen 3.3. Detalle de caracterización de un proyecto LiDAR

La Llanura Costera del Golfo Norte se extiende desde el Río Bravo hasta la zona Nautla, Ver.; abarca partes de los estados de Tamaulipas, Nuevo León., San Luis Potosí, Hidalgo y Veracruz.

La altitud promedio de esta provincia es de 400 msnm y corresponde a una clara costa de emersión.

Debido a la extensión de su litoral y a que parte de su superficie está próxima al nivel del mar y cubierta de material aluvial, se requiere de una precisa definición geográfica de los rasgos del relieve, así como de la infraestructura presente.

Todo proyecto se delimita bajo una planeación estratégica y se calendarizan las actividades (Imagen 3.4.) tendientes a la integración de una solución geomática.

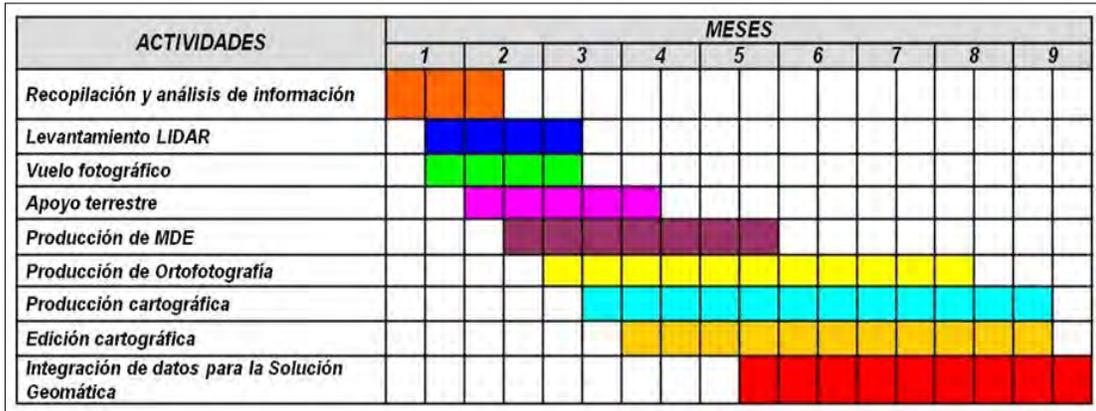


Imagen 3.4. Cronograma general de un proyecto LiDAR

Línea de Producción LiDAR

Las etapas dentro de la línea de producción se ilustran mediante el diagrama de la Imagen 3.5., los rectángulos punteados señalan áreas en continua revisión y mejora.

Dentro de las actividades geodésicas, la línea de producción exige generar índices cartográficos. Con apoyo de un SIG se añade el Marco Geoestadístico Estatal del INEGI, vías de comunicación, líneas del Sistema Nacional de Fotografía Aérea (SINFA), Catálogo de Integración General de Localidades (CIGEL), localidades urbanas, cuerpos de agua, aeropuertos, entre otras, que facilitan el control de cobertura y verificación de la calidad de los datos.

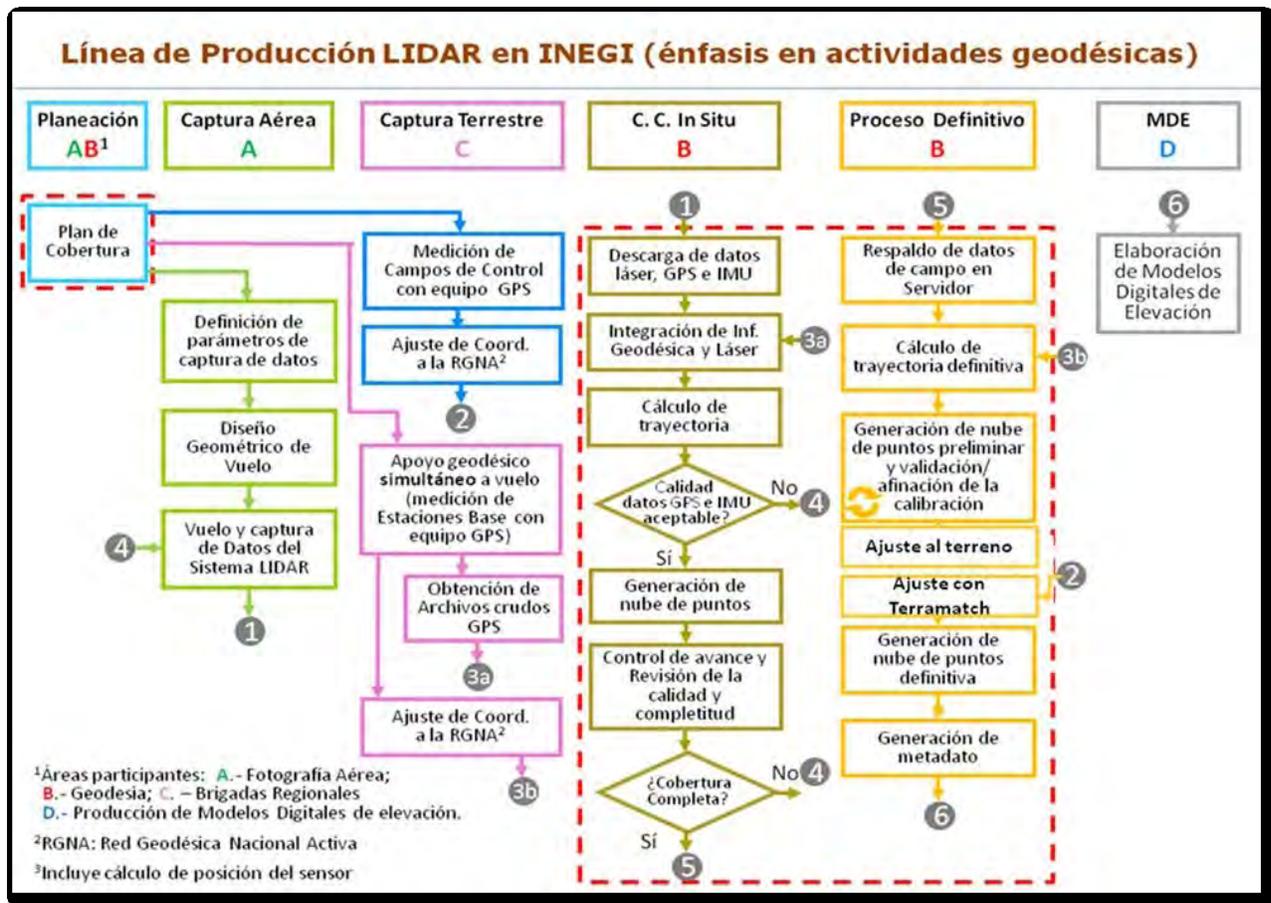


Imagen 3.5. Modelo de producción con énfasis en actividades geodésicas

Flujo de trabajo general

Con el apoyo de la imagen 3.5., se pueden observar, en términos generales, tres etapas de trabajo en el proceso, la primera consiste en la captura o colecta de datos en la que se pone en operación una o varias estaciones GPS para el registro de datos DGPS paralelamente a la Operación Aérea, en la cual se realiza el registro de datos de posición (GPS y la IMU), los registros de datos del escáner (rango, ángulo de escaneo, intensidad y tiempo). En forma simultánea (segunda etapa) se realiza el procedimiento de Control de Calidad en Sitio, en la que se revisa la calidad y completitud de los datos colectados para encontrar sistemáticas, huecos de información, falta de traslape entre líneas por incorrecta trayectoria de la plataforma o por relieve o presencia de: cuerpos de agua, ceniza volcánica, asfalto reciente, entre otras posibilidades. En la tercera etapa se realiza el procesamiento de los datos DGPS y de la trayectoria, para

obtener un archivo de posición y orientación; agregándose los archivos crudos de láser se realiza el procesamiento para generar una nube de puntos ajustados al terreno, ligados al sistema geodésico de referencia oficial; durante el proceso se revisa nuevamente la presencia de sistemáticas para asegurar que los valores de calibración son correctos, en su caso ejecutar el procedimiento para obtener nuevos valores de calibración y reprocesamiento de los datos hasta generar la nube de puntos ajustada al terreno y usarla como insumo para la producción de MDE.

Uso del GPS en la línea de producción

En los proyectos se utilizan equipos GPS geodésicos de doble frecuencia. La combinación del rastreo aerotransportado con el uso de una o varias bases terrestres estratégicamente permite garantizar la posición de los datos (cálculo de trayectoria) mediante un procesamiento diferencial. Mientras que los campos de control se utilizan para el ajuste de la nube de puntos.

La unidad de planeación (Imagen 3.6.) está determinada por bloques de cuatro cartas en la escala 1:50 000 (superficie aproximada de 4 000 Km²). La gestión de cada proyecto se realiza con apoyo de un sistema de control por línea de barrido, a través de un programa que genera índices, por día y proyecto. Se establece un registro de fecha de captura y parámetros de configuración utilizados para la colecta de datos; se identifican las líneas que presentan alguna problemática o que requieran de un tratamiento especial (Imagen 3.7.)



Imagen 3.6. Delimitación de proyecto por bloques cartográficos

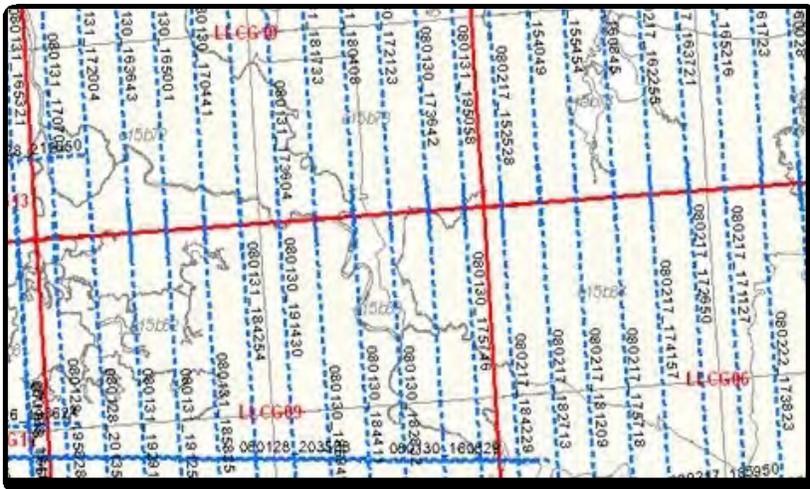


Imagen 3.7. Control de producción por línea de barrido

Mediante un procedimiento de validación digital, se confirman los parámetros de procesamiento y los resultados del cálculo de las trayectorias de vuelo. La revisión de la completitud y de la calidad de los datos se realiza con plantillas para el tratamiento de la nube de puntos. El ajuste a campos de control (Imagen 3.8.) se realiza mediante un procedimiento que consiste en ajustar las líneas transversales que se aplican después del ajuste de cada línea de barrido.

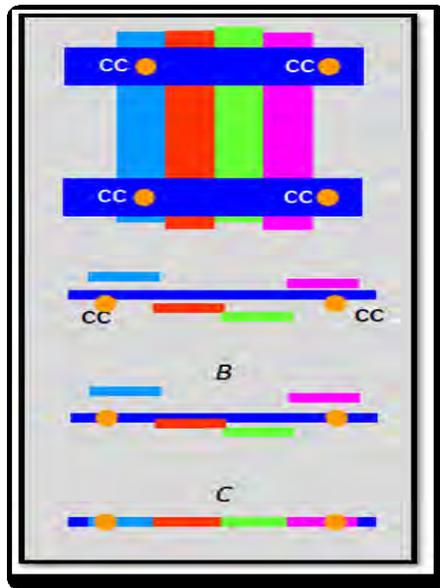


Imagen 3.8. Ajuste de líneas a campos de control

Para cada bloque o unidad de producción se genera su Metadato (Imagen 3.9.)

Nube de Puntos LIDAR ajustada al Terreno, Bloque conformado por las cartas 1:50,000: E15B66, E15B67, E15B76, E15B77

Metadata also available as

Metadata:

- [Identification Information](#)
- [Data Quality Information](#)
- [Spatial Data Organization Information](#)
- [Spatial Reference Information](#)
- [Entity and Attribute Information](#)
- [Distribution Information](#)
- [Metadata Reference Information](#)

Imagen 3.9. Detalle de metadato de nube de puntos

Productos

A continuación se describen algunos de los principales productos derivados dentro de la línea de producción aplicando la tecnología:

Nube de Puntos LiDAR Ajustada al Terreno

A continuación se presenta la superficie de producción por año (Imagen 3.10.), así como por modelo de sistema en el periodo 2004-2010 (Imagen 3.11.) en el INEGI.

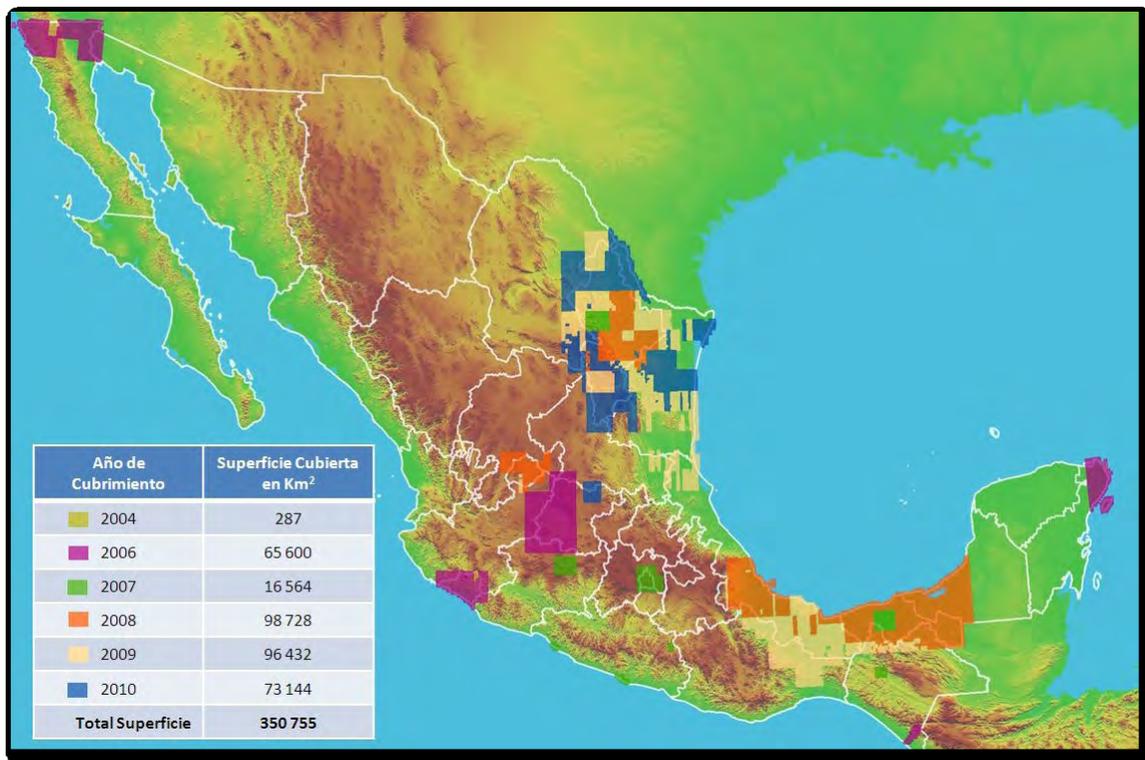


Imagen 3.10. Superficie de producción 2004-2010

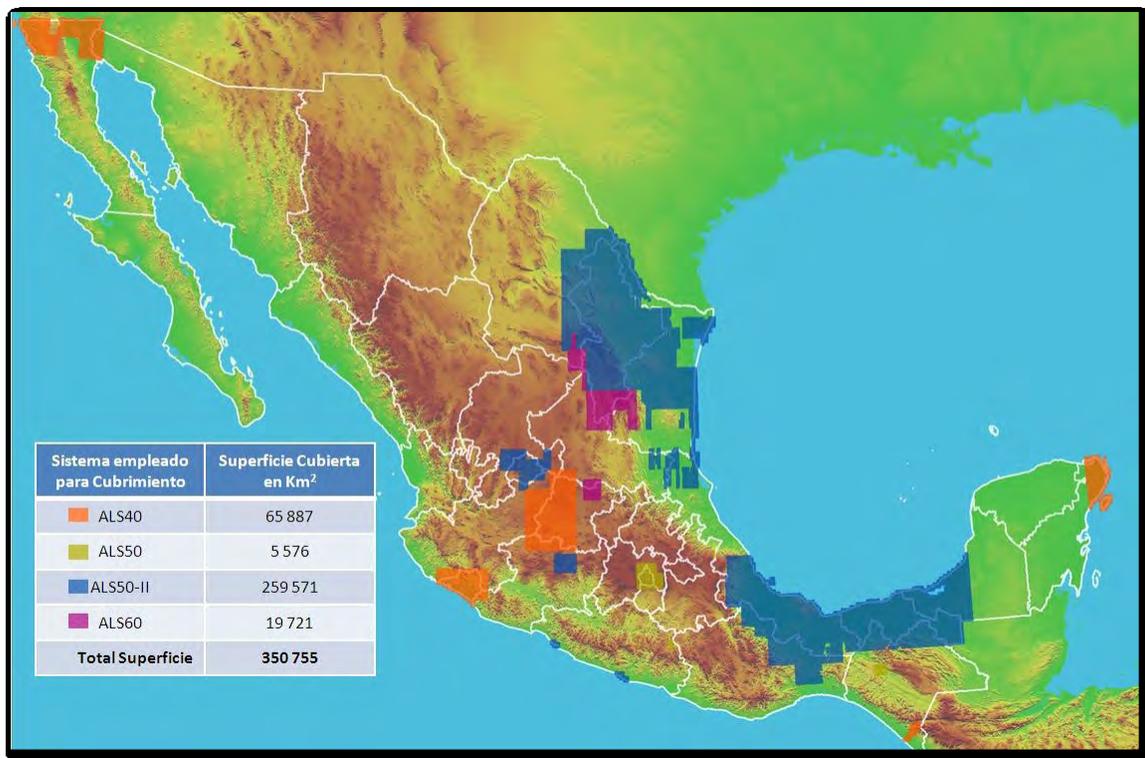


Imagen 3.11. Superficie de producción por modelo de sensor

Datos Láser nativos

Constituyen una nube irregular de puntos con cierta densidad por metro cuadrado de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

Imágenes generadas con niveles de Intensidad

Son imágenes georreferenciadas, los valores de intensidad se despliegan en escala de grises que permite distinguir diferentes tipos de superficies (Imagen 3.12.), se pueden aplicar como Imagen auxiliar en la edición manual para aumentar la calidad de la filtración y de la clasificación de la nube de puntos Láser; no obstante se debe investigar más sobre mayores utilidades y generación de nuevos productos posibles de obtener a partir de ellas.



Imagen 3.12. Imagen de intensidad (Aeropuerto Toluca, EDOMEX)

Modelos Digitales de Elevación (MDE)

Los modelos digitales de elevación (Imagen 3.13.) se dividen en Modelo Digital de superficie (MDS) y Modelo Digital del terreno (MDT), son útiles para el análisis de pendientes y masas con relación a la prevención y la mitigación de desastres naturales, tales como erupciones volcánicas, desbordamiento de ríos o presas, entradas de agua marina a porciones de masas continentales, huracanes, terremotos, y todo con un gran nivel de detalle.

Al contar con un MDT con alta resolución se logran generar curvas de nivel para representar la altimetría del terreno en determinadas zonas geográficas representada en cartografía de diversas escalas y de manera digital en sistemas de información geográfica o aplicaciones geomáticas. Se obtienen interpolando los puntos del último impulso, eliminando los puntos que no pertenecen al terreno.

Los MDS, se obtienen interpolando los puntos del primer impulso, que almacenan la cota más alta sobre la superficie terrestre.

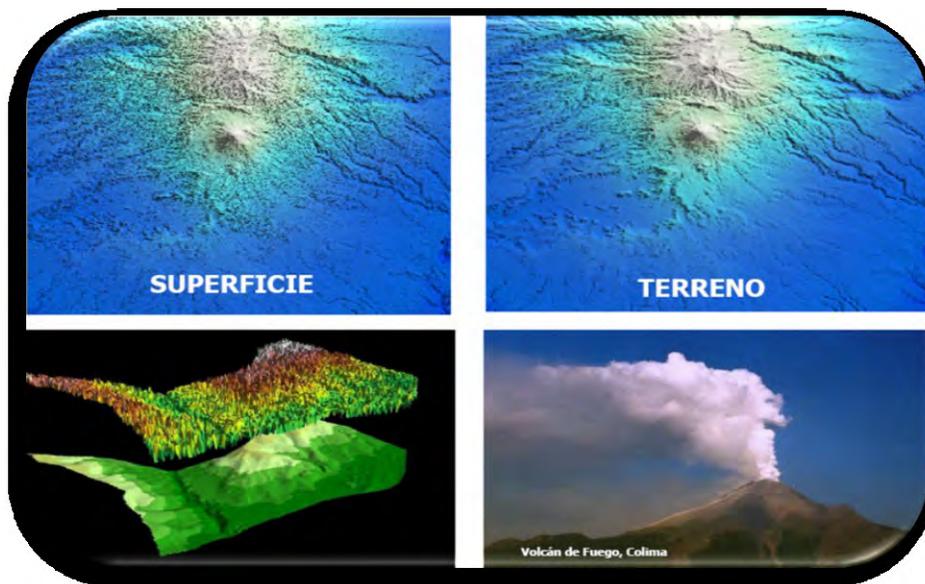


Imagen 3.13. Representación de Modelo de Superficie y del Terreno del Volcán de Fuego, Colima

Descripción de los datos Láser colectados

Los datos crudos son una serie de puntos almacenados como X, Y, Z; la latitud y la longitud se representan por X, Y; la elevación se obtiene en metros y está representada por Z. Se obtiene un archivo en formato ASCII. Los archivos son extremadamente grandes, de varios millones de puntos, representan el cubrimiento y barrido de una determinada área. En la tabla 3.1., se muestra un ejemplo del tamaño aproximado de archivos LIDAR por kilómetro cuadrado de datos crudos respecto a su resolución.

Área	Resolución (metros)				
	1	2	3	4	5
1 km²	30 MB	7.5 MB	3 MB	2 MB	1 MB

Tabla 3.1. Tamaño de archivos LiDAR

El formato más típico de archivos es el denominado *.LAS, es un formato binario público para el intercambio de datos entre proveedores y clientes, es una alternativa para los sistemas propietarios o para un sistema de intercambio de archivos ASCII que utilizan diferentes compañías. El problema con los sistemas propietarios dificulta pasar los datos de un sistema a otro. Existen dos problemas importantes con el intercambio de archivos ASCII. El primer problema es el rendimiento, porque la lectura e interpretación de los datos de elevación ASCII puede ser muy lenta y el tamaño del archivo extremadamente grande, incluso para cantidades pequeñas de datos. El segundo problema es que se pierde toda la información específica para los datos LiDAR. El formato *.LAS permite que el hardware para procesos LiDAR soporte más fácil el tamaño de los archivos y los requerimientos de memoria para el procesamiento de los datos (tabla 3.2.)

Área	Resolución (metros)				
	1	2	3	4	5
1 km²	4 MB	1 MB	0.4 MB	0.25 MB	0.15 MB

Tabla 3.2. Tamaño de archivos LAS por unidad

Otra representación de los datos LiDAR es como contornos lineales. Las líneas pueden ser almacenadas en diferentes formatos de archivos CAD y SIG. Una forma más de representación es mediante Modelos Digitales de Elevación. El formato es de tipo ráster con una matriz (rejilla) compuesta de columnas y filas. Cada celda tiene un tamaño fijo que representa una realidad sobre el terreno; cada celda contiene la elevación media calculada del área del terreno representado por una celda con datos LiDAR. Las formas de representar los datos van en aumento, como podría ser una red irregular de triángulos y perfiles.

Configuración de levantamientos y tamaño de archivos

Las configuraciones básicas del sistema por tipo de sensor disponible se muestran en la tabla 3.3., mismas que se refieren al ángulo de apertura del escáner, la tasa de pulso del láser y la tasa de escaneo.

Configuraciones del sistema	ALS-50		ALS-60	
	Min	Max	Min	Max
Field of view	0°	75°	0°	75°
Laser Pulse Rate	20 Khz	150 Khz	20 Khz	200 Khz
Laser current	Variable		Variable	
Scan Rate	10 hz	90 hz	10 hz	100 hz

Tabla 3.3. Rango de valores configurables para colecta de datos LiDAR

Dependiendo de las configuraciones y el tipo de sensor, el tamaño de los archivos crudos y procesados variará; no obstante en un muestreo de 100 líneas para cada tipo de sensor se obtuvieron los promedios mostrados en la tabla 3.4.

Promedio de almacenamiento (MB)	ALS50-II	ALS60
Por línea de datos crudos	376	432
Por línea ajustada	376	432
Total de almacenamiento	752	864
Cantidad de líneas por bloque	13	19
Promedio de almacenamiento por bloque	9 776 MB	16 416 MB
Altura de vuelo de muestreo (m)	5 800	5 000

Tabla 3.4. Tamaño de archivos por tipo de sensor

Calibración de datos LiDAR en el INEGI

Antecedentes

La primera incursión en el proceso de calibración de manera independiente se realizó en junio de 2008, al detectarse algunas sistematicidades en los datos ajustados en

zona con relieve pronunciado, dentro de un proyecto en el Estado de Nuevo León, por lo que se determinó afinar la calibración realizada al sensor ALS50-II el 31 de octubre de 2007, en el Aeropuerto Jesús Terán Peredo del estado de Aguascalientes.

En el ajuste de los datos se detectaron desplazamientos sistemáticos en el área de traslapeo entre líneas. En algunas áreas se observaron diferencias de hasta 1.60 m en altura entre puntos de pasadas paralelas. Las imágenes 3.14. y 3.15., muestran diferencias detectadas entre líneas con superposición.

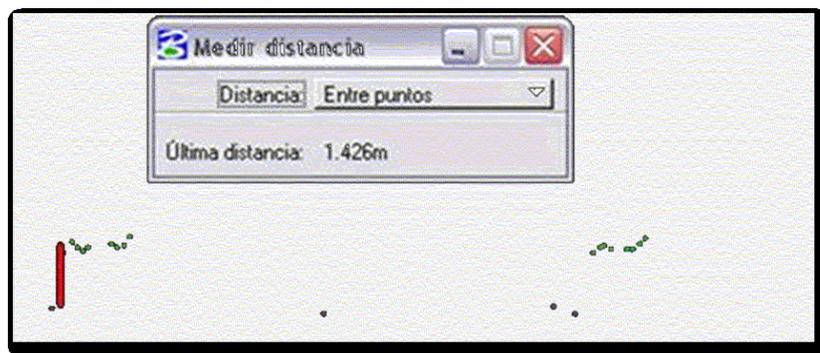


Imagen 3.14. Diferencias altimétricas entre puntos traslapados.



Imagen 3.15. Diferencias altimétricas entre puntos en el lado derecho del traslapeo.

El efecto provocado por el desplazamiento de los puntos ocasionó acanalados en zonas planas y escalonamientos en zonas con pendiente en los Modelos Digitales de Elevación (Imagen 3.16.). Debido a la magnitud de los desajustes en los datos generados a 5 800 m de altura se requirió el diseño y ejecución de un vuelo para el monitoreo y afinación de dichos parámetros para analizar y reducir los errores detectados.

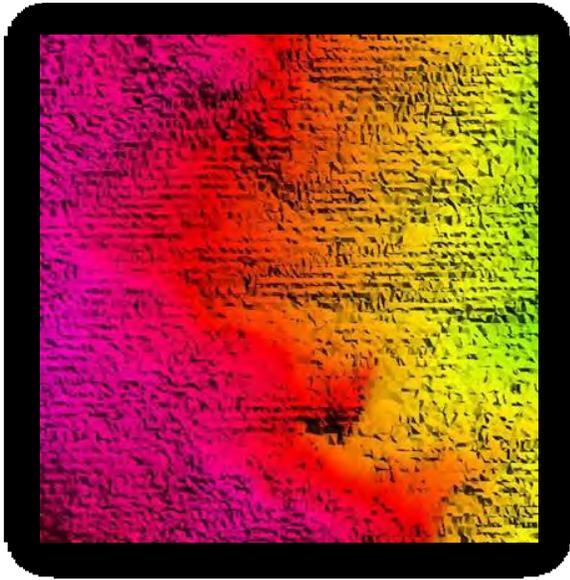


Imagen 3.16. Escalonamiento en el MDE por desplazamiento de puntos en áreas de traslapeo.

El vuelo se realizó el 22 de junio de 2008 sobre el Aeropuerto Internacional General Mariano Escobedo, de la Ciudad de Monterrey.

En la imagen 3.17., se observa el diseño de vuelo y al lado izquierdo las especificaciones del mismo.

Especificaciones de vuelo

- ❖ Longitud de las líneas: entre 6 y 8 km.
- ❖ Ángulo de apertura (FOV): 45°
- ❖ Altura para **A, B y E**, de 700 a 900 m, AGL (Above Ground Level)
- ❖ Líneas **A y B**, superpuestas, eje coincidente con el eje de la pista de vuelo.
- ❖ Dirección de vuelo entre **A y B** en sentido contrario.
- ❖ Línea **E** ortogonal con respecto **A y B**.
- ❖ Altura para **C y D**, de 1 300 a 1 500 m, AGL
- ❖ Eje de vuelo de la Línea **C** sobre la pista de vuelo
- ❖ Traslapeo del 60% entre **D y E**
- ❖ Dirección de vuelo entre **C y D** en sentido contrario.

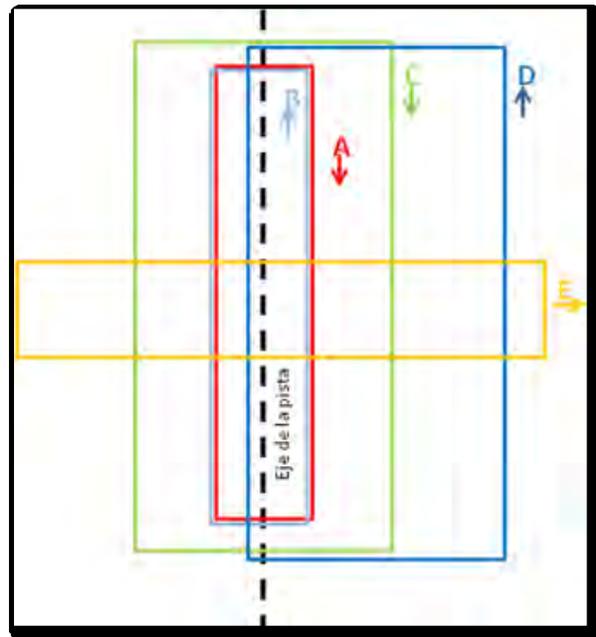


Imagen 3.17. Diseño geométrico del vuelo

Análisis de desplazamientos

En el despliegue de la nube de puntos colectados y procesados, en áreas correspondientes a las zonas de traslapeo, se visualizó un desajuste de algunos de los

parámetros de alineación. Se aplicó la metodología basada en una corrección geométrica por aproximaciones sucesivas recomendada por un especialista de la compañía fabricante del sensor ALS40.

Los parámetros que se ajustaron fueron únicamente alabeo y cabeceo, debido a que no fueron evidentes los errores por desajustes en deriva, torsión y cabeceo por pendiente, por lo que sus valores no se actualizaron. La tabla 3.5., muestra el resumen de la calibración.

	Alabeo	Cabeceo	Deriva	Torsión	Cabeceo por pendiente
Valor Original	0.022890104	0.005511997	0.001710443	85,000	+1.9931e-005
Ajuste	0.000400326	0.000253012	0.0	0.0	0.0
Valor Ajustado	0.023290430	0.005258985	0.001710443	85,000	+1.9931e-005

Tabla 3.5. Afinación de los parámetros de calibración

Resultado

A partir de los parámetros de afinación de la calibración, se obtuvieron nuevamente los archivos *.LAS y MDE, correspondiente a datos de diferentes sesiones de captura; la comparación permitió asegurar que los parámetros fueron debidamente estimados. En la imagen 3.18., se muestran datos anteriores y posteriores a la afinación de calibración. Se observó que los desplazamientos pueden presentarse por un desajuste de los valores en los parámetros de alineación del sensor.

MDE después de la calibración

MDE antes de la calibración

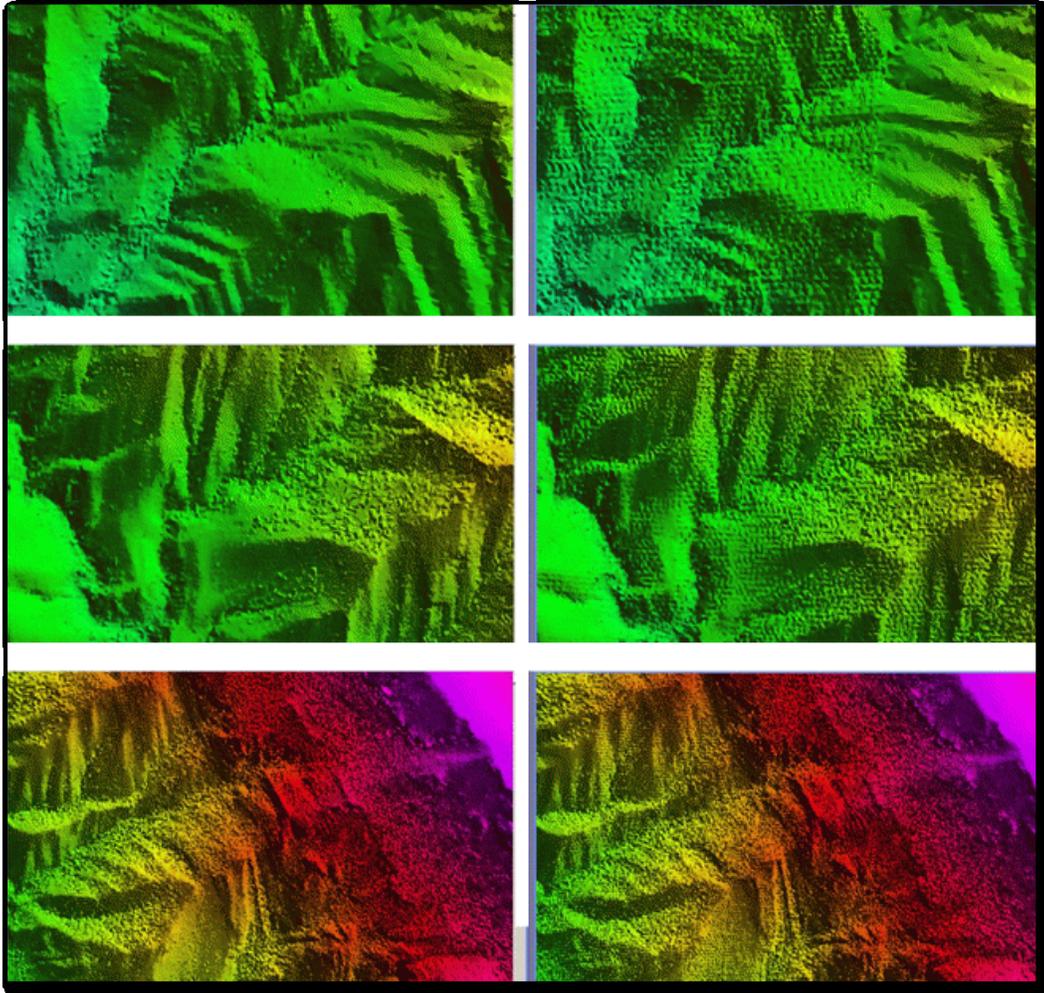


Imagen 3.18. Modelo Digital de Elevación después y antes de afinación

Ubicación de la calibración en la línea de producción LiDAR

La calibración dentro de la línea de producción se muestra en la Tabla 3.6., en la cual se destacan las nueve etapas del proceso de producción, en complemento a lo abordado en el tema “Línea de Producción LiDAR” (Imagen 3.5, página 45).

En la etapa 6, se determina la necesidad de realizar la calibración a partir del análisis de los datos ajustados y el descubrimiento de errores sistemáticos en los mismos.

Etapa	INSUMOS	PROCESOS	PRODUCTOS
			
1	Cartografía, Diseño Geométrico de Vuelo, Planes de Cobertura	Captura de datos	Datos de navegación, Datos GPS, Datos Láser, Imágenes
2	Datos de navegación colectados durante el vuelo	Separación (extracción de datos)	Datos GPS del avión, Datos IMU
3	Datos de estación GPS Base Tierra y Datos GPS del avión	Cálculo de trayectoria de vuelo	Posición corregida de la antena GPS del avión durante el vuelo
4	Posición de la antena GPS del avión y datos IMU	Cálculo de la posición del sensor	Posición del sensor láser durante el vuelo
5	Posición del sensor y datos crudos láser (distancia, ángulo de reflexión, intensidad y tiempo GPS) y archivo de calibración vigente	Generación de archivos LAS preliminares	Archivos LAS (Laser Airborne System)
6	Archivos LAS	Calibración del sensor	Archivo de calibración vigente o iniciar con valores desde cero
7	Posición del sensor y datos láser crudos (distancia, ángulo de reflexión, intensidad y tiempo GPS) y archivo nuevo de calibración	Cálculo de la posición de los puntos en el terreno	Nube de puntos
8	Coordenadas de campos de control y nube de puntos	Reducción del error sistemático de la altura	Nube de puntos corregida
9	Nube de puntos corregida	Generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE)	Modelo Digital de Superficie (MDS). Modelo Digital de Terreno (MDT), imagen de intensidad

Tabla 3.6. Ubicación de la calibración dentro de la línea de producción

Capítulo 4 Modelo experimental

La calibración aquí descrita, para definir un procedimiento general y especificaciones básicas, corresponde a la realizada posterior a la instalación del Sistema ALS50-II en la aeronave Cessna Conquest 441, Matrícula XC-GON, propiedad del INEGI. Se detalla el procedimiento para la determinación de los ángulos de desalineación a partir de los cálculos geométricos realizados con base en la disposición de los puntos en diferentes líneas de vuelo. El procedimiento realizado se adapta a la documentación existente, talleres, cursos de capacitación, experiencia adquirida.

Descripción de la solución

La solución se basa en el procedimiento para la determinación de los ángulos de desalineación entre la cabeza láser y la IMU. En forma complementaria el procedimiento para determinar los errores debidos al propio funcionamiento del sistema (torsión) y la corrección por distancia del sistema.

La solución propuesta se dividió en dos etapas, la primera consistió en la aplicación de un procedimiento a partir de valores preexistentes para la determinación de los ángulos de desalineación mediante cálculos geométricos utilizando puntos LiDAR sobre el terreno, obtenidos con diferentes configuraciones de colecta de datos, principalmente alturas, ángulos de barrido, sentido de vuelo, ancho de pasadas. En la segunda etapa se aplicó un ejercicio de calibración partiendo con valores de cero para cada parámetro de calibración.

Primera etapa.

La calibración se realizó con datos obtenidos sobre una zona predeterminada ya usada con anterioridad, misma que se ubica en la localidad de Tanque de los Jiménez en el estado de Aguascalientes. Dentro de la zona existe una estructura útil para análisis de errores en los datos y sus fuentes, dicha estructura se le identificó **como "El Domo"** (Imagen 4.1.) El procedimiento partió de las experiencias previas aplicadas por

especialistas externos para la calibración del primer sensor utilizado en el INEGI (ALS40)

Características del vuelo para calibración.

Se realizó el diseño geométrico del vuelo, determinándose ángulo de apertura, alturas para cada línea y su sentido de vuelo (N-S, S-N, E-O u O-E). Para comprobar la efectividad de los valores angulares determinados se hizo una comprobación con datos provenientes de líneas de producción colectadas conforme el programa de trabajo regular; es decir con vuelos a 5 800 m y ángulo de barrido de 60°, además de incluir una línea transversal con campos de control GPS para ajustar la nube de puntos.



Imagen 4.1. Domo en zona de calibración

Simultáneamente al vuelo de calibración se estableció apoyo geodésico, empleándose un Vértice de Posicionamiento Horizontal denominado AGU6A, ubicado en las instalaciones del Hangar del INEGI en el aeropuerto Internacional Jesús Terán Peredo en el Estado de Aguascalientes.

Para la identificación y la corrección de los errores por distancia y torsión, se realizaron dos levantamientos de puntos GPS sobre la carretera Aeropuerto-Tanque de los Jiménez, obteniéndose una densidad de puntos suficiente por los métodos estático y

dinámico. Se posicionaron campos de control para la validación del ajuste de los datos colectados a 5 800 m y comprobación de parámetros de calibración.

Pasos generales a seguir en la comprobación:

- Determinación, revisión y validación de los requerimientos de diseño geométrico del vuelo correspondientes a ancho y largo de las pasadas, altura de vuelo, velocidad de desplazamiento, dirección y ángulo y frecuencia de barrido, asegurar que se cuente con un objeto cultural predefinido en todos los ejes y extremos de líneas de barrido, entre otros aspectos complementarios.
- Cálculo de trayectoria, asegurando obtener exactitudes posicionales promedio de 10 cm, en el proceso de corrección diferencial.
- Generación de archivos *.LAS y obtención de valores de Along Track, Cross Track, así como de intensidad, que tengan congruencia con datos de vuelos anteriores antes de calibración.
- Efectuar cálculos hasta obtener resultados satisfactorios para la corrección de los valores de los parámetros del sensor, partiendo de los valores de calibración existentes.

Segunda etapa.

De ser necesario realizar la afinación de la calibración para reducción de efectos sistemáticos no resueltos en la parte inicial, utilizando herramienta informática del programa que se utiliza para generar MDE.

Fundamento

El modelo experimental parte de la detección de efectos sistemáticos en el comportamiento de los datos ajustados.

Al calibrar un instrumento o sistema de medida, se procura ajustarlo con el fin de que tenga la precisión deseada para mejorar la exactitud de los datos que se obtendrán; el proceso de calibración implica la localización de errores en la disposición de los datos

de diferentes pasadas, modelarlos y obtener valores de parámetros para la corrección en posproceso, y de otros parámetros no determinísticos².

En función de la calibración de los datos, se aprovecha el potencial del sistema LiDAR, para obtener la máxima exactitud de los objetos colectados en o sobre el terreno, tales como vegetación y de naturaleza antrópica.

Metodología aplicada

Planeación

- Selección del sitio para coleccionar datos
- Determinación de la cantidad y la exactitud del control terrestre con GPS: campos de control y estaciones base
- Determinación de métodos de levantamiento con GPS
- Plan geométrico del vuelo
- Configuración para colecta de datos

Ejecución para determinación de valores angulares y entrega de resultados

- Vuelo y respaldo de datos
- Proceso de datos
- Ajuste de datos
- Revisión de errores
- Corrección de errores
- Aplicación de valores y reajuste

Validación

- Revisión (en caso necesario, afinación)
- Ajuste final
- Entrega de archivo de calibración (registro)

² Los problemas de toma de decisiones se pueden clasificar por su tipo de respuesta en **Determinísticos**: Conocidos la entrada y el modelo del sistema se puede determinar la salida de un modo preciso; **No determinísticos**: No es posible conocer los estados por los que pasa el sistema y por tanto desconocemos la respuesta (salida); **Probabilísticos**: La respuesta del sistema está sujeto a algún criterio probabilístico; **Difusos**: Dado el valor de la entrada, existe un cierto margen de valores posibles para la salida.

Desarrollo

Especificaciones de vuelo para aeronave Cessna Conquest 441 matrícula XC-GON, se muestra el diseño gráfico del vuelo:

- ❖ Líneas de vuelo: 6
- ❖ **Nomenclatura de las líneas A,B,C,D,D',E**
- ❖ Longitud de las líneas: 6 a 8 km
- ❖ Ángulo de abertura (FOV): 45°
- ❖ Alturas de vuelo por líneas
 - ⊕ A, B y E: entre 700 y 900 m AGL
 - ⊕ **Altura para C, D y D' entre 1 300 y 1 500 m AGL**
- ❖ Sentido y superposición de líneas
 - ⊕ Líneas A y B superpuestas, eje coincidente con la línea N-S sobre el centro del Domo
 - ⊕ Dirección de vuelo entre A y B en sentido contrario
 - ⊕ Línea E ortogonal con A y B, eje coincidente sobre el centro del Domo
 - ⊕ Línea C con eje coincidente con el centro del Domo
 - ⊕ **Líneas D y D' superpuestas; sentido de vuelo S-N y N-S, respectivamente; traslapo con E en 60%, incluyendo al Domo en uno de los extremos**

Aplicación de los datos de cada línea para el proceso de calibración (Imagen 4.2.):

- Las líneas A y B para obtener los valores de corrección de Cabeceo, Alabeo y pendiente por cabeceo.
- Las líneas A y B comparadas contra E para determinar el valor de corrección por deriva.
- **La comparación de la línea C con D y D' para obtener redundancia en el cálculo de la deriva ya que se trata del valor de corrección más difícil de determinar.**
- La línea E comparada con las línea que se superpone, para determinar los valores de corrección por distancia y torsión.

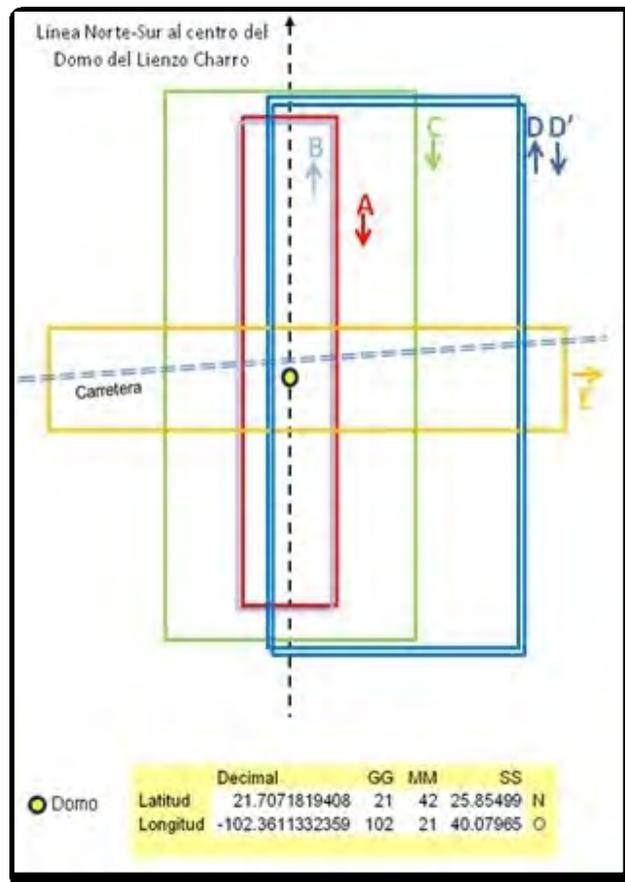


Imagen 4.2. Diseño geométrico del vuelo

La imagen 4.3., muestra la ubicación geográfica de 3 líneas de vuelo (color azul), dos paralelas y una transversal, utilizadas para el proceso de datos con los nuevos valores de calibración. Los datos se obtuvieron a 5 800 m de altura con un ángulo de barrido de 60°.

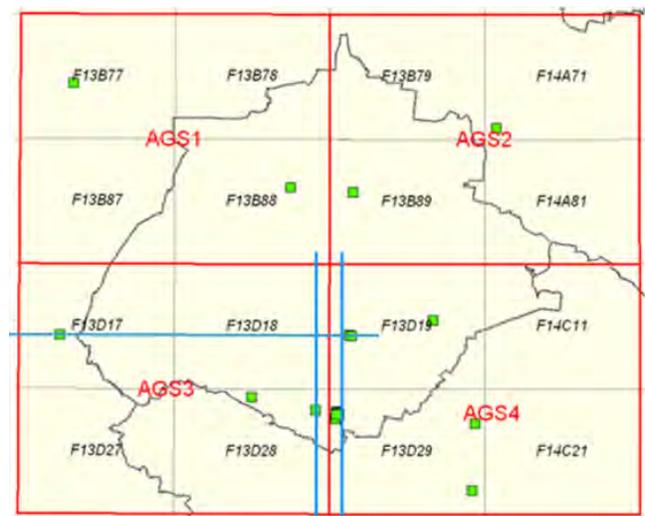


Imagen 4.3. Líneas de vuelo para comprobación de calibración

La tabla 4.1., presenta la posición en coordenadas geográficas de los campos de control para ajuste de nube de puntos y apoyo en determinación de parámetros de corrección.

ID	NOMBRE	CVE_CARTA	LON_DMS_O	LAT_DMS_N
1	TABASCO	F13D17	-102 54 40.2084	21 51 22.7628
2	TEATRO_AGS	F13D19	-102 17 24.1404	21 51 29.1636

Tabla 4.1. Ubicación de los campos de control

Apoyo geodésico simultáneo a vuelo

En las dos sesiones de captura de datos se estableció control geodésico en las inmediaciones del Hangar del INEGI, con un equipo GPS de dos bandas, para obtener la posición de la antena del GPS aerotransportado. Las coordenadas geográficas utilizadas se muestran a continuación:

Base	Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal
AGU6A	21°42'14.19333"N	102°18'47.86936"O	1 850.52700 m

El sitio estuvo libre de obstrucciones, se grabaron datos a cada medio segundo (2 Hz), la máscara de elevación para la recepción de los datos fue de 10°

Puntos de control terrestre

- Para corrección de los errores por distancia y torsión, se realizaron dos levantamientos con equipo GPS sobre la carretera denominada Aeropuerto-Tanque de los Jiménez, se emplearon métodos: estático y cinemático, obteniéndose 55 y 311 puntos respectivamente.
- Se utilizaron los campos de control denominados Tabasco, Zacatecas y Teatro Aguascalientes, con el objeto de validar los ajustes en distancia sobre datos levantados a 5 800 m.

Validación del vuelo y de la calidad de los datos

Después de bajar la información del disco duro removible se generó el índice de barrido para revisar el cumplimiento en los requerimientos de diseño (altitud, longitud, dirección y ángulo de barrido), condición que se satisfizo.

A continuación, se realizó el cálculo de la trayectoria y se corroboró que ésta alcanzara una precisión mejor que ± 10 cm; sólo en una sección de la trayectoria se obtuvo una precisión de 15 cm debido a la entrada y la salida de satélites. Sin embargo, la calidad de la trayectoria fue numéricamente de uno, lo que es indicativo de muy buena calidad.

Se generaron los archivos *.LAS y se obtuvieron los valores de Along Track (sobre la ruta), Cross Track (transversal a la ruta) e intensidad, los que cualitativamente son congruentes con datos de vuelos anteriores de similares características. Se validó que todos los ejes de la línea de barrido o sus extremos incluyeran al Domo. En este sentido, las líneas identificadas como D y D' no incluyeron al Domo al extremo oriente de las mismas, razón por la que se solicitó su repetición.

Se corroboró que las líneas levantadas a 5 800 metros cumplieran con los parámetros solicitados, la tabla 4.2., muestra la revisión de las características de vuelo.

SESIÓN	LÍNEA	LINE_ID	LARGO (m)	ANCHO (m)	ALT_VUELO (m)	AZIMUTH	VELOCIDAD (NUDOS)	ÁNGULO DE BARRIDO (°)	FRECUENCIA DE BARRIDO DEL ESPEJO (hz)	FRECUENCIA DE EMISIÓN DE PULSOS (Hz)	ALONG(m)	CROSS (m)	MAXIMA INTENSIDAD	CUMPLE	OBSERVACIONES
A	A	081210_185541	9790.64	649.07	783.5	183.3	173.27	45	42.5	111600	2.1	0.7	150	SÍ	
	B	081210_190628	11162.95	634.16	765.5	3.92	158.9	45	42.5	111600	1.9	0.7	148	SÍ	
	E	081210_191747	9662.51	638.72	771	88.22	158.37	45	42.5	111600	1.9	0.7	150	SÍ	
	C	081210_192834	10809.94	1188.79	1435	191.93	167.93	45	39.3	75300	2.2	1.8	146	SÍ	
	D	081210_193924	10545.82	1165.18	1406.5	351.06	154.24	45	39.3	75300	2	1.8	146	No	No incluyeron al Domo
	D'	081210_194855	11217.31	1185.07	1430.5	188.43	163.6	45	39.3	75300	2.1	1.8	147	No	No incluyeron al Domo
	Y1	081210_200801	64047.4	6691.49	5795	345.16	186.99	60	9.1	20600	10.6	8.4	27	SÍ	Para Verificación
	Y2	081210_202553	63626.31	6961.11	6028.5	196.11	202.98	60	9.1	20600	11.5	8.8	26	SÍ	Para Verificación
	X1	081210_205248	84589.57	6428.8	5567.5	273.13	183.71	60	9.1	20600	10.4	8.1	26	SÍ	Para Verificación
B	D'	081211_005553	10176.37	1161.04	1401.5	182.22	186.64	45	39.3	75300	2.4	1.8	147	SÍ	Segundo vuelo, cumplió requerimiento
	D	081211_010521	10902.65	1158.97	1399	0.61	150.4	45	39.3	75300	2	1.8	147	SÍ	Segundo vuelo, cumplió requerimiento

Tabla 4.2. Revisión de características de vuelo

Se realizó una nueva planeación de vuelo para repetir la captura de datos sobre las líneas D y D', debido a que en el primer vuelo no se logró cubrir en el barrido el domo del lienzo charro. Se obtuvieron precisiones mejores que 5 cm en el cálculo de la trayectoria. Las líneas levantadas en esta ocasión sí cubrieron la estructura del Domo, por lo que resultaron útiles para continuar con las actividades de calibración.

Procedimiento para la obtención de los parámetros de calibración

Para las correcciones de los parámetros de alineación del sensor se partió de los valores de calibración existentes, los cuáles se modificaron hasta corregir los errores detectados. A continuación se detalla cada uno y las estrategias aplicadas.

Alabeo

Datos usados de líneas A y B voladas en direcciones opuestas sobre superficie plana, se uso el valor angular en radianes existente (Imagen 4.4.) A continuación descripción de pasos ejecutados para la determinación de la magnitud del error:

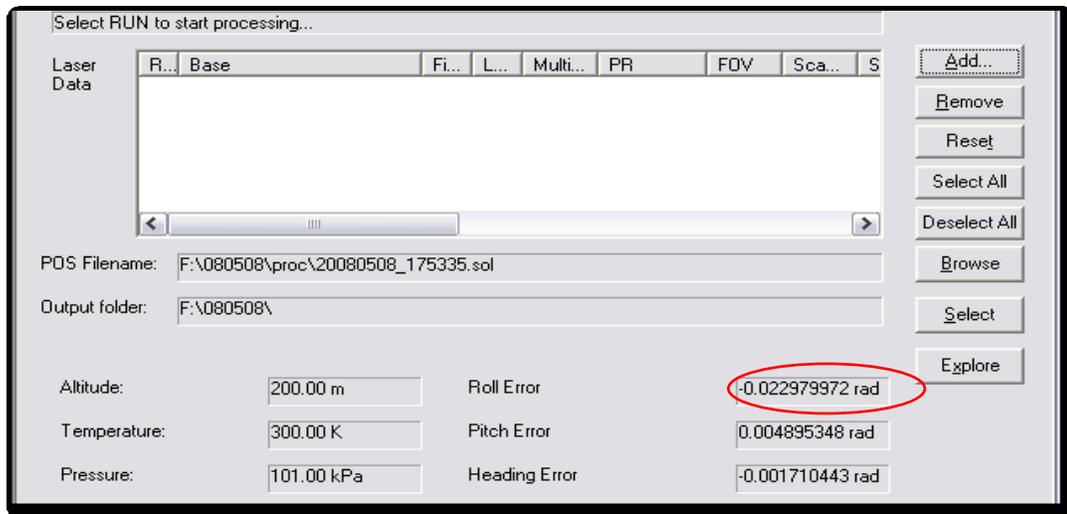


Imagen 4.4. Pantalla principal de software ALSPP; corrección de partida por alabeo

- I. Proceso de datos
- II. Generación de un modelo de superficie para cada una de las líneas de vuelo.
- III. Selección de un área plana, de longitud igual al ancho de barrido, libre de vegetación y construcciones (Imagen 4.5.)

- IV. Trazo del perfil transversal a la dirección de vuelo, común a ambos modelos.
- V. Determinación de la magnitud del error por alabeo, preferentemente a la orilla de las líneas de barrido (Imagen 4.5.)

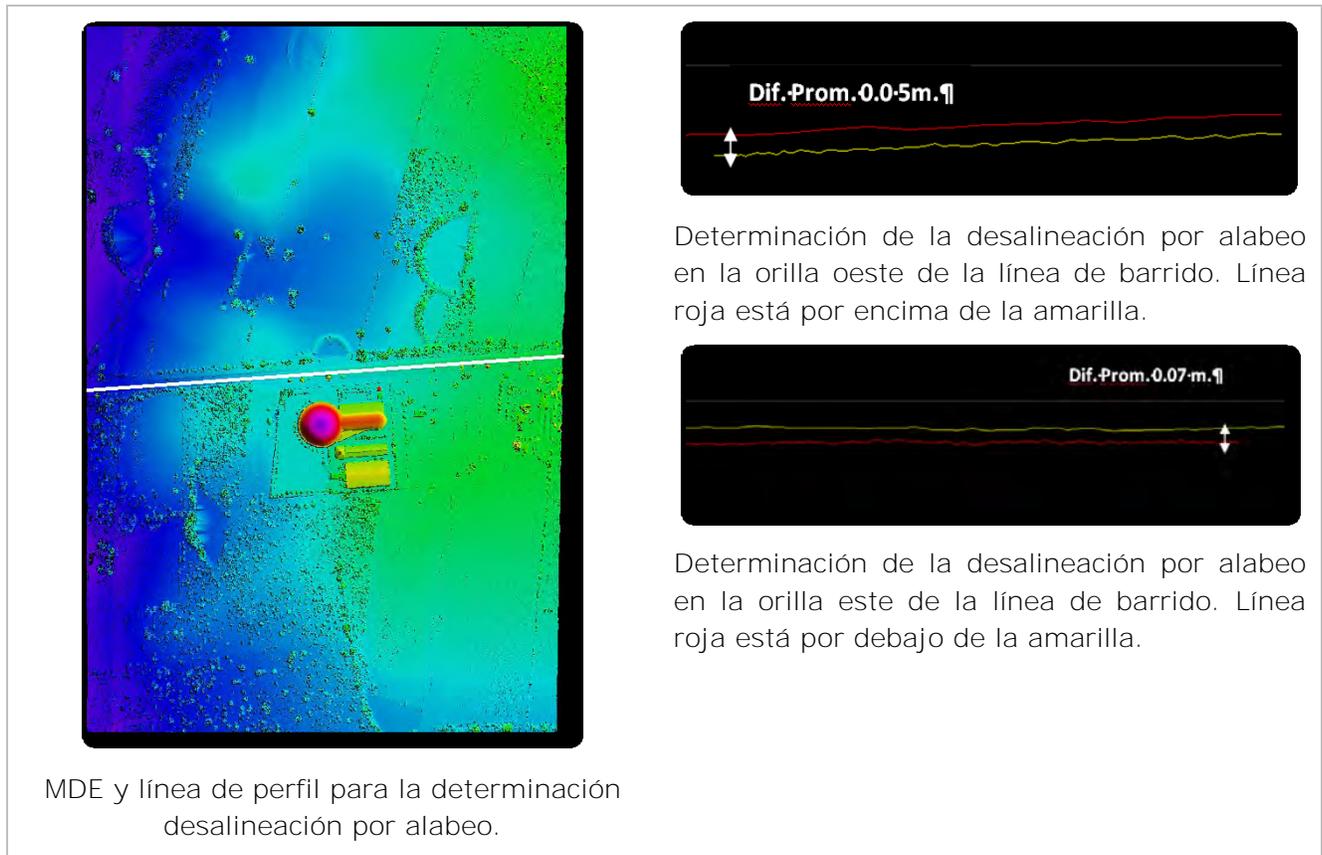


Imagen 4.5. Selección de área y determinación de la magnitud del error en alabeo

- VI. Determinación de la separación. La magnitud de la desalineación se determinó por la separación entre ambas líneas a la orilla del perfil, se obtuvo un promedio de las separaciones a partir de los dos valores obtenidos.
- VII. Obtención del valor de corrección. División del promedio de la separación entre la anchura de la línea en unidades métricas.

Descripción numérica: $Corrección\ por\ alabeo = 0.05962 / 642 = 0.00009286$

- VIII. Suma algebraica del valor estimado para obtención del valor ajustado.

Valor por alabeo ajustado = Valor de partida + (-Corrección)

$$= -0.022979972 + (-0.00009286) = -0.023072832$$

- IX. Procesamiento de datos para corroborar valor ajustado. Se introduce nuevo valor en software de proceso.
- X. Generación de perfiles en zona de revisión para medir separaciones, en su caso. Se verifica la coincidencia de perfiles y la minimización del efecto de cruzamiento entre ambas líneas.

En el ejercicio realizado se comprobó que el valor ajustado estimado minimizó el error sistemático, considerándose las diferencias mínimas como efectos aleatorios (Imágenes 4.6. y 4.7.)

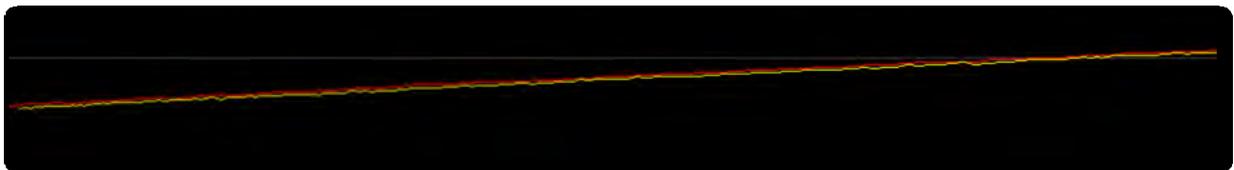


Imagen 4.6. Corrección de la desalineación por alabeo en la orilla oeste de la línea de barrido

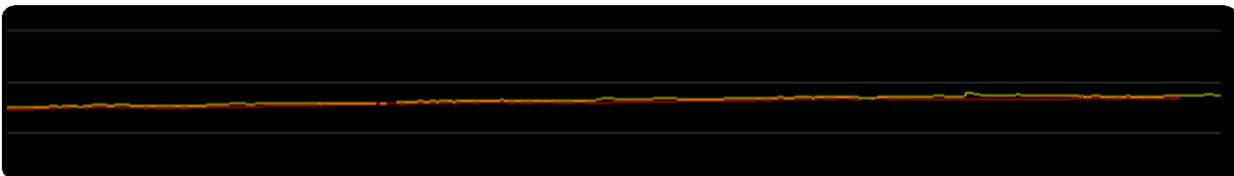


Imagen 4.7. Corrección de la desalineación por alabeo en la orilla este de la línea de barrido

Cabeceo

Datos de líneas A y B voladas en sentido inverso, se partió del valor angular existente (Imagen 4.8.), a continuación descripción de pasos ejecutados para la determinación de la magnitud del error:

Altitude:	200.00 m	Roll Error	-0.023072832 rad	Explore
Temperature:	300.00 K	Pitch Error	0.004895348 rad	
Pressure:	101.00 kPa	Heading Error	-0.001710443 rad	

Imagen 4.8. Valor de corrección de partida por cabeceo

- I. Generación de un modelo de superficie para cada una de las líneas de vuelo, con los datos procesados y ajustados.

- II. Selección de área con pendiente regular (domo) sobre la dirección de vuelo a la mitad del ancho de barrido.
- III. Trazo del perfil sobre la línea de vuelo para visualizar ambas superficies.
- IV. Determinación de la magnitud de la desalineación.

(Ver imagen 4.9., para I, II, III y IV)

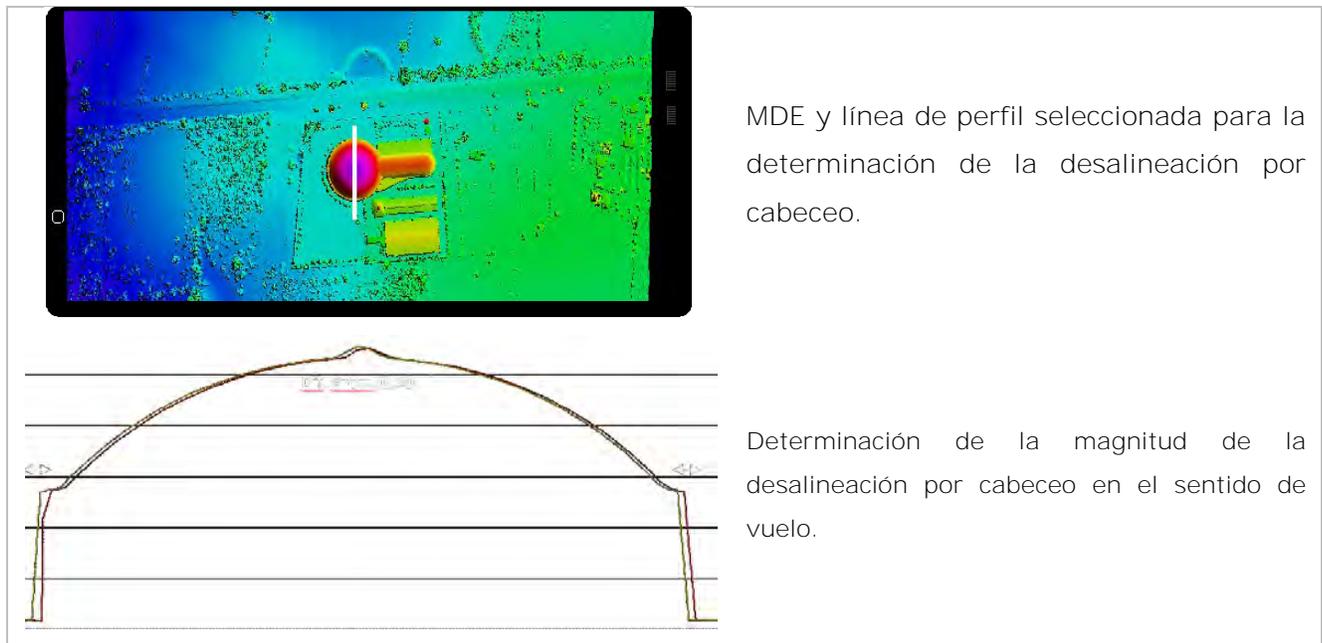


Imagen 4.9. Línea paralela a los ejes de vuelo con selección de área para determinar magnitud del error

- V. Determinación de la separación. La magnitud de la desalineación se determinó mediante la división de la separación obtenida en unidades métricas entre 2, dividiéndose entre la altura de vuelo aproximada.

Descripción numérica: Diferencia por cabeceo $0.10/2/770 = 0.00006493$

- VI. Suma algebraica del valor estimado con el valor anterior para obtener valor angular ajustado.

$$\begin{aligned}
 \text{Valor ajustado} &= \text{Valor de partida} - \text{Corrección} \\
 &= 0.004895348 - 0.00006493 = 0.004830418
 \end{aligned}$$

- VII. Procesamiento de datos para corroborar valor ajustado. Se introdujo nuevo valor de corrección por cabeceo en software de proceso.
- VIII. Generación de archivos *.LAS y de perfiles en la zona elegida, para medir inconsistencias, en su caso. Se verificó la coincidencia entre perfiles y la ausencia de desplazamientos (Imagen 4.10.) entre ambas líneas.

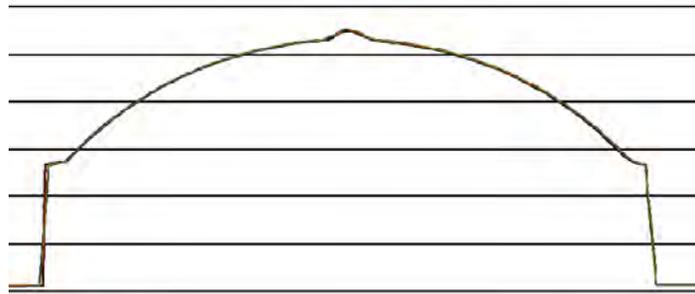


Imagen 4.10. Corrección de la desalineación por cabeceo

En el ejercicio realizado se comprobó que el valor ajustado calculado minimizó el error sistemático, considerándose las diferencias mínimas como efectos aleatorios.

Pendiente por Cabeceo

Datos de líneas voladas en direcciones opuestas (A y B) Se utilizó el valor de corrección del error por cabeceo obtenido previamente y una pendiente del error por cabeceo de cero (Imagen 4.11.)

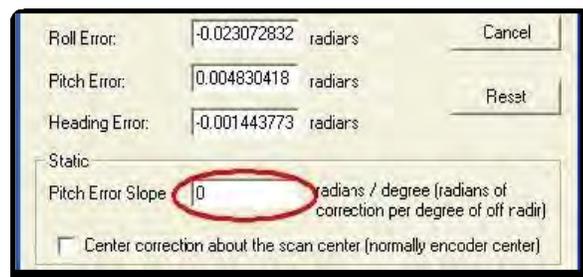


Imagen 4.11. Fijación de error en 0 por pendiente de cabeceo

- I. Generación de modelos de superficie para cada una de las líneas de vuelo.
- II. Selección de un área con pendiente regular en la orilla del barrido de una de las líneas (Imagen 4.12.)

- III. Trazo del perfil en el sentido de la línea de vuelo, para análisis los modelos de ambas líneas.

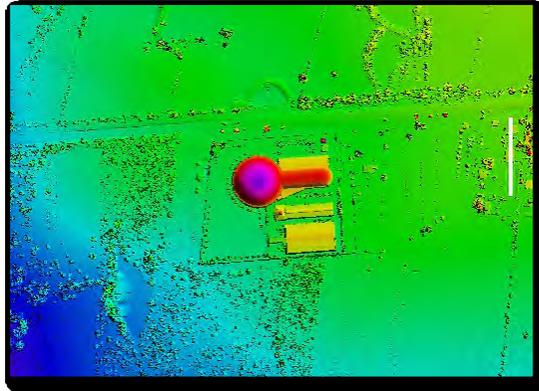


Imagen 4.12. Selección de un área con pendiente regular

- IV. Determinación de la magnitud del error (ver imagen 4.13.)
V. Cálculo del ángulo mediante:

Descripción numérica:

Pendiente por Cabeceo = separación ÷ 2 ÷ altura de vuelo ÷ ángulo desde el nadir

$$=0.88/2/783/21.512= 0.000026121$$

- VI. Introducción del valor de corrección obtenida y proceso de las líneas A y B.
VII. Generación de modelos digitales de las líneas de muestreo para verificar minimización del error de la pendiente por cabeceo.

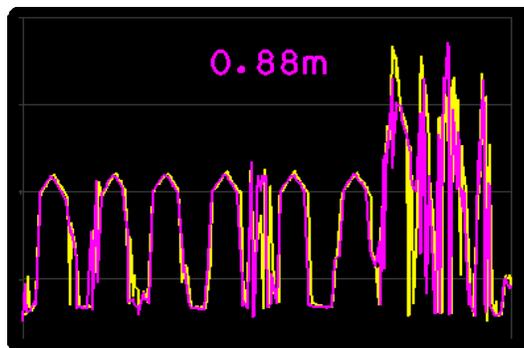
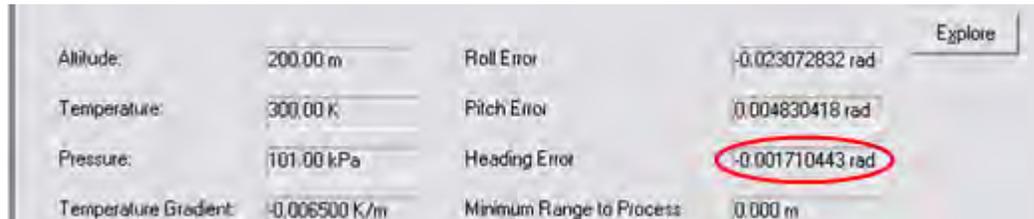


Imagen 4.13. Determinación de la magnitud del error

Deriva

Datos de líneas A y E, traslapeo ortogonal, utilizando el valor de corrección existente para la deriva (Imagen 4.14.) Lo anterior puede realizarse también utilizando datos ajustados de dos líneas paralelas con un traslapeo longitudinal del 60%



Altitude:	200.00 m	Roll Error	-0.023072832 rad
Temperature:	300.00 K	Pitch Error	0.004830418 rad
Pressure:	101.00 kPa	Heading Error	-0.001710443 rad
Temperature Gradient:	-0.006500 K/m	Minimum Range to Process	0.000 m

Imagen 4.14. Pantalla principal de ALSPP; corrección de partida por deriva

- I. A partir de los datos procesados y ajustados se generación de modelos de superficie para cada una de las líneas de vuelo.
- II. Selección de área con pendiente regular sobre la dirección de vuelo en un borde del ancho de barrido (línea A) y el centro del otro del ancho de barrido (línea E), transversal a la dirección de vuelo a la mitad del ancho de barrido (Imagen 4.15.)

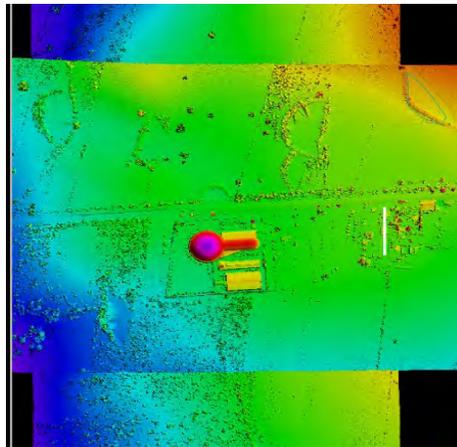


Imagen 4.15. Selección en MDS para determinación del error por deriva

- III. Trazo del perfil en la superposición de ambas superficies. En caso de líneas paralelas, el trazo debe hacerse en el sentido de la dirección de vuelo.
- IV. Análisis gráfico de la magnitud de la desalineación por deriva (Imagen 4.16.)

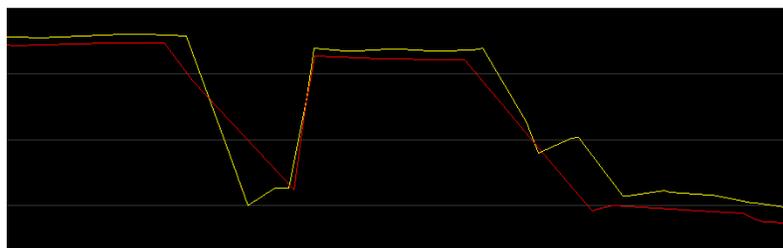


Imagen 4.16. Magnitud de la desalineación por deriva

- V. Diagnóstico de la magnitud de la desalineación.
- VI. Determinación de la magnitud de la desalineación en radianes. Se midió con la separación de los desplazamientos y la distancia desde el centro de la línea de barrido o eje de vuelo. Se calcula la corrección al valor inicial mediante la separación dividida entre la distancia desde el eje de vuelo, en unidades métricas, al área de medición.

Descripción numérica: Corrección = $0.10/375 = 0.00026667$

*Valor por deriva ajustado = Valor de partida + Corrección
= $-0.001710443 + 0.00026667 = -0.001443773$*

- VII. Procesamiento de los datos con el valor de desalineación angular de deriva calculado (ver imagen 4.17.)
- VIII. Generación de archivos *.LAS y de perfil en la zona elegida, para medir inconsistencias, en su caso. Se verifica la coincidencia entre perfiles y la ausencia de desplazamientos sistemáticos entre ambas líneas (Imagen 4.18.)

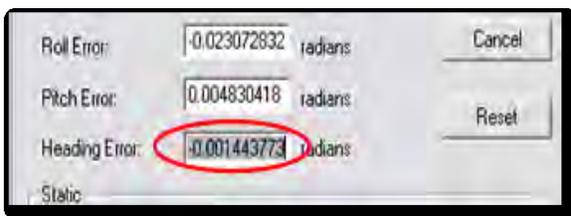


Imagen 4.17. Introducción del valor de corrección estimado para deriva

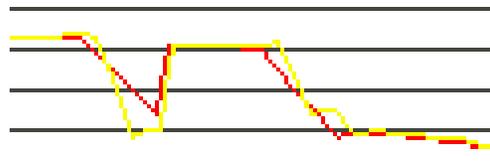


Imagen 4.18. Reducción de la desalineación por deriva

Torsión

Para su determinación se utilizaron puntos de control terrestre con GPS y puntos LiDAR, sobre una zona plana longitudinalmente al ancho de barrido; los puntos GPS a

lo largo de un tramo de la vía de comunicación que cruza a las líneas de vuelo con dirección norte sur del proyecto.

- I. Generación de modelos de superficie para cada una de las líneas de vuelo opuestas
- II. Trazo del perfil transversal a lo largo de un área plana (carretera), manteniendo como referencia de exactitud los campos de control.
- III. Comparación de la disposición de los puntos LIDAR con respecto a los puntos de control terrestre.

En el ejercicio realizado se observó un comportamiento uniforme a lo largo del ancho de barrido, en el caso de que el promedio de las diferencias altimétricas sea negativo, el valor de la torsión deberá ser más positivo, de lo contrario deberá de ser más negativo. No se detectaron efectos, por lo que se descartó la presencia de errores por torsión. En el caso de haberse encontrado presencia del error, el complemento es:

- IV. Observación de efecto de torsión entre los puntos LIDAR y los de control terrestre.
 - a. **Para un efecto tipo "sonrisa" se debe incrementar el valor de la torsión.**
 - b. Para un **efecto tipo "ceño" se debe disminuir** el valor de la torsión.
- V. Aplicación de corrección del error incrementando o disminuyendo el valor en múltiplos de 1 000 unidades para apreciar las variaciones en los datos.
- VI. Proceso de datos hasta determinar la minimización del error.

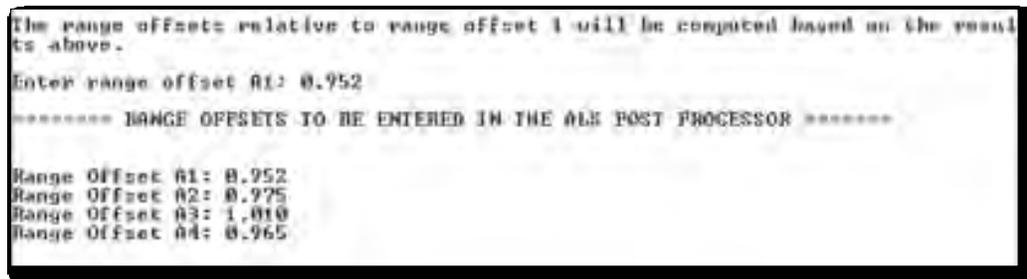
A diferencia de los errores por desalineación del sensor, no existe aún un procedimiento que induzca a obtener un valor de corrección más exacto, por lo que las variaciones a este parámetro se realizan con el método de ensayo y error.

Distancia

Para determinar la magnitud de este error al nadir en la componente vertical y al extremo por las componentes vertical y horizontal, fue necesario realizar una comparación entre los puntos obtenidos con el sistema y puntos de apoyo terrestre

sobre una zona plana longitudinalmente a lo ancho del barrido. Es probable que un cambio en la corrección de distancia introduzca un efecto "sonrisa" en los datos. Se utilizaron los puntos levantados a lo largo de la carretera que cruza a las líneas levantadas con dirección norte sur del proyecto de vuelo.

- I. Generación de archivos *.LAS de las líneas A y B.
- II. Aplicación de la corrección por distancia igual a cero en los cuatro valores de "Range" (distancia).
- III. Cuantificación del valor de corrección a partir de puntos LiDAR y puntos de control terrestre utilizando un perfil a lo largo de la zona plana, manteniendo como referencia los puntos de control para determinar las diferencias.
- IV. Aplicación del promedio de las diferencias en el proceso de una línea (cualquiera de las dos) utilizando sus archivos crudos *.SCN, mediante el empleo de una utilidad para calcular la distancia de las tarjetas, se introdujo el valor obtenido (0.952 m), con ese valor la utilidad genera las correcciones para todas las tarjetas (ver imagen 4.19.)



```
The range offsets relative to range offset 1 will be computed based on the results above.  
Enter range offset #1: 0.952  
***** RANGE OFFSETS TO BE ENTERED IN THE ALI POST PROCESSOR *****  
Range Offset #1: 0.952  
Range Offset #2: 0.975  
Range Offset #3: 1.010  
Range Offset #4: 0.965
```

Imagen 4.19. Obtención de los valores de corrección por distancia

- V. En el programa de proceso se introdujeron los valores obtenidos a través de la misma utilidad (RangCardCal.exe) para la corrección de las distancias 1 a 4.
- VI. Se generaron las Líneas *.LAS.
- VII. Se compararon los puntos láser contra los puntos de control terrestre para verificar diferencias altimétricas con tendencia a 0, resultando satisfactorias.

Generación del archivo de registro

Con base en los resultados obtenidos se generó el archivo de registro y se instaló en los equipos destinados al procesamiento de datos LiDAR. Los parámetros de la IMU y del vector de separación entre la antena GPS y la IMU se muestran en la tabla 4.3.

Parámetro [Unidad] IMU Type	Valor μ IRS
IMU Lever Arm X [m]	-0.269
IMU Lever Arm Y [m]	0.207
IMU Lever Arm Z [m]	-0.004
GPS Lever Arm X [m]	0.120
GPS Lever Arm Y [m]	0.492
GPS Lever Arm Z [m]	-1.357

Tabla 4.3. Parámetros de corrección calculados

Para el procesamiento de nuevas líneas *.LAS, se introducen los nuevos valores que deberán compararse contra los puntos de control terrestre. En general, si los valores fueron estimados correctamente, las diferencias posibles de detectar mostrarán una tendencia a cero. La tabla 4.4., muestra los datos para el archivo de registro obtenido.

Parámetro [Unidades]	Valor
Encoder Scale Factor [encoder counts per revolution]	8388608
Encoder Offset [encoder counts]	13900
Roll [rad]	-0.023072832
Pitch [rad]	+0.004830418
Heading [rad]	-0.001443773
Pitch Slope [rad/deg]	+2.6121e-005
Torsion Constant [Nm/rad]	- 85,000
Nominal Range Offset[m]	+0.952
R1 [m]	+0.952
R2 [m]	+0.975
R3 [m]	+1.010
R4 [m]	+0.965
Elevation Offset [m]	0
IMU Latency [ms]	0

Tabla 4.4. Parámetros para archivo de registro

Verificación de la calibración con datos del vuelo a 5 800 m de altura

Con el fin de verificar la efectividad de los valores de calibración se introdujo un nuevo registro de calibración para el proceso y ajuste de los datos, dicha verificación se efectuó sobre 11 líneas de vuelo (Imagen 4.20.) colectadas en el estado de Veracruz.

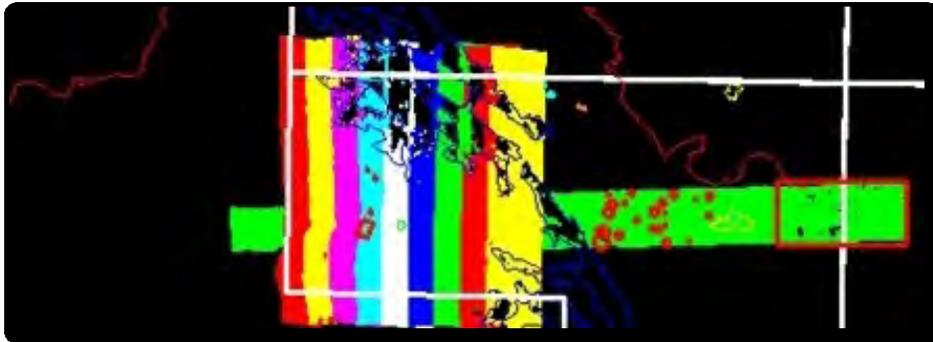


Imagen 4.20. Despliegue de nube de puntos de líneas colectadas

- La inicialización y el cierre de las bases GPS se realizó en tierra en el aeropuerto de Veracruz
- Se realizó el cálculo de la trayectoria obteniéndose una precisión dentro del margen de (+ 0.08 m a -0.08 m)
- Se generaron 11 archivos *.LAS y 11 *.TRJ
- Se revisó la intensidad de los datos (valores promedio de 13 de 255 valores)
- La revisión se realizó del 30% de los datos, correspondiente a 3 líneas, los resultados de la distribución geométrica (Tabla 4.5.) se muestran a continuación

*.LAS	Velocidad de Vuelo (Nudos)	Altura de Vuelo (mts)	Angulo de Barrido	Pulse Rate Hz.	Scan Rate Hz.	Densidad de Puntos/m ²			Along Track (m)			Cross Track (m)			Intensidad promedio
						0.023	0.026	0.03	10.12	11.7	10.28	4.6	3.9	7.05	
LDR0900109_180907_1.LAS	192	5115	60	20600	9.1	Prom	0.02633	Prom	10.7	Prom	5.1833	17/255			
LDR0900109_190143_1.LAS	197.5	5895	60	20600	9.1	Prom	0.02167	Prom	11.2333	Prom	8.1333	11/255			
LDR0900109_192227_1.LAS	197	5808	60	20600	9.1	Prom	0.02033	Prom	12.2333	Prom	7.8667	11/255			

Tabla 4.5. Distribución Geométrica de los datos de verificación

Los datos controlados en sitio y procesados en gabinete cumplieron con las especificaciones de exactitud posicional y densidad mínima de puntos por metro cuadrado (0.03) Los datos validados se sumaron a la producción del proyecto que se controla mediante índices en ambiente SIG (Imagen 4.21.)

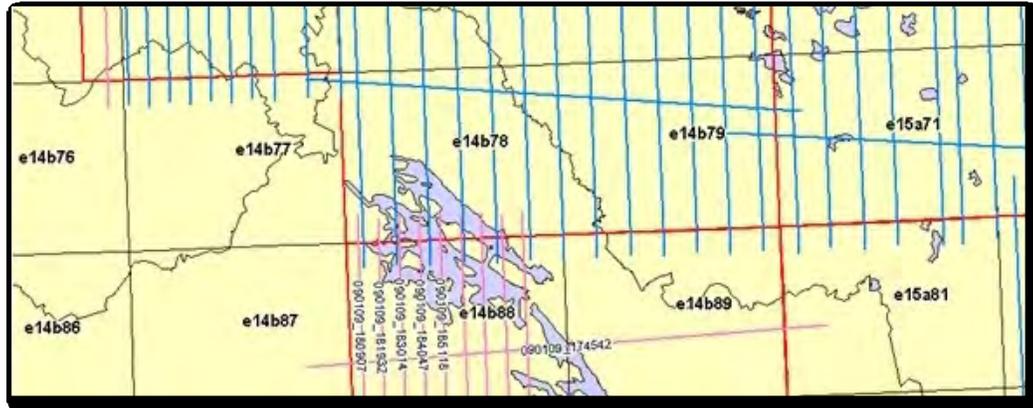


Imagen 4.21. Control de proyecto mediante índices por línea en SIG

En seguida se generó un Modelo Digital de Superficie (MDS) para comprobar ausencia de sistemáticas en los datos. A efecto de poder realizar una comprobación se cargo el MDS con valores de calibración anteriores y con el derivado de los nuevos valores calculados. La imagen 4.22., muestra la comparación de resultados antes y después de la nueva calibración.

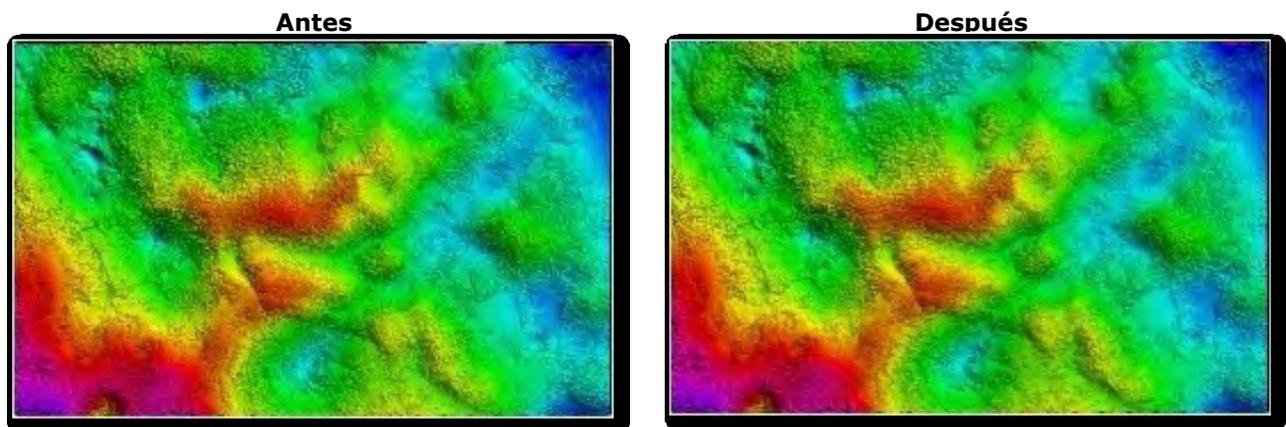


Imagen 4.22. Comparación de MDS antes y después de calibración

De manera complementaria a la verificación del procedimiento se realizó la corrección automática de los parámetros de posición y orientación. El software comparó la superposición de datos desde diferentes líneas de vuelo y mediante la generación de

redes irregulares de triángulos se realizó el mejor ajuste posible de orientación de los parámetros de orientación, de manera automática.

Verificación del procedimiento

Durante el primer semestre de 2009, se presentó la oportunidad de realizar un nuevo ejercicio con el procedimiento ya realizado. Debido a necesidad de mantenimiento aeronáutico en la aeronave donde se tenía instalado el sistema LiDAR, se tuvo que desinstalar el sensor dentro de la aeronave y reinstalarlo a su regreso, situación que necesariamente implicó medición de *offset* (vector de desplazamiento entre centro de fase de la antena GPS) y la revisión de datos levantados ex profeso para determinar y aplicar ajustes de calibración. A continuación se reproduce el ejercicio realizado que sirvió para confirmar y ajustar estrategias de calibración.

Requerimiento de vuelo para calibración

Los requerimientos de obtención de datos fueron similares a los determinados en el primer ejercicio documentado y se muestran en la Imagen 4.23.

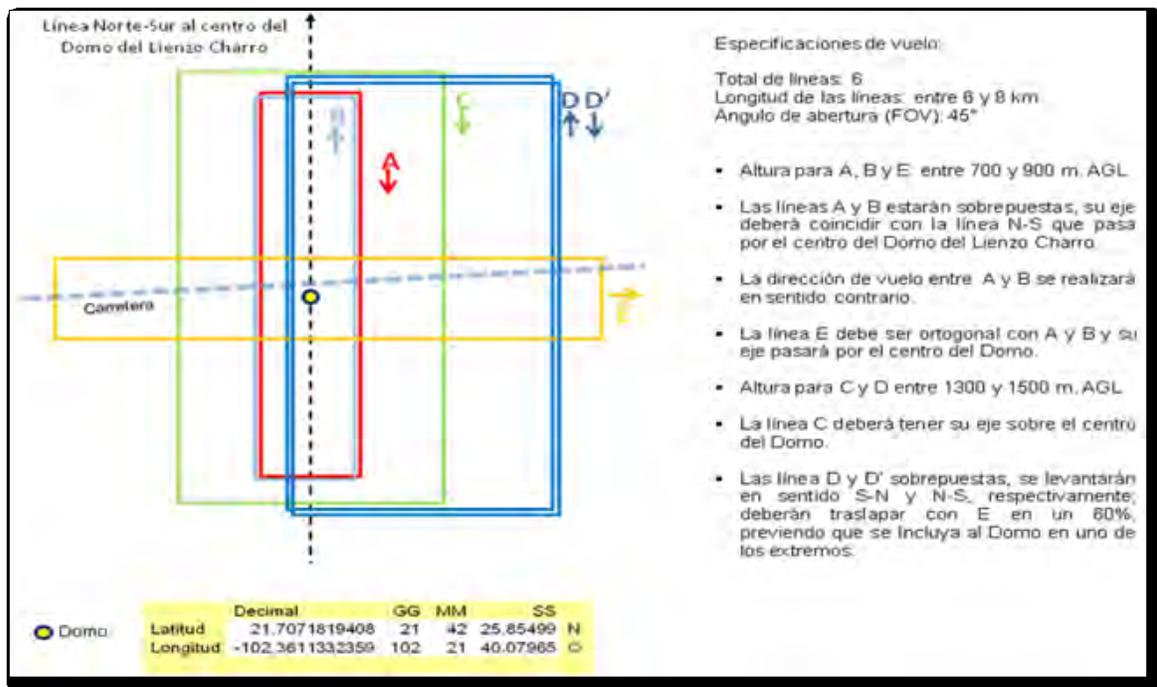


Imagen 4.23. Diseño geométrico del vuelo para calibración

Las líneas de vuelo se aplicaron nuevamente de la siguiente manera:

- Las líneas A y **B o D y D'** se planearon para obtener los valores de corrección de alabeo; comparando datos provenientes de líneas colectadas a diferente altura mejora la exactitud en la determinación del valor de corrección.
- Las líneas A y B se programaron para la corrección por cabeceo tomando en consideración que la zona con pendientes regulares utilizada en los ejercicios anteriores se encuentra en el centro de las líneas.
- Las líneas **D y D'** se determinaron para estimar el valor de corrección del error de pendiente por cabeceo.
- **La comparación de la línea C con D y D' fue planeada para obtener redundancia** en el cálculo de la deriva, ya que se trata del valor de corrección con mayor complejidad en su determinación.
- La línea E se utiliza para comparación con las líneas que se superponen para determinar los valores de corrección por distancia y torsión.

Las características mostradas en la tabla 4.6., se revisaron para asegurar la utilidad de los datos colectados en el proceso de calibración.

Línea	Line_id	Ancho (m)	Alt_Vuelo (m)	Velocidad (nudos)	Angulo de Barrido (°)	Frecuencia de barrido del espejo (Hz)	Frecuencia de emisión de pulsos (Hz)	Máxima Intensidad	Across (m)	Along (m)	Area. Aprox. (m ²)	Cumple
A	090414_212444	650.73	785.5	156.89	45	42.5	111600	91	0.78	1.90	5231055.07	si
B	090414_213238	640.37	773.0	186.30	45	42.5	111600	89	0.75	2.26	5221224.18	si
E	090414_213920	639.13	771.5	185.50	45	42.5	111600	89	0.76	2.25	6192012.33	si
C	090414_214649	1168.08	1410.0	157.19	45	39.3	75300	94	1.82	2.06	10687495.83	si
D	090414_215351	1166.84	1408.5	184.41	45	39.3	75300	94	1.83	2.41	11026378.73	si
D'	090414_220030	1170.57	1413.0	169.56	45	39.3	75300	91	1.85	2.22	10463535.74	si

Tabla 4.6. Tabla para validar cumplimiento de características de vuelo

Actividades realizadas para la validación del vuelo

Se elaboró una planeación similar a la de la última misión de calibración para comprobar el procedimiento de trabajo ya realizado para cada tipo de error. El procedimiento general consistió en:

- Descarga de información a disco duro removible para generar el índice de barrido y revisar cumplimiento de los requerimientos de geometría (altitud, longitud, dirección y ángulo de barrido). Se comprobó que los datos cumplieron con lo solicitado.
- Derivado del cálculo de la trayectoria, se observó que la mayoría de los datos alcanzaron una precisión entre 4 cm y -3 cm; en una escala del 1 al 4, los datos tuvieron calidad 1, que corresponde a la mejor calidad de proceso en el cálculo de trayectoria.
- Se generaron los archivos *.LAS y se obtuvieron los valores a lo largo de la pista (Along Track), transversal a la pista (Cross Track) e intensidad.
- Se revisó que los ejes de la línea de barrido o sus extremos incluyeran al Domo de acuerdo a lo programado para cada línea, (Imagen 4.24.)

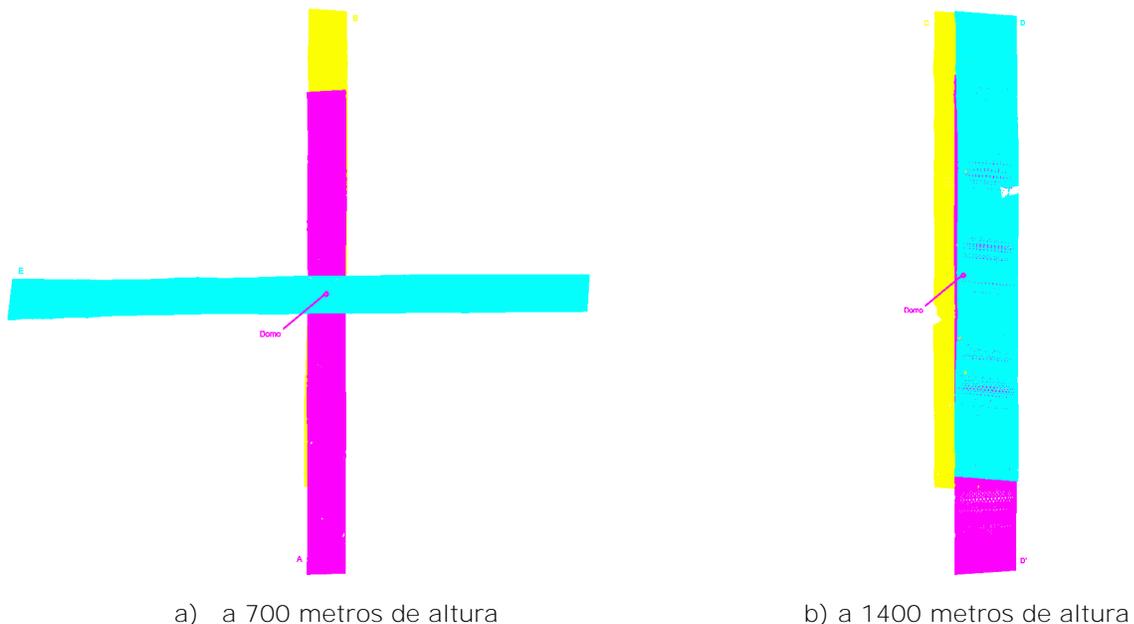


Imagen 4.24. Cobertura de líneas (Sesión B)

Procedimiento de Calibración

A diferencia del primer ejercicio, las correcciones a los parámetros de alineación del sensor (alabeo, cabeceo, cabeceo por pendiente, deriva y distancia) se realizaron utilizando valores de cero para la obtención de la nueva calibración, en lugar de partir de los valores vigentes. La hipótesis planteada consistió en realizar menos iteraciones de cálculo, haciendo más eficiente el proceso en tiempo y una mejor estimación para la determinación de los valores de corrección.

Alabeo

Se revisó la desalineación en radianes sobre el eje X, entre la IMU y el láser. Se analizó la existencia de desnivel sistemático de los datos de ambos lados del barrido para determinar si estos se hundían y se elevaban en forma contraria entre los extremos. El error observado se muestra en la imagen 4.25.

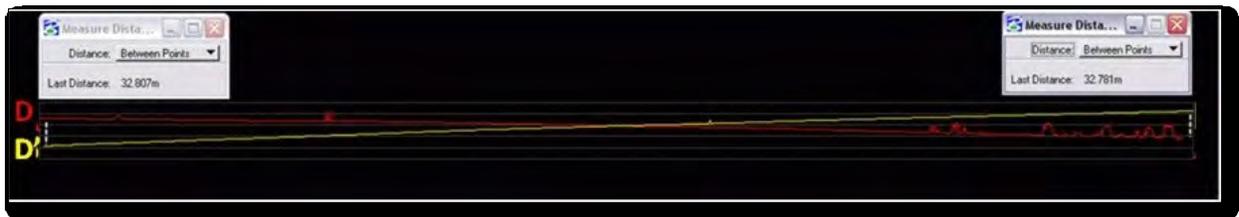


Imagen 4.25. Desalineación observada sobre el eje X, entre la IMU y el láser

Para la corrección se utilizó el siguiente procedimiento:

- 1) Proceso de los datos de dos líneas voladas en direcciones opuestas (D y D') sobre una superficie plana. Valor de error por alabeo igual a cero.
- 2) Generación de un modelo de superficie para cada línea de vuelo.
- 3) Selección de un área a todo el ancho de barrido, plana y sin árboles.
- 4) Trazo de perfil transversal a la dirección de vuelo, común a ambos modelos (Imagen 4.26.) Se determinó la función inversa de la tangente del ángulo que genera la separación desde el centro de las líneas hasta sus extremos, midiendo la separación entre ambas líneas a la orilla del perfil y determinando la anchura

promedio de ambas. La corrección del error por alabeo se obtiene con la ecuación 4.1.

$$\arctan(\alpha) = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{adyacente}} = \frac{\text{separacion entre lineas} / 2}{\text{ancho promedio de lineas} / 2} = \frac{32.794/2}{1410.2124/2} = 0.023254651 \text{ radianes}$$

Ecuación 4.1.

- 5) Reproceso de los datos, introduciendo ajuste por alabeo de -0.023254651 radianes. Se aplica el signo negativo porque el equipo está instalado con los cables atrás del eje X, y se considera negativo con respecto a la nariz de la aeronave. En este caso, una rotación positiva moverá los datos en sentido contrario a las manecillas del reloj.
- 6) Generación de perfiles en la zona elegida y verificación de coincidencia sin cruzamiento sistemático. Al no observarse desplazamientos entre las líneas (Imagen 4.27.) se aceptó el valor de corrección para alabeo.

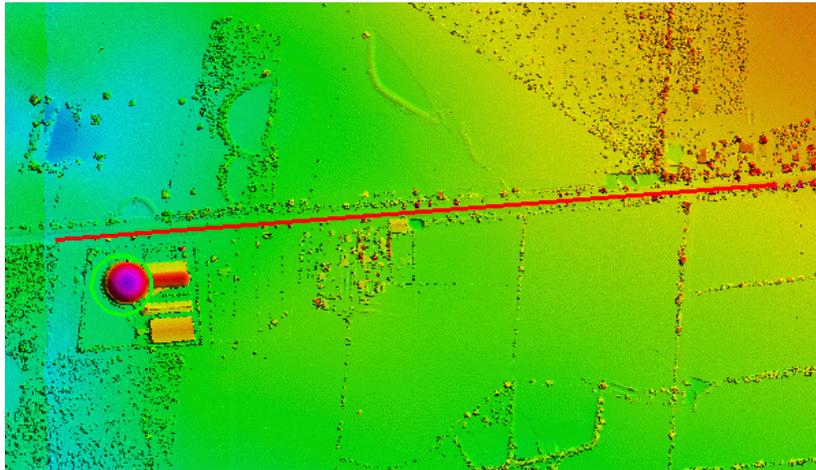


Imagen 4.26. Modelo para determinar magnitud de error por alabeo

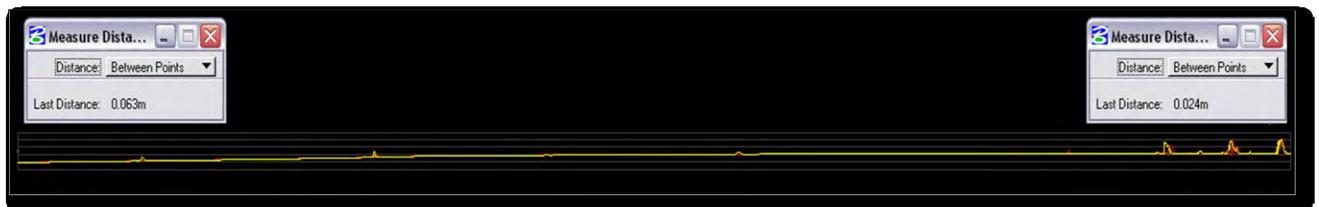


Imagen 4.27. Revisión de efectividad de corrección de error por alabeo para aceptación

Cabeceo

Se revisó la desalineación en radianes sobre el eje Y, entre la IMU y el láser, para detectar desplazamiento de los datos hacia delante o hacia atrás con respecto al sentido de vuelo; para ello se evitó seleccionar una zona plana. En la imagen 4.28., se puede observar el diagnóstico del desplazamiento.

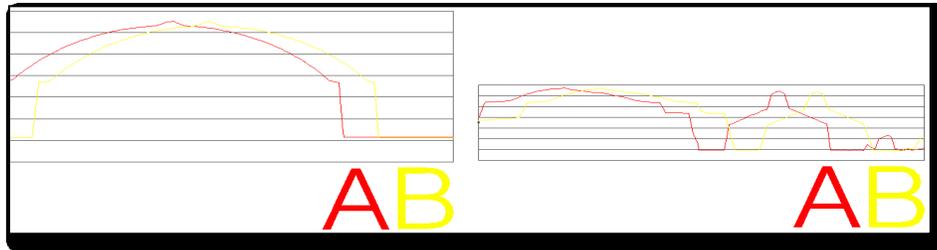


Imagen 4.28. Revisión de diagnóstico de error por cabeceo

Para la corrección se utilizó el siguiente procedimiento:

- 1) Proceso de los datos de dos líneas voladas en direcciones opuestas sobre una superficie no plana. Se parte de un valor de corrección de error por cabeceo igual a cero.
- 2) Generación de un modelo de superficie para cada una de las líneas de vuelo.
- 3) Selección de un área con pendiente regular sobre la ruta a la mitad del ancho de barrido (Imagen 4.29.)
- 4) Trazo de un perfil sobre la ruta en ambas superficies. Análisis de la magnitud del error (Imagen 4.30.) Se ajusta el valor del error por cabeceo mediante la separación dividida entre 2, valor que se divide entre la altura de vuelo de acuerdo a la siguiente ecuación 4.2.

$$\arctan(\alpha) = \frac{\textit{cateto opuesto}}{\textit{cateto adyacente}} = \frac{\frac{\textit{separacion}}{2}}{\textit{altura de vuelo}} = \frac{\frac{70.050}{2}}{710.2178} = 0.004963265 \textit{ radianes}$$

Ecuación 4.2.

El valor obtenido se introdujo para el proceso nuevo.

- 5) Reproceso de los datos con el nuevo valor ajustado del paso anterior para comprobar corrección (Imagen 4.31.) Se determinó que el ajuste es hacia delante

considerando la instalación de los cables al frente del eje Y, siendo positivo hacia el ala derecha de la aeronave. Una rotación positiva moverá los datos hacia delante.

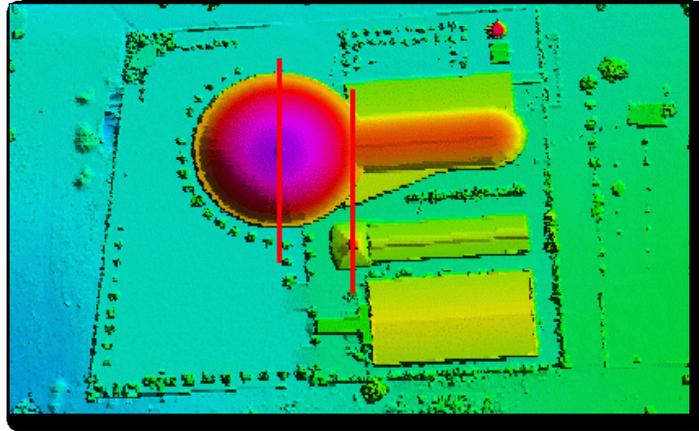


Imagen 4.29. Área con pendiente regular para generar perfil y diagnóstico de error por cabeceo

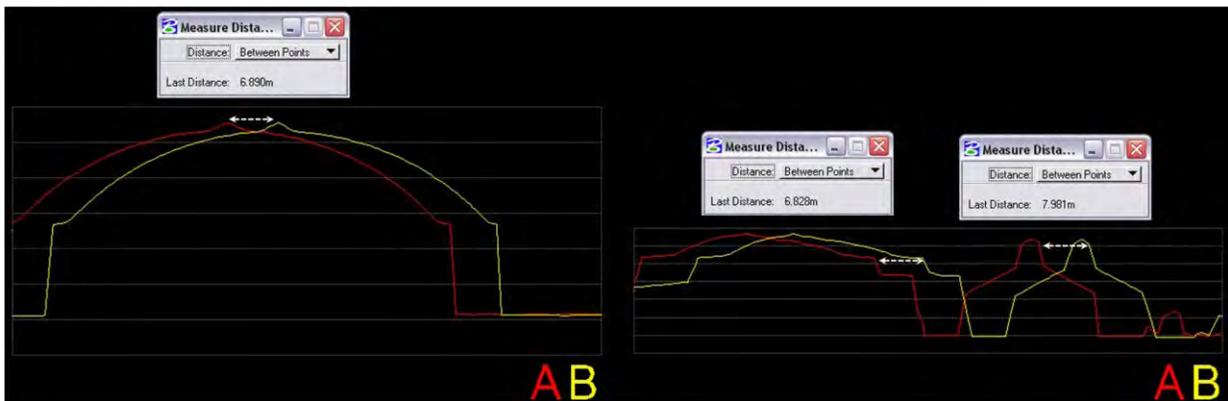


Imagen 4.30. Perfil y diagnóstico de error por cabeceo



Imagen 4.31. Comprobación de corrección de error por cabeceo

Pendiente por Cabeceo

Mediante la revisión de los datos se buscó que las líneas no se mostraran curvadas; los datos iniciales entre perfiles se muestra en la imagen 4.32.

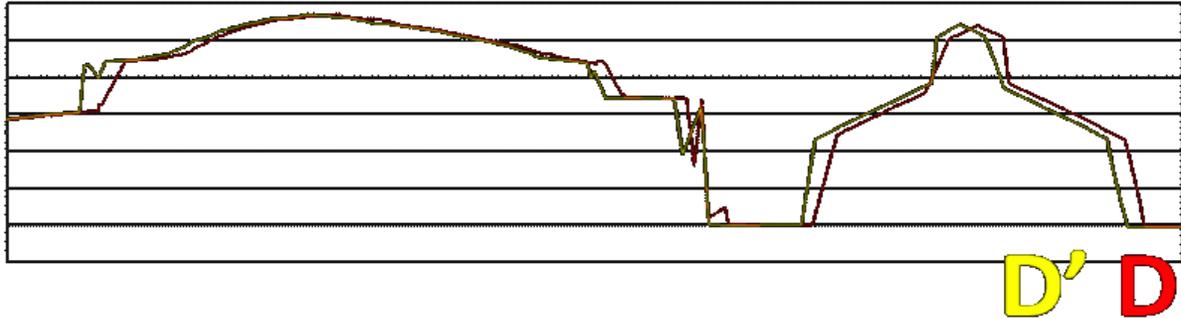


Imagen 4.32. Análisis inicial del error derivado de la pendiente por cabeceo

Para la corrección se utilizó el siguiente procedimiento:

- 1) El proceso nuevo parte del valor estimado de corrección para el cabeceo previamente calibrado, con pendiente del error por cabeceo desde cero.
- 2) Generación de modelos de superficie para las líneas de vuelo opuestas (Imagen 4.33.)
- 3) Selección de área con pendiente regular en dirección sobre la ruta en el borde del ancho de barrido (Imagen 4.33.)
- 4) Trazo de un perfil sobre la ruta en ambas superficies (Imagen 4.34.) Para determinar la magnitud del error probable, se calcula la corrección en radianes por los grados desde el nadir y la altura de vuelo. Se aplica la siguiente ecuación:

$$\frac{\arctan(\alpha)}{\alpha} = \frac{\frac{\text{separacion}}{2}}{\text{altura de vuelo}}}{\arctan\left(\frac{\text{distancia al centro de la linea}}{\text{altura de vuelo}}\right)} = \frac{\frac{1.125}{2}}{1410.75}}{\arctan\left(\frac{385.075}{1410.75}\right)}$$

$$= \frac{0.0003987}{15.2744} = 0.000026104 \frac{\text{radianes}}{\text{grados}}$$

Ecuación 4.3.

- 5) Reproceso de los datos con la pendiente ajustada por cabeceo de 0.000026104.
- 6) Verificación para comprobar que los perfiles coincidan con el valor ajustado de la pendiente del error por cabeceo (Imagen 4.35.)

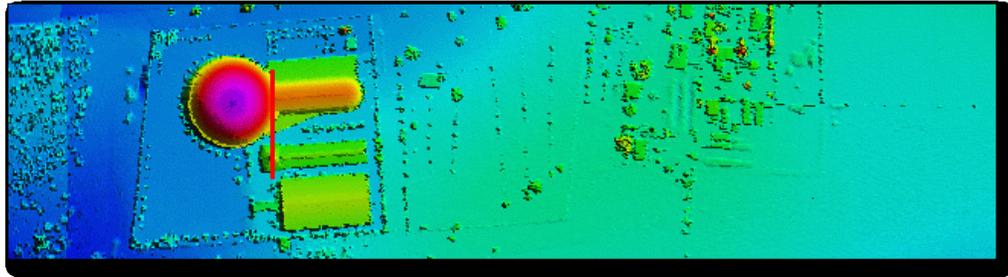


Imagen 4.33. Trazo de perfil para estimar el error de la pendiente por cabeceo



Imagen 4.34. Perfil para determinar magnitud del error sobre la ruta en ambas superficies



Imagen 4.35. Verificación de la pendiente del error por cabeceo

Deriva

Verificación de la existencia de la desalineación, en radianes, sobre el eje Z entre la IMU y el láser, identificación de la rotación positiva o negativa. Para verificar el signo se revisó que los datos estuvieran hacia adelante a la izquierda o hacia atrás a la derecha, en caso de ser negativa que los datos se presentaran hacia adelante a la

derecha y hacia atrás a la izquierda. En la imagen 4.36., el perímetro azul se tomó como base para observar el sentido del error.

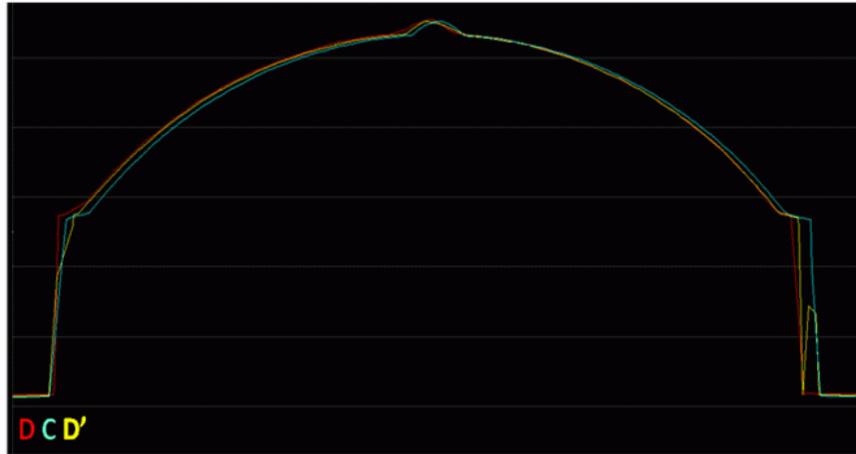


Imagen 4.36. Verificación de desalineación por deriva

Para la corrección se utilizó el siguiente procedimiento:

- 1) Recolección de datos en dos líneas de vuelo traslapadas, sobre una superficie con pendiente regular. Proceso con error de deriva, valor de partida cero.
- 2) Generación de modelos de superficie para cada línea de vuelo (Imagen 4.37.)
- 3) Selección de área con pendiente regular en la dirección de la ruta en el borde de un ancho de barrido y el centro del otro ancho de barrido (línea roja en Imagen 4.37.)
- 4) Trazo de perfil sobre la ruta en ambas superficies (Imagen 4.38.) Si el valor de la deriva es correcto, deberán coincidir las superficies. Si las superficies no coinciden, se mide la separación y la distancia desde el nadir. Se ajusta el valor inicial del error mediante la siguiente ecuación:

$$\arctan(\alpha) = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{adyacente}} = \frac{\text{separacion entre lineas}}{\text{distancia desde el nadir}} = \frac{0.945}{422.5420} = 0.002236447 \text{ radianes}$$

Ecuación 4.4

- 5) Reproceso con valor de error de -0.002236447 con lo que se mueven los datos hacia delante a la derecha y hacia atrás a la izquierda.

- 6) Verificación para comprobar que los perfiles coincidan con el valor ajustado del error por deriva (Imagen 4.39.)

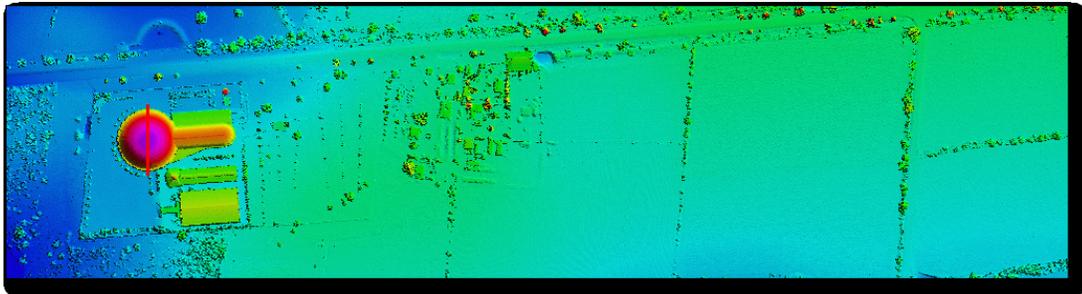


Imagen 4.37. Área con pendiente regular en la dirección de la ruta

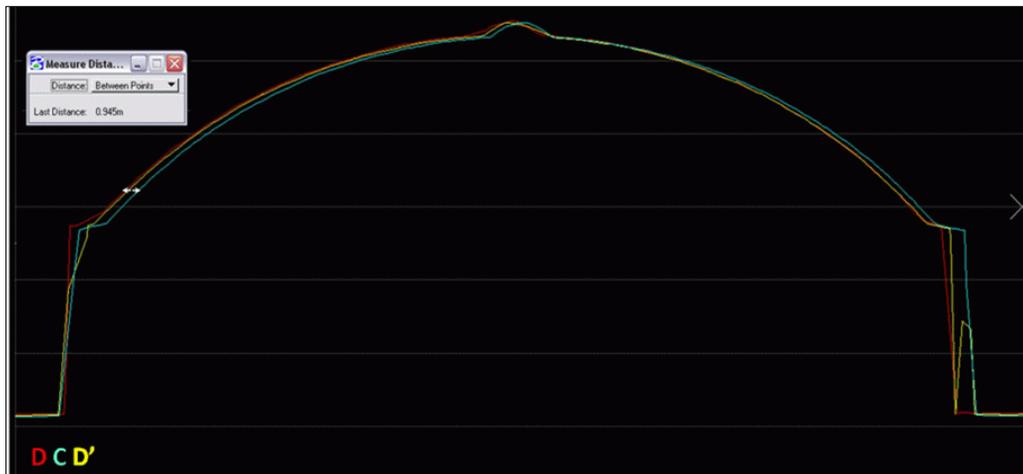


Imagen 4.38. Trazo de perfil sobre la ruta para verificar coincidencia de superficies

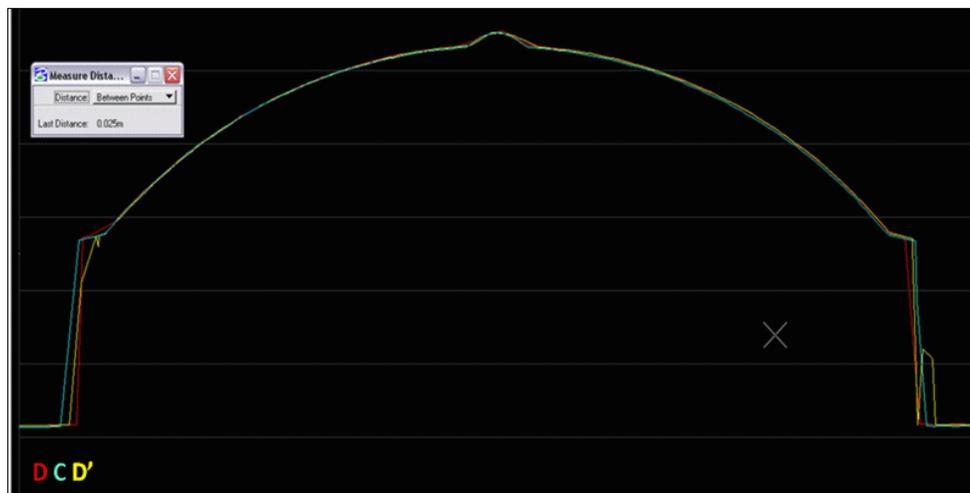


Imagen 4.39. Verificación para comprobar que los perfiles coincidan con el valor ajustado del error por deriva

Resultados

La tabla 4.7., resume los valores calculados:

CALIBRACIÓN ABRIL 2009		
PARÁMETROS	CALIB_ANTES	CALIB_NUEVA
ROLL	-0.023072832	-0.023254652
PITCH	0.004830418	0.004963266
HEADING	-0.001443773	-0.002236448
PITCH ERROR SLOPE	0.000026121	0.000026104

Tabla 4.7. Valores calculados

Verificación de los valores de parámetros de calibración

A partir de los nuevos valores, se procesaron datos de dos líneas de vuelo para comprobación con datos normalizados de producción, efectuando lo siguiente:

- La inicialización y cierre de sesión se realizó en tierra, con la base AGU06 ubicada dentro del área de hangares en el Aeropuerto Jesús Terán.
- Se realizó el cálculo de la trayectoria, obteniéndose una precisión dentro de la trayectoria de +0.05 m y -0.03 m.
- Se generaron 2 archivos *.LAS y 2 *.TRJ
- Se revisó la distribución geométrica (tabla 4.9.) a la totalidad de los datos, obteniéndose los siguientes resultados:

*.LAS	Velocidad de Vuelo (Nudos)	Altura de Vuelo (m)	Ángulo de Barrido	Pulse Rate Hz	Scan Rate Hz	Densidad de Puntos/M ²			Along Track (m)			Cross Track (m)			Intensidad promedio
LDR090414_214649_1.LAS	157	1410	45	75300	39.3	0.471	0.458	0.458	2.07	1.95	1.49	1.70	1.63	1.69	144/255
						Prom.	0.462	Prom.	1.836	Prom.	1.673				
LDR090414_220030_1.LAS	170	1413	45	75300	39.3	0.497	0.522	0.509	2.13	2.04	2.15	1.71	1.70	1.77	142/255
						Prom.	0.509	Prom.	2.10	Prom.	1.72				

Tabla 4.8. Distribución Geométrica de los estados

Se realizó el despliegue de la nube de puntos de las dos líneas voladas para verificar los valores de los parámetros de calibración (imagen 4.40.)

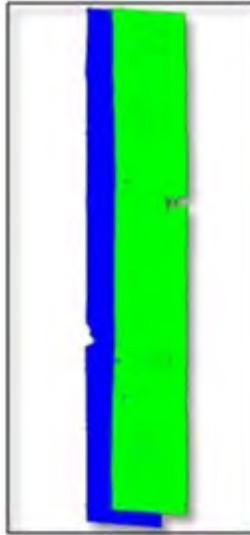


Imagen 4.40. Despliegue de nube de puntos

Con el fin de verificar completitud y calidad de los datos ajustados se generó un Modelo Digital de Superficie (Imagen 4.41.)

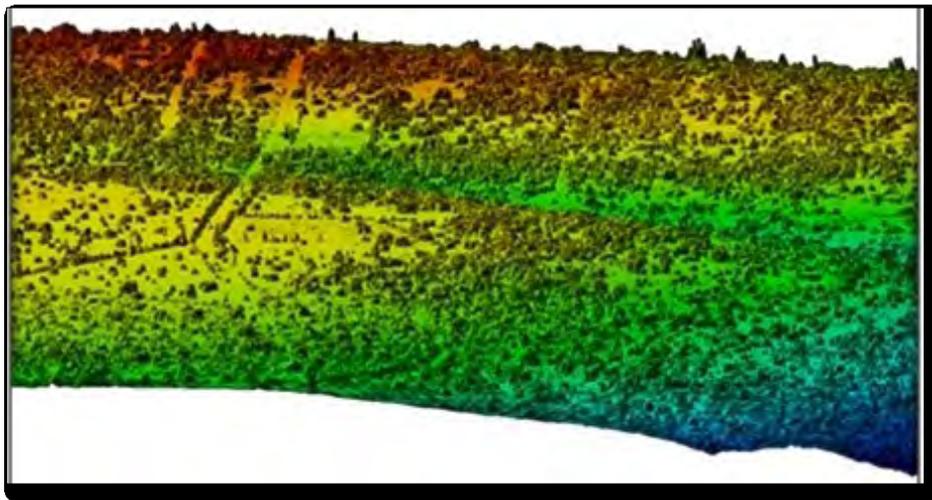


Imagen 4.41. Modelo Digital de Superficie de datos procesados

Conclusiones del procedimiento aplicado

En la verificación del procedimiento seguido durante la calibración descrita en el capítulo se observó en lo general que las etapas de trabajo son las indicadas para

obtener datos útiles que permiten calibrar los datos; sin embargo, se planteó hipotéticamente que partiendo de valores de desalineación en cero, para cada tipo de error, se tendría una mejor estimación y eficiencia en el procedimiento.

No fue necesario realizar el ajuste de todos los parámetros susceptibles de presentar desajuste. Lo anterior expresa que las condiciones de operación y cuidado del equipo han sido las adecuadas, que el sitio donde se coloca la Unidad de Medición Inercial mantiene cierta estabilidad y prueba de ello son las mínimas variaciones en el cálculo del **offset** entre ésta y la antena GPS.

Como valor agregado se aplicó un procedimiento denominado "afinación de la calibración" utilizando un software que aplica ajuste por mínimos cuadrados para suavizar los datos.

El tiempo de respuesta para entregar los valores de calibración se redujo al contar con una experiencia previa y tener un mayor conocimiento de los tipos de errores, sin tener necesidad de corregir la torsión, la distancia y la intensidad durante el segundo ejercicio.

Después de haber obtenido los ángulos de desalineación a partir de los cálculos geométricos realizados sobre los puntos LiDAR en diferentes líneas de vuelo, se aplicó un ajuste de parámetros mediante procesos semiautomáticos para reparar errores sistemáticos de orientación en los datos. La corrección automática de los parámetros de posición y orientación podría significar una mejor exactitud en el producto final en un futuro inmediato una vez que se realicen más ejercicios prácticos, se lleve una estadística comparativa entre métodos y se aprovechen más las imágenes de intensidad.

Al comparar perfiles de distintas líneas ajustadas y los modelos digitales generados, se observó que los valores de corrección obtenidos son compatibles y esto se puede apreciar a simple vista en los modelos generados (Imagen 4.42 a.)

El método de calibración semiautomático (Imagen 4.42 b.) permitió tener una redundancia en los valores obtenidos mediante cálculos geométricos, no obstante es recomendable seguir realizando la calibración mediante cálculos geométricos y verificar con el proceso semiautomático la redundancia de los ángulos de corrección obtenidos.

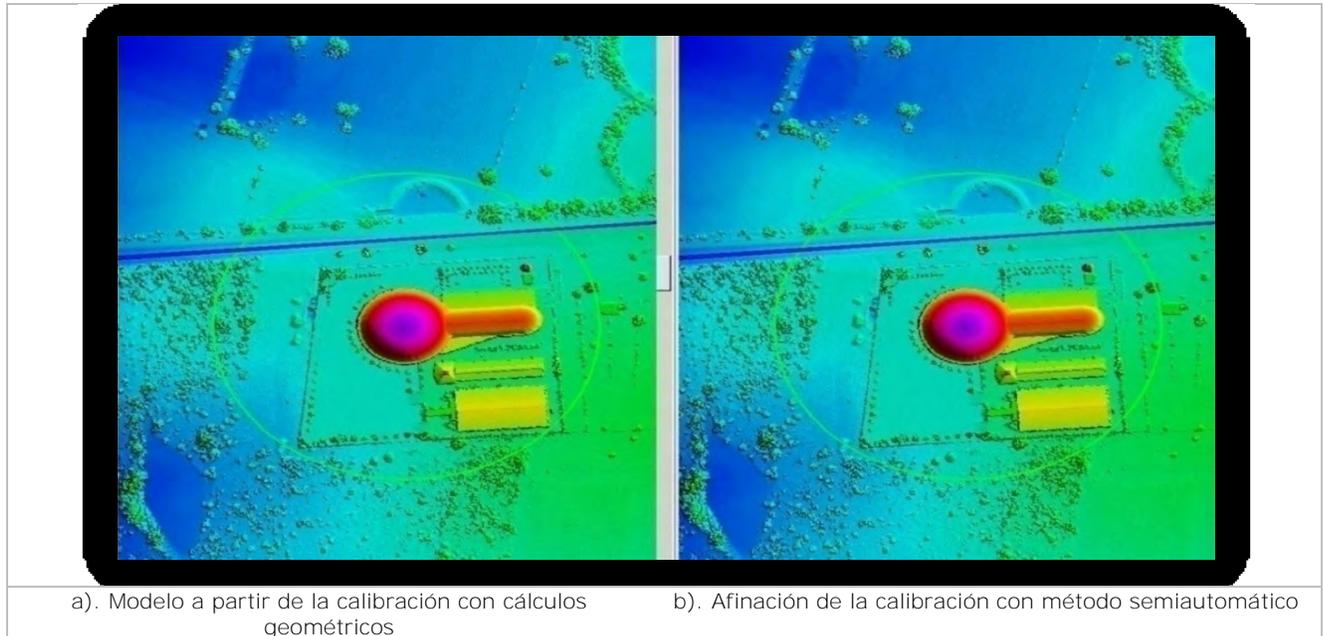


Imagen 4.42. [a y b] Comparación gráfica de métodos de calibración

Capítulo 5 Conclusiones y trabajos futuros

Introducción

A lo largo de los capítulos precedentes se mostró la teoría, el estado actual del uso de la tecnología LIDAR en el INEGI, el procedimiento de calibración que se implementó dentro de la línea de producción institucional, cuya propuesta se refiere a la realización de un proceso heurístico y determinístico a partir de cálculos geométricos con datos de vuelo predefinidos para el análisis de cada fuente de error, su comprobación a partir de las oportunidades que se dieron a lo largo de poco más de un año (2008-2009).

Si bien el procedimiento de trabajo planteado ha arrojado buenos resultados, es inapropiado afirmar que sea el mejor debido a que no sigue un procedimiento matemático riguroso. Aunque se cuenta con un software que realiza un ajuste por mínimos cuadrados, aún es una caja negra en lo referente a la aplicación de pesos a los datos y tener datos limitados de verificación en campo derivados del ajuste. El procedimiento se aplica a partir de la detección de errores sistemáticos en los datos. No se ha requerido un ajuste completo de todas las fuentes de error ya que algunas no se han presentado, lo cual habla, en parte, tiene que ver con el buen cuidado del sistema y sus componentes.

En los ejercicios las correcciones más comunes fueron para alabeo, cabeceo, pendiente por cabeceo y deriva.

La presente propuesta habría sido solamente una mera descripción hipotética sin comprobación en caso de que no haberse detectado sistematicidades en los datos. Los ejercicios realizados permitieron precisar un procedimiento propio e incorporarlo a la línea de producción LiDAR. Algunas sistematicidades no se descubrieron de manera inmediata por hacerse revisiones aleatorias a los datos sin un procedimiento estadístico, lo que determinó revisiones a la totalidad de los datos. Este monitoreo se derivó del descubrimiento de sistematicidades en el ajuste, observándose diversos artefactos y escalonamientos en las líneas *.LAS que forman nube de puntos.

Aportaciones de la investigación

El diseño de un procedimiento flexible de calibración permitió profundizar en las características propias de cada tipo de error y sus fuentes para el monitoreo del comportamiento de los datos procesados, aplicando controles estrictos.

Durante el desarrollo de la tesis se revisaron todas las etapas del proceso de datos, logrando con ello consolidar procedimientos de trabajo, como la determinación de la excentricidad entre el centro de fase de la antena GPS y el centro óptico del sistema; la determinación de las características específicas para la captura de los datos (aéreos y terrestres); así como los pasos para la corrección de fuentes de error sistemáticas.

De manera específica durante el trabajo de investigación se realizaron mejoras a las metodologías de:

- Cálculo de trayectoria con aplicación de datos GPS
- Posicionamiento Preciso del Punto (PPP, por sus siglas en inglés)
- Elaboración de metadatos y el control de producción mediante SIG
- Obtención de trayectoria y detección de huecos
- Respaldo de datos
- Control de calidad mediante MDE
- Ajuste y edición de líneas
- Afinación de la calibración

Se analizaron diversas problemáticas, se propusieron soluciones y se determinaron especificaciones mínimas de trabajo. No obstante, se requiere avanzar con más detalle en la determinación de especificaciones considerando aspectos tecnológicos, estándares de exactitud posicional, normas internacionales, entre otros aspectos, que permitan uniformar levantamientos, el tratamiento de datos y su compatibilidad, comparabilidad y compartibilidad.

Otra aportación consistió en comprobar los valores de los parámetros de corrección estimados mediante el procesamiento de datos obtenidos de manera inmediata a la

colecta de datos de calibración que a su vez sean parte del sistema de producción cartográfica digital nacional.

El control geodésico terrestre se adecuó para aportar la mayor cantidad de datos posibles para el ajuste y la comprobación de datos LiDAR. Se realizó la actualización de especificaciones para el control terrestre con GPS métodos de levantamiento estático y estático rápido.

Líneas de investigación futuras

Se requiere considerar la realización de procedimientos de calibración más analíticos que permitan un mejor modelamiento de los efectos de desalineación. Lo anterior requiere tomar en cuenta que los puntos láser tienen una distribución pseudoaleatoria en el terreno y no tienen conectividad.

Es necesario determinar las especificaciones reales de los levantamientos y productos obtenidos a la fecha, analizando su repercusión en la línea de producción y su costo beneficio. Las especificaciones que se determinen deberán considerar la utilización del CEP95.

Es esencial profundizar en la evaluación de la calidad de los productos resultantes a efecto de que contribuya a la definición de especificaciones más reales que consideren el contexto nacional, para informar la exactitud mediante los metadatos y acorde a los requerimientos de cada proyecto, que facilite el uso de datos de diversas fuentes y tipo de sensores. La exactitud deberá evaluarse considerando la topografía (llanuras, montañas, selvas, desiertos, etc.) del terreno y regiones fisiográficas. No se debe considerar la misma exactitud para todos los tipos de terreno, se debe llevar un monitoreo estadístico al respecto. En resumen, se considera necesario determinar niveles de exactitud de valores centimétricos a varios metros de acuerdo a escalas de vuelo, tipos de terreno, aplicaciones de los datos y resoluciones de los productos resultantes.

Como parte del aseguramiento de la calidad de los datos LiDAR será necesario e imprescindible el establecimiento de todos los controles que faciliten la planificación, la

ejecución y el control de las actividades de la línea de producción nacional. Por lo anterior, el procedimiento de calibración es determinante en la declaración de la calidad.

Se debe profundizar en el estudio y la aplicación de imágenes de intensidad junto con imágenes de distancia para derivar discrepancias entre franjas traslapadas en las direcciones X, Y, Z. Si las discrepancias estimadas exceden la exactitud esperada del sistema, se podría determinar un nuevo procedimiento de calibración para asegurar la ausencia de sesgos sistemáticos en los valores de los parámetros del sistema.

Se debe investigar sobre un enfoque de control de calidad con base en la compatibilidad de superficies y el registro de los datos crudos en franjas traslapadas para identificar sesgos en el sistema de adquisición de datos.

Lo anterior debe complementarse con medidas externas independiente de la calidad comprobada de los datos. Su realización depende del análisis mediante control terrestre, usando objetivos detectables en el terreno que contengan puntos LiDAR. La idea fundamental es comparar las coordenadas de los objetivos extraídos con las coordenadas levantadas mediante el análisis del Error Medio Cuadrático, el valor resultante es una medida de la calidad de la superficie derivada.

Otro aspecto en el que se recomienda profundizar se refiere a todos los entregables dentro de un proyecto, mismos que se generalizan en: planes de vuelo (diseño geométrico), control geodésico, informe de vuelo, de verificación de calibración y de control geodésico, métodos de procesamiento y metodologías de trabajo, datos relativos a la configuración del sistema, exactitud de los datos y productos derivados, datos crudos, índice para SIG, datos GPS de campo procesados y datos IMU/GPS, entre otros, que demandan implementación de base de datos y aplicaciones para consulta y análisis espacial.

Es recomendable integrar una base de datos de altimetría LiDAR, incluso de transformación de alturas elipsoidales a ortométricas para análisis estadístico.

Producto de divulgación

- La tesis como material auxiliar bibliográfico y apoyo a la capacitación.
- Presentación de conferencias en los foros que determine la UNAM y el INEGI con relación al tema principal de la tesis y temas auxiliares referentes a Estado del Arte y Marco Teórico.
- Artículo en revista que determine UNAM e INEGI

Comentarios finales

Entre los retos por atender están los relacionados a desarrollos informáticos propios para poder competir con los costos de hardware y software, además que no resuelven todas las necesidades del usuario; generar programas de capacitación especializada para técnicos de procesamiento y analistas e incrementar su nivel de experiencia; optimizar procesos de trabajo para reducir costos de los datos.

Es claro que las tendencias de desarrollo de la tecnología apuntan a que se obtendrá una mayor densidad de puntos y seguramente costos de producción menores; el software de proceso será más demandado con la consiguiente reducción de costos y un análisis menos sofisticado, además de poderse combinar los datos con otras fuentes de percepción remota; asimismo se incrementarán las aplicaciones de la tecnología para aspectos hasta ahora insospechados.

La calibración de valores de parámetros de desalineación continuará al verse involucrados sistemas inerciales; no obstante se debe profundizar en sus conceptos y métodos, encontrar mejores soluciones en tiempos más cortos y con mayor repetitividad como parte de las especificaciones de la calidad.

Glosario

Aceleración angular. Es el cambio que experimenta la velocidad angular por unidad de tiempo. Se denota por la letra griega alfa (α). Al igual que la velocidad angular, la aceleración angular tiene carácter vectorial. Se expresa en radianes por segundo al cuadrado, o s^{-2} , ya que el radián es adimensional.

Atmósfera terrestre. La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea a la Tierra. Está compuesta por: oxígeno (20,946%) y nitrógeno (78,084%), con pequeñas cantidades de argón (0,93%), dióxido de carbono (variable, 0,033% ó 330 ppm), vapor de agua (aprox. 1%), neón (18,2 ppm), helio (5,24 ppm), kriptón (1,14 ppm), hidrógeno (5 ppm) y ozono (11,6 ppm). Protege la vida de la Tierra absorbiendo en la capa de ozono parte de la radiación solar ultravioleta, reduciendo las diferencias de temperatura entre el día y la noche, y actuando como escudo protector contra los meteoritos. El 75% de la atmósfera se encuentra en los primeros 11 km de altura desde la superficie planetaria.

Calibración. Ajustar, con la mayor exactitud posible, las indicaciones de un instrumento de medida con los valores de la magnitud que ha de medir.

Campo Instantáneo de Visión. (IFOV, siglas en inglés) El ángulo de cono dentro del cual la energía incidente es enfocada en el detector. El campo de visión instantánea es comúnmente expresado en milliradianes.

Campos de control. Conjunto de puntos GPS posicionados sobre un área plana para usarse en la corrección de los errores sistemáticos en altura dentro de la nube de puntos LiDAR. En principio, se aplica el ajuste dinámico a la línea transversal; posteriormente se compara la línea ajustada con cada una de las líneas de barrido, y se obtiene una diferencia de altura para cada una de ellas. A partir de esa diferencia, la altura de cada una de las líneas es corregida. Este método de corrección se constituye como confiable para el ajuste de la nube de puntos a los campos de control, aunque el tiempo de procesamiento es relativamente alto.

CEP (Circular Error Probable, por sus siglas en inglés) Es la Representación de la Exactitud del Posicionamiento Horizontal CEP se identifica por el radio de un círculo que define la región de

confianza, dentro de la cual existe un 50% de probabilidad de que se encuentre el valor verdadero de una cantidad cualquiera. El estadístico empleado para representar la exactitud posicional horizontal de un punto es el CEP, el cual se determina por la relación $CEP=0.5887(\text{desviación estándar de la latitud } \sigma_{\phi} + \text{desviación estándar de la longitud } \sigma_{\lambda})$, en metros. Mientras que el CEP en el nivel de confianza del 95% (CEP_{95}) está dado por $CEP_{95} = 2.0789CEP$, con lo que se tiene $CEP_{95} = 1.2238 (\sigma_{\phi} + \sigma_{\lambda})$.

Compatible. Que puede funcionar, ser útil y conforme con otros dispositivos, aparato, programa, datos.

Compleitud. En Cartografía, por completitud se entiende la relación entre los objetos presentes en la base de datos y el universo real, la capacidad de unos datos para describir un área geográfica. La completitud indica por tanto el nivel de confiabilidad de la información actual respecto a la información original. Indica tanto la ausencia (omisión) como el exceso (comisión) de objetos en una base de datos. La presencia de todos los objetos del mundo real en un modelo dependerá de la selección de temas y de reglas de generalización.

Diodo Laser. Los Diodos láser, emiten luz por el principio de emisión estimulada, la cual surge cuando un fotón induce a un electrón que se encuentra en un estado excitado a pasar al estado de reposo, este proceso está acompañado con la emisión de un fotón, con la misma frecuencia y fase del fotón estimulante. Para que el número de fotones estimulados sea mayor que el de los emitidos de forma espontánea, para que se compensen las pérdidas, y para que se incremente la pureza espectral, es necesario por un lado tener una fuerte inversión de portadores, la que se logra con una polarización directa de la unión, y por el otro una cavidad resonante, la cual posibilita tener una trayectoria de retroalimentación positiva facilitando que se emitan más fotones de forma estimulada y se seleccione ciertas longitudes de onda haciendo más angosto al espectro emitido.

Diseño Geométrico. Definición de cobertura LiDAR mediante la cual se programan líneas de barrido a determinadas alturas, intensidad y ángulo de barrido de datos, entre otros aspectos.

Divergencia. La divergencia de un haz electromagnético es una medida angular del incremento en el diámetro del haz con respecto a la distancia desde la apertura óptica o la apertura de la antena desde donde emerge el haz. El término es relevante solo en el "campo lejano", lejos de cualquier foco del haz. De todos modos, en términos prácticos, el "campo

lejano" puede comenzar físicamente cerca de la "apertura de radiación", dependiendo del el diámetro de apertura y la **longitud de onda** de funcionamiento.

Error cuadrático medio. Consiste en la suma de las diferencias al cuadrado entre lo real y lo proyectado por el modelo.

Errores sistemáticos. En estadística, un error sistemático es aquel que se produce de igual modo en todas las mediciones que se realizan de una magnitud. Puede estar originado en un defecto del instrumento, en una particularidad del operador o del proceso de medición, etc. Se contrapone al concepto de error aleatorio. Estos errores son llamados así en razón de que su característica es que se repiten exactamente y en el mismo sentido, para todas las mediciones que se hagan en iguales condiciones, de tal manera que las causas perturbadoras que conducen muchas veces a estos errores, pueden ser expresadas en fórmulas matemáticas. Los valores medidos pueden ser "**corregidos**" o "**reducidos**".

Los errores sistemáticos son consecuencia de la falta de ajuste e imperfección en la calibración de los mismos, mientras que los restantes, denominados accidentales son debidos a las variaciones en el tiempo de la magnitud calibrada (inestabilidad), a su diseño constructivo, a los errores cometidos en el propio contraste y a los patrones utilizados.

Espectro. En física, cualquier serie de energías arregladas de acuerdo a longitudes de onda (o frecuencia); Las series de imágenes producidas cuando un rayo de energía radiante es sujeto a dispersión. Una banda de luz coloreada en arco iris es formada cuando la luz blanca es pasada a través de un prisma o un enrejado de difracción. Esta banda de colores resulta del hecho de que las diferentes longitudes de onda de la luz están inclinadas en varios grados por el medio dispersante, y es evidencia del hecho de que la luz blanca está compuesta de luz coloreada de varias longitudes de onda.

Espectro electromagnético. El intervalo total de longitudes de onda de la radiación electromagnética, extendiéndose desde las ondas de radio hasta los rayos cósmicos.

Estación base. Es un Vértice de Posicionamiento Geodésico que permite determinar la posición y orientación del sistema láser localizado dentro de la aeronave. Permite realizar en términos numéricos la corrección diferencial de los datos GPS (tierra-aire) para determinar la posición de la antena en el avión cada 0.5 segundos; el espaciamento lineal dependerá de la

velocidad del avión. Con velocidades de operación a 160 nudos se obtendría una posición cada 40 metros. Los datos obtenidos de la unidad de medición inercial y del GPS se combinan a determinadas frecuencias, utilizando programas de posprocesamiento. Así, en lugar de tener posiciones conocidas a cada medio segundo se obtienen posiciones a cada 0.005 segundos o 200 posiciones por segundo.

El objetivo final es determinar la posición del sensor láser en cada momento de la trayectoria de vuelo, para posteriormente obtener las X, Y, Z de cada posición y el valor de intensidad en cada punto.

Estocástico(a). En estadística, y en concreto teoría de la probabilidad, un proceso aleatorio o proceso estocástico es un concepto matemático que sirve para caracterizar; es una sucesión de variables aleatorias (estocásticas) que evolucionan en función de otra variable, generalmente, el tiempo. Cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad y, entre ellas, pueden estar correlacionadas o no.

Exactitud. Se refiere a la cercanía del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo, más exacta es una estimación. La exactitud de un resultado se expresa mediante el error absoluto que es la diferencia entre el valor experimental y el valor verdadero.

Firma espectral. Patrón de la distribución de longitudes de onda de la radiación reflejada o emitida por un objeto de la escena.

Gradiente. En cálculo vectorial, el gradiente ∇f de un campo escalar f es un campo vectorial que indica en cada punto del campo escalar la dirección de máximo incremento del mismo. El gradiente se representa con el operador diferencial nabla seguido de la función (cuidado de no confundir el gradiente con la divergencia, ésta última se denota con un punto de producto escalar entre el operador nabla y el campo)

Geomática. Es la ciencia y tecnología de obtención, análisis, interpretación, distribución y uso de información geográfica. Comprende un amplio rango de disciplinas que pueden unirse para crear una visión detallada y comprensible del mundo real [Geomatics Canada, Canada].

Geometría satelital. Es el equivalente a la "fuerza de figura" que se utiliza en las mediciones geodésicas. En este caso, la precisión se deteriora en la medida que los satélites se encuentran más cercanos en el espacio, produciendo un ángulo pequeño con vértice en la antena del receptor y por lo tanto una definición pobre de la intersección de las esferas del modelo matemático correspondiente a estos satélites. Existe un estándar denominado Dilución de la Precisión, DOP (Dilution Of Precision) que es un número adimensional que permite identificar el efecto que produce la geometría satelital sobre la precisión de las mediciones. Normalmente un valor menor a 4 permite estar dentro de las especificaciones de precisión del equipo en uso. A su vez, su efecto se descompone en: PDOP (Posición), GDOP (Geometría), HDOP (Horizontal), VDOP (Vertical), TDOP (Tiempo). El que se utiliza comúnmente es el PDOP.

GPS. Sistema de posicionamiento global (Global Positioning System). Sistema formado por un conjunto de satélites para proporcionar la posición precisa de un punto en la superficie terrestre.

Heurístico. Se denomina heurística a la capacidad de un sistema para realizar de forma inmediata innovaciones positivas para sus fines. La capacidad heurística es un rasgo característico de los humanos, desde cuyo punto de vista puede describirse como el arte y la ciencia del descubrimiento y de la invención o de resolver problemas mediante la creatividad y el pensamiento lateral o pensamiento divergente. La palabra heurística procede del término griego **εὕρισκειν**, que significa «hallar, inventar» (etimología que comparte con eureka). La palabra heurística aparece en más de una categoría gramatical. Cuando se usa como sustantivo, identifica el arte o la ciencia del descubrimiento, una disciplina susceptible de ser investigada formalmente. Cuando aparece como adjetivo, se refiere a cosas más concretas, como estrategias heurísticas, reglas heurísticas o silogismos y conclusiones heurísticas. Claro está que estos dos usos están íntimamente relacionados ya que la heurística usualmente propone estrategias heurísticas que guían el descubrimiento.

Histéresis. (hysteresis) Demora entre la acción y la reacción de un instrumento de medición. La histéresis es la cantidad de error que resulta cuando ocurre esta acción.

Imagen. La representación de una escena como es grabada por un sistema de percepción remota. Aunque imagen es un término genérico, está comúnmente restringido a representaciones adquiridas por métodos no fotográficos.

INS. (Sistema de Navegación Inercial): permite medir la orientación exacta del sensor. Este sistema mide los ángulos con una precisión de 0.001 grados, lo que permite compensar los movimientos bruscos que sufre el sensor a bordo del avión, pudiendo calcular en cada momento las coordenadas exactas del punto que estamos midiendo en el terreno.

Intensidad. Medida de la energía reflejada desde una superficie.

La ionosfera o ionósfera. Es la parte de la atmósfera terrestre ionizada permanentemente debido a la fotoionización que provoca la radiación solar. Se sitúa entre la mesosfera y la exosfera, y en promedio se extiende aproximadamente entre los 85 km y los 700 km de altitud, aunque los límites inferior y superior varían según autores y se quedan en 80-90 y 600-800 km respectivamente. Por otra parte, algunos consideran que la alta ionosfera constituye el límite inferior de la magnetosfera, solapándose ligeramente ambas capas (entre los 500 y 600-800km). La ionosfera también se conoce como termosfera por las elevadas temperaturas que se alcanzan en ella debido a que los gases están en general ionizados. Si el sol está activo, las temperaturas en la termosfera pueden llegar a 1 500°C; sin embargo, estas elevadas temperaturas no se corresponden con la sensación de calor que tendríamos en la troposfera porque en la termosfera la densidad es muchísimo más baja. Los gases aparecen ionizados porque esta capa absorbe las radiaciones solares de menor longitud de onda (rayos gamma y rayos X) que son altamente energéticos.

Entre las propiedades de la ionosfera, encontramos que esta capa contribuye esencialmente en la reflexión de las ondas de radio emitidas desde la superficie terrestre posibilitando que éstas puedan viajar grandes distancias sobre la Tierra, gracias a las partículas de iones (cargadas de electricidad) presentes en esta capa. Además, en esta capa se desintegran la mayoría de meteoros, a una altura entre 80 y 110 km, debido al rozamiento con el aire y dan lugar a meteoros o estrellas fugaces.

Pero las estrellas fugaces no son el único fenómeno luminoso que ocurre en esta capa. En las regiones polares las partículas cargadas portadas por el viento solar son atrapadas por el campo magnético terrestre incidiendo sobre la parte superior de la ionosfera y dando lugar a la formación de auroras.

La presión atmosférica. Es la presión ejercida por los gases que conforman la atmósfera en cualquier punto de la misma. Normalmente se refiere a la presión atmosférica terrestre y al

aire, pero el término es extensible a la atmósfera de cualquier planeta o satélite y sus componentes.

La atmósfera en la Tierra tiene una presión media de 1013,25 hectopascales (hPa) (o milibares (mbar)) al nivel del mar, medido en latitud 45°. La medida de presión del Sistema Internacional de Unidades (SI) es el newton por metro cuadrado (N/m²) o Pascal (Pa). La presión atmosférica a nivel del mar en unidades internacionales es 101325 N/m² ó Pa.

Cuando el aire está frío, éste desciende, haciendo aumentar la presión y provocando estabilidad. Se forma, entonces, un anticiclón térmico. Cuando el aire está caliente, asciende, haciendo bajar la presión y provocando inestabilidad. Se forma entonces un ciclón o borrasca térmica.

Además, el aire frío y el cálido tienden a no mezclarse, debido a la diferencia de densidad, y cuando se encuentran en superficie, el aire frío empuja hacia arriba al aire caliente provocando un descenso de la presión e inestabilidad, por causas dinámicas. Se forma entonces un ciclón, o borrasca dinámica. Esta zona de contacto es la que se conoce como frente. Cuando el aire frío y el cálido se encuentran en altura, descienden en convergencia dinámica, haciendo aumentar la presión y provocando estabilidad, y el consiguiente aumento de la temperatura. Se forma, entonces un anticiclón dinámico.

La tropósfera. Es la capa de la atmosfera que está en contacto con la superficie de La Tierra. Tiene alrededor de 17 km de espesor en el ecuador y en ella ocurren todos los fenómenos meteorológicos que influyen en los seres vivos, como los vientos, la lluvia y los huracanes. Además, concentra la mayor parte del oxígeno y del vapor de agua. En particular este último actúa como un regulador térmico del planeta; sin él, las diferencias térmicas entre el día y la noche serían tan grandes que no podríamos sobrevivir. Es vital para los seres vivos. TROPOS = cambio; SFERA = esfera; Capa giratoria alrededor de la esfera.

LANDSAT. Un satélite orbital de la NASA no tripulado (anteriormente llamado ERTS) que transmite imágenes multispectrales, en el rango de 0.4 a 1.1 micrómetros, a estaciones receptoras terrestres.

LAS (archivos). El formato de archivos LAS es un formato público para el intercambio de datos LIDAR entre proveedores y clientes. Este formato de archivo binario es una alternativa

para los sistemas propietarios o para un sistema de intercambio de archivos ASCII que muchas compañías utilizan. El problema con los sistemas propietarios se aprecia en que no es sencillo pasar los datos de un sistema a otro. Existen dos problemas importantes con el intercambio de archivos ASCII. El primer problema es el rendimiento, porque la lectura e interpretación de los datos de elevación ASCII puede ser muy lenta y el tamaño del archivo puede ser extremadamente grande, incluso para cantidades pequeñas de datos. El segundo problema es que se pierde toda la información específica para los datos LiDAR. El formato de archivo LAS es un formato binario que mantiene la información específica para la naturaleza LiDAR de los datos a la vez que no es muy complejo.

Láser. Amplificación de la luz por emisión de radiación estimulada.

Línea de barrido. La banda estrecha de terreno que es barrida por el campo de visión instantáneo, por un detector en un sistema barreador.

Longitud de onda. La distancia entre crestas de ondas sucesivas u otros puntos equivalentes en una onda armónica.

Luz. Radiación electromagnética dentro de un rango de 0.4 a 0.7 micrómetros de longitud de onda, la cual es detectable por el ojo humano.

Metadatos. Son datos altamente estructurados que describen información, el contenido, la calidad, la condición y otras características de los datos. Es "información sobre información" o "datos sobre los datos". Algunos ejemplos de información que se puede describir usando metadatos son: impresa, audiovisual, geoespacial, etc.

Principales usos de los metadatos Organizar y mantener el acervo del conjunto de datos de una organización. Proporcionar información para catálogos de datos y centros de distribución de metadatos (clearinghouses). Proveer información necesaria para interpretar y procesar datos transferidos por otra organización.

Estructura de los metadatos Los metadatos están estructurados por un mínimo de elementos tales como: título, autor, fecha de creación, etc. Típicamente los elementos que conforman los metadatos están definidos por algún estándar, donde los usuarios que deseen compartir metadatos están de acuerdo con un significado preciso de cada elemento.

Nadir. El punto sobre el terreno verticalmente debajo del centro de un sistema de percepción remota.

Nube de puntos LiDAR. La combinación de los datos de posición del sensor y los datos de tiempo y ángulo de barrido en el instante de emisión-recepción, así como la distancia determinados por el sistema láser, permiten obtener la posición tridimensional de cada uno de los retornos de la señal láser.

Onda electromagnética. Onda que comprende campos eléctrico y magnético mutuamente perpendiculares e interdependientes. En el vacío, una onda electromagnética se propaga a la velocidad de la luz

Orientación en un sistema inercial. Valor conjugado de las medidas realizadas por giróscopos (de estado sólido, o sistemas micro electromecánicos), acelerómetros, y magnetómetros, que proporcionan datos en los tres ejes del espacio, integrados todos en un sistema inercial. Algunos sistemas utilizan receptores GPS para mejorar la estabilidad a largo plazo de los giróscopos. Como técnica de fusión sensorial, es habitual emplear Filtros de Kalman, de tal manera que se obtenga una única solución a partir de las diversas fuentes de datos originales.

Percepción Remota Activa. Métodos de percepción remota que proporcionan su propia fuente de radiación electromagnética.

Percepción Remota Pasiva. Percepción de energía reflejada naturalmente o radiada desde el terreno.

Precisión: Grado de cercanía entre sí de mediciones repetitivas de una misma cantidad.

Pseudoaleatorio. Es parte fundamental del receptor GPS. Físicamente se trata de una secuencia digital muy complicada. O sea una señal que contiene una sucesión muy compleja de pulsos "on" y "off". La señal es tan compleja que es casi un ruido eléctrico generado al azar. De allí su denominación. El código es tan complejo asegurando que el GPS no se sintonice por accidente con otra señal. Siendo el GPS un aparato tan complejo, las posibilidades que una señal tenga el mismo código aleatorio son prácticamente imposibles.

Pixel. Una contracción de un elemento de una imagen.

Posición. Angulo de orientación de un sistema de percepción remota con respecto a un sistema geográfico de referencia.

Principio Doppler. Describe el cambio en la frecuencia observada de ondas electromagnéticas u otras, causadas por el movimiento relativo entre la fuente de las ondas y el observador.

Procesamiento Interactivo. Método de procesamiento de datos a través del cual el operador observa los resultados preliminares y puede alterar las instrucciones al computador para obtener óptimos resultados.

Pulso. Grupo de ondas de radiación electromagnética con una distribución espacial tal que se encuentran confinadas en un corto intervalo de tiempo.

RADAR. Radio Detección y Distancia.

Radiación Electromagnética. Energía propagada a través del espacio o a través de medios materiales en forma de una interacción avanzada entre campos eléctricos y magnéticos.

Rayo. Pulso de energía enfocado.

Relación señal/ruido. Se define como el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe.

Resolución de Ambigüedades. La ambigüedad de fase representa un valor entero arbitrario establecido por el receptor GPS al comienzo de la recepción de un determinado satélite. Es un sistematicidad presente en todas las observaciones registradas para dicho satélite. Para obtener la máxima precisión en la determinación relativa de coordenadas a partir de mediciones de fase es condición indispensable que los parámetros de ambigüedad de las dobles diferencias puedan ser convenientemente separados de los parámetros de coordenadas. El carácter entero de los parámetros de ambigüedad es una característica que ayuda a conseguirlo. Al proceso cuyo objetivo es encontrar el valor entero correcto de las ambigüedades se le denomina resolución de ambigüedades. Una vez resueltas las ambigüedades, las mediciones de fase actúan como si fueran mediciones de código con precisión milimétrica, lo que constituye la clave para llevar a cabo con precisión la determinación relativa de coordenadas.

Resolución. Capacidad de un sistema para reproducir un objeto aislado, o para separar objetos o líneas espacialmente cercanos. Subdivisión:

- **Resolución espacial:** Medida de la menor separación espacial o angular entre dos objetos discernibles en una imagen.
- **Resolución espectral:** Medida de la capacidad de un sistema sensor para diferenciar radiación electromagnética de diferentes longitudes de onda.
- **Resolución radiométrica:** Varianza esperada en cada estimación de la reflectividad de una escena registrada en la imagen correspondiente.
- **Resolución temporal:** Frecuencia de adquisición en el tiempo de una misma escena por un sistema sensor

Ruido. Eventos aleatorios o repetitivos que obscurecen o interfieren con la información deseada.

Sensor. Un dispositivo que recibe radiación electromagnética y la convierte en una señal que puede ser grabada y desplegada como datos numéricos o como una imagen.

Señal. Término genérico empleado para denotar la descripción matemática de una onda o pulso.

Traslapo. El grado en el cual imágenes o fotografías adyacentes cubren el mismo terreno, expresado en porcentajes.

Unidad de Navegación Inercial. INS por sus siglas en inglés (Inertial Navigation System), en forma simple, a partir de giróscopos y acelerómetros, permite obtener un plano de referencia estabilizado (es capaz de determinar los movimientos, en los 3 ejes, de una plataforma), facilita el cálculo de coordenadas.

INS por sus siglas en inglés (Inertial Navigation System), sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, sensores de movimiento (acelerómetros) y sensores de rotación giróscopos para calcular continuamente la posición, orientación, y velocidad de un objeto en movimiento sin necesidad de referencias externas.

Ventanas Atmosféricas. Intervalos de longitud de onda en los cuales la atmósfera no bloquea el paso de la radiación electromagnética.

Vértice de Posicionamiento Geodésico. Permite medir la orientación exacta del sensor. Este sistema mide los ángulos con una precisión de 0.001 grados, lo que permite compensar los movimientos bruscos que sufre el sensor a bordo del avión, pudiendo calcular en cada momento las coordenadas exactas del punto que estamos midiendo en el terreno.

Referencias

Ackermann F. Practical Experience with GPS-supported Aerial Triangulation, Photogrammetric Record , 1994, 16(84):861-874

Arellano Javier, Chávez José Victor, 2008. "Procesos y Productos Geodésicos LIDAR". Memoria, Reunión Nacional de Geografía 2008, Durango, México.

Arellano Javier, Chávez José Victor, Durón Juan Javier, 2007. "Línea de Producción LIDAR". Memoria, Convención Nacional de Geografía 2007, Guadalajara, México.

Baltsavias E.P. "Airborne Laser Scanning: basic relations and formulas", Geodesy and photogrammetry Institute, ETH. Hoenggerberg CH-8093 Zurich, Suiza, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing

Behan, Behan, A., Mass, H-G, Vosselman, G. "Steps towards Quality Improvement of Airborne Laser Scanner Data" Internet Publication. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Photogrammetry and Remote Sensing (2000).

Burman, H. Calibration and Orientation of Airborne Image and Laser Scanner Data Using GPS and INS, Dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Geodesy and Photogrammetry, 2000.

Charles K. Toth, "CALIBRATION AIRBORNE LIDAR SYSTEMS", Center for Mapping, The Ohio State University, 1216 Kinnear Road, Columbus, OH 43212-1154, USA, toth@cgm.ohio-state.edu. Commission II, WG II/2

Charles K. Toth, Jie Shan, "TOPOGRAPHIC LASER RANGING AND SCANNING, Principles and Processing", CRC Press, 2009

Crombaghs, M.J.E., brügelmann, R., and de Min, E.J., 2000, "On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data" International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam.

Csanyi, N.[Nora], Toth, C.K.[Charles K.], "IMPROVEMENT OF LIDAR DATA ACCURACY USING LIDAR-SPECIFIC GROUND TARGETS", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 73, No. 4, April 2007, pp. 385–396.

Filin S, 2003a. Recovery of systematic biases in laser altimetry data using natural surfaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(11), 1235–1242.

Filin S, 2003b. Analysis and implementation of a laser strip adjustment model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(3-W13), 65–70.

H. Kager, Discrepancies between overlapping scanner strips – simultaneous fitting of aerial laserscanner strips, Vienna University of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Gusshausstr. 27-29 / 122, A-1040 Wien, hq@ipf.tuwien.ac.at, 2001

INEGI "Metodologías para el procesamiento de datos LiDAR". Área de Procesamiento de Datos LiDAR antes de la Generación de Modelos Digitales de Elevación. Aguascalientes, México. 2008.

INEGI Notas del Curso "Entrenamiento para operadores ALS-502 en Sitio". Aguascalientes, México. Agosto 2008.

Jensen John R. Dr., "Remote Sensing and Digital Image Processing", 2004. Department of Geography, University of South Carolina, Columbia, SC 29208.

Krabill, W.B., Wright, C.W., et al. "Airborne Laser Mapping of Assateague National Seashore Beach." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 66, No. 1. ASPRS (Jan-00):

Krakiwsky, E.J., M.A. Abousalem. ENGO 361: Adjustment of Observations. Calgary: The University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 1995.

Kuang, S., "Geodetic Network Analysis and Optimal Design. Concepts and Applications." Ann Arbor Press. Michigan (1996).

Lira Chávez Jorge, "Introducción a la Percepción Remota", Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México"

Ministry of Agriculture and Lands, "LiDAR SPECIFICATIONS", Integrated Land Management Bureau (ILMB), BASE MAPPING AND GEOMATICS SERVICES, November, 2006. Versión 0.05. Integrated Land Management Bureau (ILMB), Base Mapping and Geomatic Services Branch.

Morin Kristian Walker, "A THESIS SUBMITTED TO FACULTY OF GRADUATE STUDIES IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FO THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE", Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, November, 2002. © Kristian Walker Morin 2002.

Natural Resources, Canada. "A Canada Centre for Remote Sensing Tutorial.PDF"

Schenk, T. 2001. Modeling and recovering systematic errors in airborne laser scanners. Proceedings of OEEPE workshop on Airborne laser scanning and Interferometric SAR for Detailed digital elevation models, Sweden, Kennert Torlegård (ed)

Schwarz, K.P., Wei, M., "INS/GPS Integration for Geodectic Applications: Lecture Notes ENGO 623" Department of Geomatics Engineering, University of Calgary. May 2000.

Vaughn, C. R., J. L. Bufton, W. B. Krabill, and D. L. Rabine, Georeferencing of Airborne Laser Altimeter Measurements. *International Journal of Remote Sensing. Vol. 17, No. 11. (1996)*