

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Ingeniería geomática aplicada al desarrollo de infraestructura civil en Pátzcuaro Michoacán

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geomático

P R E S E N T A

Luis Gerardo Santana Olalde

ASESOR DE INFORME

Dr. Roberto René Manzano Islas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado INGENIERIA GEOMATICA APLICADA AL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURA CIVIL EN PATZCUARO MICHOACAN que presenté para obtener el titulo de INGENIERO GEOMÁTICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

LUIS GERARDO SANTANA OLALDE
Número de cuenta: 316144094

Agradecimientos

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, su paciencia infinita y por cada sacrificio realizado para brindarme una educación de excelencia. Su apoyo constante, sus palabras de aliento en los momentos de mayor reto y el ejemplo de trabajo duro que me han transmitido día a día son la base de este logro. Este título también es de ustedes.

Al Ing. Victoriano López, por la apertura, el respaldo y la confianza depositada en mi trabajo al otorgarme la autorización para disponer de la información de su empresa. Su colaboración no solo facilitó los datos necesarios para fundamentar este informe, sino que también me permitió acercarme de manera práctica e integral a los retos del ejercicio profesional.

Al Dr. Roberto René Manzano Islas, por su invaluable acompañamiento, paciencia y profesionalismo como guía durante todo el proceso de estructuración y desarrollo de este proyecto. Sus observaciones certeras, su rigor académico y la generosidad con la que compartió su conocimiento fueron clave para orientar cada etapa de la investigación y llevar este documento a su conclusión con éxito.

A todas las personas e instituciones que de manera directa o indirecta sumaron su grano de arena para hacer posible la culminación de esta etapa universitaria.

Índice general

Agradecimientos II

1. Contexto y alcance profesional 1

1.1. Contexto general del proyecto 1
1.2. Participación de la Ingeniería Geomática 2
1.3. Objetivos 4
1.3.1. Objetivo general 4
1.3.2. Objetivos específicos 4
1.4. Alcances del trabajo profesional 5
1.5. Contexto territorial e histórico de Pátzcuaro 6
1.6. Contexto institucional del proyecto de infraestructura 7
1.6.1. Antecedentes 7
1.6.2. Funciones del área requirente y técnica 8
1.7. Participación de COESICSA 8
1.7.1. Partidas consideradas en el proyecto 9
1.8. Descripción de los servicios técnicos 9
1.8.1. Estudios preliminares 9
1.8.2. Levantamiento topográfico y fotogramétrico 10
1.8.3. Otras disciplinas relacionadas con el proyecto 10
1.9. Ingeniería Geomática aplicada al desarrollo de infraestructura civil 11
1.9.1. Reconocimiento y diagnóstico de la infraestructura existente . 11
1.9.2. Control geodésico y levantamiento topográfico 11
1.9.3. Fotogrametría digital y levantamiento LiDAR 11

2. Control geodésico y posicionamiento GNSS 13

2.1. Fundamentos del posicionamiento GNSS 14
2.2. Sistemas de coordenadas y marcos de referencia 14
2.3. Establecimiento de la red de control terrestre 16

2.4. Levantamiento de puntos georreferenciados 18
2.4.1. Levantamiento en Janitzio 18
2.4.2. Levantamiento en Tecuena 19
2.4.3. Levantamiento en Yunuén 21
2.4.4. Levantamiento en La Pacanda 22
2.5. Apoyo terrestre para fotogrametría 23
2.5.1. Janitzio 23
2.5.2. Yunuén 24
2.6. Apoyo geodésico al levantamiento batimétrico 25
2.6.1. Janitzio 25
2.6.2. Tecuena 27
2.6.3. Yunuén 28
2.6.4. La Pacanda 29

3. LiDAR, fotogrametría y batimetría aplicadas 31
3.1. Planeación y ejecución de los vuelos 31
3.2. Sistema de adquisición aerotransportada 33
3.2.1. Sensor DJI Zenmuse L2 33
3.2.2. Vehículo aéreo DJI Matrice 350 RTK 35
3.3. Procesamiento de la información LiDAR y fotogramétrica 36
3.4. Condiciones del entorno relevantes para el levantamiento 38
3.5. Relieve subacuático y levantamiento batimétrico 39
3.5.1. Metodología del levantamiento batimétrico 40
3.5.2. Integración entre topografía y batimetría 41
3.6. Azolvamiento y su relación con el proyecto 42

4. Modelos digitales y productos cartográficos 44
4.1. Tratamiento de la componente altimétrica 44
4.1.1. Alturas elipsoidales y ortométricas 44
4.2. Control geodésico utilizado durante el procesamiento 46
4.3. Integración de los datos adquiridos 47
4.4. Procesamiento digital de la información 48
4.4.1. Procesamiento GNSS y trayectoria del sensor 48
4.4.2. Generación y clasificación de la nube de puntos 49
4.5. Generación de modelos digitales 50
4.5.1. Modelo Digital de Superficie 50
4.5.2. Modelo Digital del Terreno 50
4.5.3. Modelo de sombreado del relieve 50
4.5.4. Generación del ortomosaico 52

4.6. Generación de superficies TIN y planos altimétricos 53
4.6.1. Construcción y edición de la red irregular de triángulos 53
4.6.2. Generación de curvas de nivel 54
4.7. Control de calidad y validación de los productos 55

5. Conclusiones y continuidad del proyecto 58
5.1. Conclusiones 58
5.2. Competencias profesionales aplicadas 60
5.3. Continuidad del proyecto 61

Índice de figuras

1.1. Vista general de la isla de Janitzio, uno de los sitios de intervención del proyecto en el Lago de Pátzcuaro. 7

2.1. Instalación de la estación base GNSS utilizada para el establecimiento del control geodésico y el levantamiento de puntos de apoyo. 17
2.2. Ejemplo de monografía y croquis de localización de puntos GNSS incluidos en un plano topográfico. 18
2.3. Levantamiento de un punto de apoyo fotogramétrico en Janitzio mediante un receptor GNSS. 19
2.4. Levantamiento GNSS de un punto de apoyo sobre la infraestructura del muelle de Tecuena. 20
2.5. Punto de apoyo fotogramétrico georreferenciado mediante GNSS en la isla de Yunuén. 22
2.6. Levantamiento GNSS de un punto de apoyo en la isla de La Pacanda. 23
2.7. Diana de alto contraste utilizada como punto de control terrestre durante el levantamiento fotogramétrico mediante UAV..... 24
2.8. Diana de control terrestre colocada en Yunuén para su identificación durante el procesamiento de las imágenes del vuelo fotogramétrico. 25
2.9. Levantamiento GNSS de puntos de apoyo en la zona de transición entre la infraestructura del muelle y el cuerpo de agua en Janitzio. 27
2.10. Trabajos de apoyo geodésico al levantamiento batimétrico en la zona lacustre adyacente al muelle de Tecuena. 28
2.11. Captura de posiciones GNSS desde una embarcación en la zona de muelles de Yunuén. 29
2.12. Adquisición de información de posicionamiento durante los trabajos de apoyo al levantamiento batimétrico en La Pacanda. 30

3.1. Sensor DJI Zenmuse L2 utilizado para la adquisición de información LiDAR e imágenes RGB durante los vuelos. 35
3.2. Vehículo aéreo DJI Matrice 350 RTK utilizado como plataforma para transportar el sensor Zenmuse L2. 36
3.3. Vista del procesamiento y control de calidad de la nube de puntos generada a partir del levantamiento LiDAR. 38
3.4. Perfiles batimétricos utilizados para representar la relación geométrica entre la infraestructura del muelle, la superficie del agua y el fondo lacustre. 40
3.5. Adquisición de observaciones de profundidad y posición durante el levantamiento batimétrico en la zona próxima al muelle. 41
3.6. Integración de información planimétrica y batimétrica correspondiente a la zona de uno de los muelles de Janitzio. 43

4.1. Configuración del equipo GNSS durante las actividades de levantamiento altimétrico. 45
4.2. Interfaz utilizada durante el procesamiento de observaciones GNSS para la determinación de coordenadas de control. 47
4.3. Preparación del DJI Matrice 350 RTK utilizado durante la adquisición de información geoespacial. 48
4.4. Modelo de sombreado del relieve del área del panteón de Janitzio derivado del modelo digital de elevación. 51
4.5. Representación del modelo digital de elevación mediante una rampa de valores altimétricos. 52
4.6. Ortomosaico del muelle y su entorno inmediato en la isla de Yunuén. 53
4.7. Integración de elementos planimétricos y altimétricos en el área del muelle de Yunuén. 55
4.8. Producto cartográfico correspondiente al área del panteón de Janitzio. 55
4.9. Planimetría del área de intervención en Janitzio con la infraestructura y los elementos levantados organizados en el plano final. 57

Capítulo 1

Contexto y alcance profesional

En este capítulo se presenta el contexto general en el que se desarrolló la experiencia profesional objeto de este reporte. Se describen las características territoriales y logísticas de la zona de estudio, los objetivos y alcances de los trabajos realizados por la empresa COESICSA, así como la participación de la Ingeniería Geomática en la generación de información espacial para proyectos de infraestructura civil. Asimismo, se presenta el contexto institucional del proyecto, las principales actividades de levantamiento topográfico, geodésico, fotogramétrico y batimétrico, y los productos geoespaciales generados como insumos para las etapas posteriores de diseño y rehabilitación de infraestructura.

1.1. Contexto general del proyecto

El presente documento corresponde al reporte de las actividades profesionales desarrolladas durante la participación en los trabajos de levantamiento topográfico, fotogramétrico y batimétrico realizados en las zonas de los muelles de las islas Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda, pertenecientes al municipio de Pátzcuaro, Michoacán. Los trabajos comprendieron las superficies correspondientes a los muelles, andadores peatonales, plataformas de atraque y franjas lacustres adyacentes consideradas dentro del levantamiento batimétrico.

Las islas de Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda forman parte del sistema lacustre del Lago de Pátzcuaro y se encuentran a una altitud aproximada de 2 035 m sobre el nivel medio del mar. Se trata de un entorno caracterizado por la presencia permanente de humedad, vegetación ribereña, topografía irregular y condiciones de accesibilidad particulares derivadas de su carácter insular. Estas condiciones representan factores relevantes para la planeación logística, el transporte de personal y

equipo y la ejecución de levantamientos geoespaciales.

Los muelles constituyen elementos fundamentales para la conectividad entre las islas y el territorio continental, debido a que concentran las actividades de embarque y desembarque de habitantes, visitantes y mercancías. En consecuencia, disponer de información topográfica y geoespacial actualizada resulta indispensable para sustentar los estudios y proyectos orientados a la rehabilitación de la infraestructura existente.

Debido a las condiciones logísticas del entorno y a la necesidad de obtener información espacial con una alta densidad de puntos, los métodos topográficos convencionales se complementaron con levantamientos realizados mediante vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV). La utilización de plataformas UAV permite adquirir información de superficies extensas o de difícil acceso con una elevada resolución espacial, siempre que la planificación del vuelo, el control terrestre y el procesamiento fotogramétrico sean realizados adecuadamente (Colomina and Molina, 2014; Wolf et al., 2014).

En el proyecto se utilizaron sensores aerotransportados, incluyendo tecnología LiDAR y adquisición de imágenes, complementados con posicionamiento GNSS mediante receptores Emlid Reach RS2+ y puntos de control terrestre distribuidos en las zonas de trabajo. El control geodésico permitió vincular los levantamientos al marco de referencia empleado en el proyecto. Conforme a la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional, el marco oficial establecido por el INEGI corresponde al ITRF2008, época 2010.0, asociado al elipsoide GRS80 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

El objetivo técnico de los levantamientos consistió en generar información geoespacial tridimensional que permitiera obtener productos cartográficos adecuados para las etapas posteriores del proyecto de infraestructura. Entre los principales productos se encuentran las nubes de puntos georreferenciadas y clasificadas, ortomosaicos, Modelos Digitales de Superficie (MDS), Modelos Digitales del Terreno (MDT), curvas de nivel y modelos derivados de los levantamientos batimétricos.

La integración de estos productos proporciona una representación espacial de las condiciones existentes en las zonas de intervención y constituye un insumo para las actividades posteriores de análisis, diseño y planeación de las obras de rehabilitación.

1.2. Participación de la Ingeniería Geomática

La participación del profesional de la Ingeniería Geomática en un proyecto de infraestructura civil tiene como finalidad proporcionar información confiable sobre la

posición, geometría y características espaciales del terreno y de los elementos existentes sobre éste. Para ello se integran distintas técnicas de adquisición y procesamiento de información geoespacial, entre ellas la geodesia satelital, la topografía, la fotogrametría, el levantamiento LiDAR y la representación cartográfica.

En este proyecto, el establecimiento del control geodésico permitió disponer de una referencia espacial común para los distintos levantamientos. El posicionamiento mediante GNSS proporciona las coordenadas tridimensionales de los puntos observados y, mediante procedimientos diferenciales como RTK y postprocesamiento, permite reducir diversos errores comunes presentes en las observaciones satelitales (Leick et al., 2015). La calidad de los resultados depende, entre otros factores, de la geometría de los satélites, la presencia de obstáculos, el multitrayecto, las condiciones atmosféricas y las características del equipo empleado.

La componente altimétrica requiere distinguir entre altura elipsoidal y altura ortométrica. Las observaciones GNSS proporcionan directamente alturas referidas al elipsoide, mientras que los proyectos de ingeniería generalmente requieren alturas físicas referidas a una superficie equipotencial relacionada con el geoide. La relación simplificada entre ambas puede expresarse como

$$H = h - N, \tag{1.1}$$

donde H representa la altura ortométrica, h la altura elipsoidal y N la ondulación del geoide. La correcta aplicación del modelo geoidal correspondiente permite mantener consistencia entre las elevaciones derivadas del posicionamiento GNSS y las cotas utilizadas posteriormente en los productos topográficos.

Por otra parte, la adquisición aerotransportada permitió generar información tridimensional de alta densidad. La fotogrametría digital obtiene información geométrica a partir de imágenes con traslape y de la determinación de su orientación exterior, mientras que el sensor LiDAR determina distancias mediante pulsos láser y permite obtener directamente una nube tridimensional de puntos. Aunque ambas tecnologías pueden emplearse de manera complementaria, sus principios de medición y procedimientos de procesamiento son diferentes (Wolf et al., 2014; Shan and Toth, 2018).

A partir de las nubes de puntos fue posible diferenciar distintas clases de elementos, como terreno, vegetación e infraestructura. La clasificación de los puntos correspondientes al terreno constituye una etapa fundamental para la generación del MDT, mientras que el MDS conserva tanto la superficie del terreno como los objetos localizados sobre ella.

La información topográfica emergida se complementó con el levantamiento bati-

métrico realizado en las zonas de atraque. De esta manera fue posible representar de forma continua la zona terrestre y parte del relieve subacuático asociado con los muelles. La adquisición y evaluación de información batimétrica requiere considerar el posicionamiento, la determinación de profundidades y el sistema de referencia vertical utilizado (International Hydrographic Organization, 2022).

Finalmente, la labor geomática comprende no solamente la adquisición de información, sino también su organización, evaluación y representación mediante productos estandarizados. En este proyecto se generaron nubes de puntos, modelos digitales, ortomosaicos, mallas de triángulos irregulares (*Triangulated Irregular Network*, TIN), curvas de nivel y cartografía vectorial para su utilización en plataformas CAD y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Describir y documentar las actividades profesionales desarrolladas en la empresa COESICSA durante la ejecución de levantamientos geodésicos, topográficos, fotogramétricos y batimétricos asociados con el proyecto de rehabilitación de infraestructura en los muelles de las islas Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda, Michoacán, destacando la aplicación de conocimientos y metodologías propias de la Ingeniería Geomática.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo profesional fueron los siguientes:

- Participar en los levantamientos topográficos, fotogramétricos y batimétricos de las zonas correspondientes a los muelles de las islas Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda.
- Obtener información planimétrica y altimétrica de las áreas de intervención, incluyendo el terreno, la infraestructura existente y las zonas lacustres adyacentes.
- Establecer y utilizar control geodésico mediante observaciones GNSS y posicionamiento RTK para proporcionar una referencia espacial común a los diferentes levantamientos.

- Participar en la adquisición de información mediante plataforma UAV equipada con los sensores utilizados en el proyecto, asegurando la cobertura de las áreas de interés.
- Procesar e integrar la información proveniente de los sistemas GNSS/IMU, imágenes y sensores LiDAR utilizados durante la adquisición de datos.
- Clasificar y depurar las nubes de puntos para diferenciar el terreno, la vegetación, las edificaciones y los distintos elementos de infraestructura.
- Generar productos cartográficos derivados, entre ellos nubes de puntos georreferenciadas, MDT, MDS, ortomosaicos, curvas de nivel, modelos batimétricos y archivos vectoriales compatibles con plataformas CAD y SIG.
- Evaluar la consistencia geométrica de los productos obtenidos mediante puntos de control y verificación independientes, así como mediante indicadores de calidad posicional.

1.4. Alcances del trabajo profesional

El trabajo desarrollado comprendió las etapas de establecimiento y utilización del control geodésico, adquisición de información en campo, procesamiento de datos y generación de productos geoespaciales para las zonas de intervención.

El control geodésico incluyó la utilización de observaciones GNSS vinculadas a estaciones de referencia de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI. Asimismo, se emplearon puntos de control terrestre y puntos de verificación para proporcionar referencia espacial y evaluar los productos generados.

Los trabajos de adquisición comprendieron el levantamiento terrestre mediante GNSS, la ejecución de vuelos mediante UAV para la obtención de imágenes e información LiDAR y el levantamiento batimétrico en las zonas próximas a los muelles. En la etapa de gabinete se realizaron procesos de georreferenciación, integración de información GNSS/IMU, procesamiento fotogramétrico, clasificación de nubes de puntos y generación de productos derivados.

La información altimétrica fue tratada de manera consistente con el sistema vertical definido para el proyecto, considerando la relación entre alturas elipsoidales y ortométricas mediante el modelo geoidal correspondiente.

Posteriormente se generaron MDT, MDS, ortomosaicos, mallas TIN, curvas de nivel y archivos vectoriales organizados en capas temáticas para su utilización en

plataformas CAD y SIG.

El control de calidad se realizó mediante la comparación de los productos obtenidos con puntos independientes de verificación y mediante indicadores estadísticos de error. Para información geoespacial, el Error Cuadrático Medio (*Root Mean Square Error*, RMSE) constituye una medida ampliamente utilizada para caracterizar la exactitud posicional (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2024). De forma general, para una componente coordenada x puede expresarse como

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_i^{\mathrm{ref}}\right)^2}, \tag{1.2}$$

donde x_i corresponde al valor obtenido, x_i^{ref} al valor de referencia y n al número de puntos evaluados. De manera equivalente pueden determinarse $RMSE_y$ y $RMSE_z$ para las demás componentes.

La evaluación y documentación de la calidad de la información geográfica constituye una parte fundamental del proceso de producción cartográfica, debido a que permite establecer si los datos generados son adecuados para el propósito previsto (International Organization for Standardization, 2023).

El alcance profesional de las actividades geomáticas concluyó con la generación, integración y evaluación de los productos geoespaciales requeridos. El diseño estructural de los muelles, los cálculos de mecánica de suelos, el dimensionamiento de cimentaciones y la ejecución de las obras civiles corresponden a otras especialidades y, por lo tanto, quedan fuera del alcance del trabajo profesional descrito en este reporte.

1.5. Contexto territorial e histórico de Pátzcuaro

La cuenca del Lago de Pátzcuaro posee una relevancia histórica y cultural estrechamente relacionada con el desarrollo del pueblo purépecha. Diversas fuentes históricas documentan la importancia de Pátzcuaro, Ihuatzio y Tzintzuntzan dentro de la organización territorial del antiguo señorío tarasco, así como el papel desempeñado por Tariácuri en su proceso de consolidación (Acuña, 1987; García Quintana, 2003).

La relación entre las comunidades y el medio lacustre ha tenido históricamente una importancia económica, social y cultural. Esta condición continúa observándose en las comunidades insulares actuales, donde el transporte mediante embarcaciones constituye un elemento esencial para la movilidad cotidiana y para las actividades turísticas.

Dentro de este contexto, los muelles representan infraestructura estratégica para mantener la conexión de las comunidades insulares con el territorio continental. Por ello, las intervenciones orientadas a su rehabilitación requieren información actualizada acerca de la geometría del terreno, la infraestructura existente y las características de las zonas lacustres próximas.

La Figura 1.1 muestra una vista general de la isla de Janitzio y permite identificar las características del entorno insular en el cual se desarrollaron parte de los trabajos descritos en este reporte.



Figura 1.1: Vista general de la isla de Janitzio, uno de los sitios de intervención del proyecto en el Lago de Pátzcuaro.

1.6. Contexto institucional del proyecto de infraestructura

1.6.1. Antecedentes

El Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR) participa en la planeación y ejecución de proyectos orientados al fortalecimiento de la infraestructura turística. Durante 2026 se anunciaron inversiones destinadas al desarrollo de infraestructura turística en Michoacán, incluyendo acciones para la rehabilitación de muelles en las islas del Lago de Pátzcuaro, dentro del Plan de Justicia para el Pueblo Purépecha y del Plan para la Seguridad y la Justicia en Michoacán (Fondo Nacional de Fomento al Turismo, 2026).

Dentro de este marco se requirieron servicios técnicos especializados para la realización de estudios preliminares, la definición de criterios de ingeniería y la preparación

de proyectos ejecutivos. Estos estudios permiten caracterizar las condiciones existentes antes de realizar las intervenciones de infraestructura y proporcionan información para las diferentes disciplinas involucradas.

De acuerdo con la organización establecida en la documentación del proyecto, la Dirección de Desarrollo promovió las acciones correspondientes, mientras que la Gerencia de Infraestructura, adscrita a la Subdirección de Promoción de Desarrollo, participó como área técnica encargada de establecer los alcances de contratación.

1.6.2. Funciones del área requirente y técnica

Entre las funciones asociadas con la planeación y desarrollo de los proyectos se encuentran:

- establecer programas de desarrollo turístico y coordinar su integración con las áreas participantes;
- definir las líneas de acción y los alcances técnicos correspondientes;
- coordinar la elaboración de proyectos ejecutivos relacionados con infraestructura, edificación, diseño urbano y paisaje.

1.7. Participación de COESICSA

El servicio proporcionado por COESICSA tuvo como propósito participar en la generación de estudios preliminares e insumos técnicos requeridos para diferentes proyectos de infraestructura y desarrollo turístico en municipios del estado de Michoacán, entre ellos Nuevo San Juan Parangaricutiro, Uruapan y las islas del Lago de Pátzcuaro.

Entre los objetivos de los servicios desarrollados por la empresa se encontraron:

- realizar visitas y levantamientos para identificar las condiciones de la infraestructura existente;
- generar información técnica para sustentar los proyectos ejecutivos;
- elaborar planos, memorias y productos técnicos conforme a los requerimientos establecidos;
- proporcionar información geoespacial para las diferentes disciplinas de ingeniería participantes;

- integrar documentación y productos derivados de los levantamientos realizados.

1.7.1. Partidas consideradas en el proyecto

La documentación contractual contempló ocho partidas relacionadas con diferentes intervenciones de infraestructura turística:

1. Infraestructura turística en las ruinas de San Juan Parangaricutiro.
2. Estabilización de talud, mejora de muro y diseño de andador peatonal en el panteón de la isla de Janitzio.
3. Rehabilitación de muelles en las islas de Janitzio y Tecuena.
4. Rehabilitación de muelles en las islas de Yunuén y La Pacanda.
5. Rehabilitación de tirolesa en las islas de Janitzio y Tecuena.
6. Señalización regional en Angahuan, Zacán, Nuevo San Juan, Caltzontzin y Uruapan.
7. Proyecto adicional cuyos alcances serían definidos por la administración del contrato.
8. Proyecto adicional cuyos alcances serían definidos por la administración del contrato.

Las actividades descritas en este reporte se concentran principalmente en las partidas relacionadas con la rehabilitación de los muelles de Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda.

1.8. Descripción de los servicios técnicos

1.8.1. Estudios preliminares

Los estudios preliminares tuvieron como finalidad reconocer las condiciones existentes en las zonas de intervención. Para ello se realizaron visitas de campo destinadas a identificar y documentar infraestructura, accesos, vialidades y otros elementos relevantes para el desarrollo de los proyectos.

La información generada durante esta etapa fue utilizada para elaborar documentación técnica, observaciones, recomendaciones y registros fotográficos correspondientes a los sitios de intervención.

1.8.2. Levantamiento topográfico y fotogramétrico

El levantamiento topográfico comprendió la utilización de tecnología GNSS y, cuando las características del sitio lo requirieron, métodos topográficos terrestres complementarios. Los levantamientos fueron referidos al marco geodésico establecido para el proyecto y representados mediante la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM).

La planimetría y altimetría incluyeron la ubicación de elementos relevantes del terreno y de la infraestructura, tales como construcciones, andadores, alumbrado, vegetación y otros objetos de interés. A partir de esta información se generaron modelos digitales, perfiles y curvas de nivel.

El levantamiento fotogramétrico mediante UAV permitió adquirir imágenes con el traslape necesario para su posterior procesamiento. Mediante las etapas de orientación de imágenes, ajuste con puntos de control, reconstrucción tridimensional y ortorrectificación fue posible generar nubes de puntos, modelos digitales y ortomosaicos (Colomina and Molina, 2014; Wolf et al., 2014).

De manera complementaria, la información LiDAR proporcionó observaciones tridimensionales directas de alta densidad. Después de su georreferenciación y clasificación, estas observaciones pudieron emplearse para representar tanto los objetos existentes sobre la superficie como el terreno subyacente (Shan and Toth, 2018).

Los principales entregables asociados con estas actividades incluyeron archivos de datos, nubes de puntos clasificadas, MDT, MDS, ortomosaicos, planos en formato CAD y documentación técnica del levantamiento.

1.8.3. Otras disciplinas relacionadas con el proyecto

El proyecto general incluyó además estudios correspondientes a otras especialidades de la ingeniería, entre ellas geotecnia y mecánica de suelos. Estas actividades contemplaron exploración de campo y ensayos destinados a determinar propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

Aunque estos trabajos no forman parte directa de las actividades geomáticas descritas en el presente reporte, los productos topográficos y geoespaciales generados constituyeron información de referencia para la integración espacial de los diferentes estudios del proyecto.

1.9. Ingeniería Geomática aplicada al desarrollo de infraestructura civil

La Ingeniería Geomática participa de manera transversal en diferentes etapas de los proyectos de infraestructura civil, particularmente en aquellas relacionadas con la caracterización del terreno, el establecimiento de sistemas de referencia, la generación de cartografía y la representación tridimensional de las condiciones existentes. En el proyecto descrito, estas actividades pueden agruparse en tres componentes principales.

1.9.1. Reconocimiento y diagnóstico de la infraestructura existente

Antes de realizar una intervención física es necesario identificar las características generales del sitio y documentar los elementos existentes. Durante esta etapa se reconocieron accesos, andadores, construcciones, infraestructura y otros elementos relevantes.

La información recopilada permitió establecer las condiciones iniciales de los sitios y definir los requerimientos de los levantamientos posteriores.

1.9.2. Control geodésico y levantamiento topográfico

El control geodésico proporciona el marco espacial necesario para integrar las observaciones provenientes de diferentes sensores y jornadas de trabajo. Para ello se utilizaron receptores GNSS y procedimientos de posicionamiento diferencial.

El posicionamiento RTK permitió obtener coordenadas en tiempo real para distintos puntos levantados, mientras que el procesamiento de observaciones GNSS permitió vincular el proyecto con el marco geodésico empleado. La calidad de estas observaciones fue evaluada antes de utilizarlas como control para los productos derivados.

A partir de los levantamientos se determinó la posición de elementos como límites, construcciones, andadores, infraestructura de servicios y vegetación relevante, además de los puntos utilizados para representar la configuración altimétrica del terreno.

1.9.3. Fotogrametría digital y levantamiento LiDAR

Para complementar los levantamientos terrestres se emplearon tecnologías de adquisición aerotransportada mediante UAV. Estas herramientas son particularmente

útiles en zonas de difícil acceso o donde se requiere una representación tridimensional de alta densidad.

El procesamiento de las imágenes permitió generar ortomosaicos y reconstrucciones tridimensionales, mientras que el procesamiento de la información LiDAR permitió disponer de nubes de puntos densas que posteriormente fueron clasificadas.

A partir de estos datos se obtuvieron dos productos principales: el Modelo Digital de Superficie (MDS), que representa la superficie incluyendo objetos como construcciones y vegetación, y el Modelo Digital del Terreno (MDT), que busca representar exclusivamente la superficie del terreno después de aplicar procedimientos de clasificación y filtrado.

Los productos generados fueron integrados con la información topográfica y batimétrica para proporcionar una representación espacial coherente de las áreas de intervención.

En síntesis, en este capítulo se describió el contexto territorial, histórico e institucional en el que se desarrollaron las actividades profesionales, así como los objetivos y alcances del trabajo realizado en COESICSA. Se explicó además la participación de la Ingeniería Geomática en la adquisición, procesamiento, integración y evaluación de información geoespacial destinada a proyectos de infraestructura civil, destacando el uso de GNSS, levantamientos topográficos, fotogrametría mediante UAV, tecnología LiDAR y batimetría. Este marco permite comprender la función de los trabajos realizados y la relación entre los productos geomáticos y las etapas posteriores del proyecto. En el siguiente capítulo se describe con mayor detalle el control geodésico y los procedimientos de posicionamiento GNSS utilizados para referenciar los diferentes levantamientos.

Capítulo 2

Control geodésico y posicionamiento GNSS

El capítulo anterior presentó el contexto general del proyecto, los alcances de la experiencia profesional y la participación de la Ingeniería Geomática en la generación de información para proyectos de infraestructura civil. A partir de este marco, en el presente capítulo se describen los procedimientos utilizados para establecer el control geodésico y realizar el posicionamiento mediante Sistemas Globales de Navegación por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS) en las islas de Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda. Se presentan el sistema de referencia adoptado, el establecimiento de estaciones base y puntos de control, las condiciones particulares encontradas durante los levantamientos y el apoyo geodésico proporcionado a los trabajos fotogramétricos y batimétricos.

El establecimiento de un sistema de referencia común constituye una etapa fundamental para integrar información obtenida mediante diferentes técnicas y sensores. En este proyecto, el control geodésico permitió relacionar espacialmente los levantamientos topográficos, fotogramétricos y batimétricos y proporcionar coordenadas consistentes para los productos generados.

De acuerdo con los requerimientos establecidos en el Anexo Técnico del proyecto, la información debía cumplir determinadas especificaciones de referencia espacial y exactitud posicional. Por esta razón, las actividades de campo incluyeron observaciones GNSS estáticas y levantamientos en tiempo real mediante la técnica RTK (*Real-Time Kinematic*), además del establecimiento de puntos de control terrestre destinados principalmente al procesamiento fotogramétrico.

2.1. Fundamentos del posicionamiento GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite permiten determinar la posición tridimensional de un receptor a partir de observaciones realizadas sobre las señales transmitidas por diferentes constelaciones de satélites. Entre los principales sistemas actualmente disponibles se encuentran GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou (Teunissen and Montenbruck, 2017).

En el caso particular del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), su arquitectura se divide tradicionalmente en tres segmentos (Teunissen and Montenbruck, 2017):

1. **Segmento espacial:** integrado por los satélites que transmiten las señales de navegación y la información orbital necesaria para el posicionamiento.
2. **Segmento de control:** constituido por la infraestructura terrestre encargada de monitorear la constelación, estimar y actualizar parámetros orbitales y de reloj y mantener la operación del sistema.
3. **Segmento de usuario:** formado por los receptores y equipos que procesan las señales transmitidas por los satélites para determinar posición, velocidad y tiempo.

Es importante distinguir el segmento de control del sistema GPS de las estaciones geodésicas utilizadas como referencia durante un levantamiento. En México, la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) está constituida por estaciones GNSS de operación continua que materializan el marco geodésico horizontal del país y proporcionan observaciones para realizar levantamientos geodésicos diferenciales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010, 2024).

Para los trabajos descritos en este reporte se utilizaron receptores GNSS Emlid Reach RS2+, capaces de rastrear señales de las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou y de operar tanto en levantamientos estáticos como en posicionamiento RTK (Emlid, 2026).

2.2. Sistemas de coordenadas y marcos de referencia

La utilización de un sistema de referencia homogéneo permite integrar información obtenida en diferentes jornadas, mediante distintos sensores y en diferentes sitios de

trabajo. Para este proyecto se establecieron criterios comunes para la representación planimétrica y altimétrica de la información.

Las coordenadas planas de los productos cartográficos se representaron mediante la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), en la zona correspondiente al área de estudio. La información geodésica fue referida al marco ITRF2008, época 2010.0, asociado al elipsoide GRS80, de acuerdo con la materialización establecida por el INEGI para el Sistema Geodésico Nacional (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010, 2024).

De acuerdo con los requerimientos técnicos establecidos para el proyecto, los puntos utilizados como control debían satisfacer una exactitud posicional igual o mejor que ± 0.10 m. Este valor corresponde a una especificación contractual del proyecto y no debe interpretarse como la exactitud nominal del receptor GNSS.

Para la componente altimétrica fue necesario distinguir entre las alturas obtenidas directamente mediante GNSS y las elevaciones requeridas para los productos topográficos. Los receptores GNSS proporcionan alturas elipsoidales h, mientras que para aplicaciones de ingeniería generalmente se utilizan alturas ortométricas H. Ambas se relacionan mediante la ondulación del geoide N según la expresión aproximada

$$H = h - N. \tag{2.1}$$

La Red Geodésica Nacional del INEGI distingue una componente horizontal, dentro de la cual se encuentra la RGNA, y una Red Geodésica Vertical constituida por estaciones y bancos de nivel que proporcionan referencias oficiales de altura (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023). Esta distinción resulta importante para evitar considerar que una estación GNSS de la RGNA sustituye directamente a un banco de nivel de la red vertical.

La correcta definición del sistema de referencia fue considerada durante la generación y revisión de los diferentes productos del proyecto, incluyendo:

- archivos de observaciones GNSS y datos crudos de los receptores;
- memorias de cálculo y reportes de procesamiento;
- coordenadas de estaciones base y puntos de apoyo;
- puntos de control terrestre utilizados en fotogrametría;
- modelos digitales y ortomosaicos georreferenciados;
- cartografía vectorial y planos generados en plataformas CAD y SIG.

2.3. Establecimiento de la red de control terrestre

El control geodésico proporciona la referencia espacial necesaria para relacionar los diferentes levantamientos realizados dentro de un proyecto de infraestructura. En este caso, permitió integrar las observaciones GNSS con los levantamientos fotogramétricos y con la información generada durante los trabajos de apoyo a la batimetría.

La metodología general consistió en establecer puntos de referencia en cada una de las islas mediante receptores GNSS de calidad geodésica. Para ello se utilizó principalmente el receptor multibanda *Emlid Reach RS2+*, operado mediante sesiones estáticas para la determinación de coordenadas de referencia y mediante posicionamiento RTK para el levantamiento de puntos de detalle y puntos de apoyo.

El posicionamiento relativo mediante GNSS permite aprovechar observaciones simultáneas entre una estación de coordenadas conocidas y una estación cuya posición se desea determinar. Mediante el procesamiento diferencial se reducen o cancelan diversos errores comunes presentes en las observaciones, permitiendo alcanzar exactitudes superiores a las obtenidas mediante posicionamiento autónomo (Leick et al., 2015; Teunissen and Montenbruck, 2017).

En los levantamientos RTK, una estación base localizada sobre un punto de coordenadas conocidas proporciona las observaciones o correcciones necesarias para que el receptor móvil, denominado *rover*, determine su posición en tiempo real mediante observaciones de fase de la portadora (Leick et al., 2015).

El receptor Emlid Reach RS2+ utilizado durante los trabajos admite tanto observaciones estáticas como RTK y registra información GNSS en formato RINEX para su procesamiento posterior (Emlid, 2026).

Los puntos establecidos cumplieron diferentes funciones dentro del proyecto:

1. proporcionar una referencia común para los levantamientos topográficos realizados en cada isla;
2. proporcionar puntos de control terrestre para el ajuste y georreferenciación de los levantamientos fotogramétricos;
3. establecer referencias espaciales para integrar la información terrestre con los levantamientos batimétricos;
4. proporcionar puntos identificables y documentados que permitieran reproducir o verificar parte del levantamiento durante etapas posteriores del proyecto.

La Figura 2.1 muestra la instalación de una estación base GNSS en un sitio próximo al área de muelles. Para la selección del punto se procuró disponer de estabilidad física y de la mayor visibilidad posible hacia el cielo, reduciendo la presencia de obstáculos cercanos que pudieran afectar la recepción de las señales.



Figura 2.1: Instalación de la estación base GNSS utilizada para el establecimiento del control geodésico y el levantamiento de puntos de apoyo.

El respaldo documental del control geodésico incluyó los archivos originales registrados por los receptores, los periodos de observación, los reportes de procesamiento y las coordenadas obtenidas. Esta información permite conservar la trazabilidad entre las observaciones realizadas en campo y los valores utilizados posteriormente para los levantamientos.

Cuando se establecieron vértices materializados, se elaboraron además monografías que permitieran identificar su localización. Estas fichas incluyeron información como descripción del punto, croquis de ubicación, coordenadas, elevación y registro fotográfico.

La Figura 2.2 presenta un ejemplo de la documentación utilizada para localizar los puntos de control dentro de los planos del proyecto.

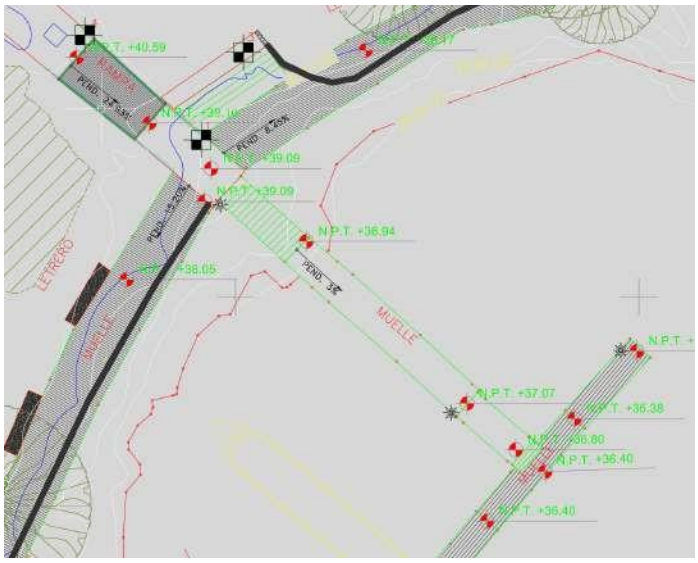


Figura 2.2: Ejemplo de monografía y croquis de localización de puntos GNSS incluidos en un plano topográfico.

2.4. Levantamiento de puntos georreferenciados

Las condiciones físicas, ambientales y logísticas variaron considerablemente entre las cuatro islas. Por esta razón, aunque se mantuvo una metodología general de adquisición, fue necesario adaptar el establecimiento de las estaciones GNSS y la distribución de puntos a las características particulares de cada sitio.

2.4.1. Levantamiento en Janitzio

Las actividades en Janitzio iniciaron aproximadamente a las 05:00 horas con el traslado marítimo del personal y el equipo hacia la isla. Durante la primera jornada se priorizó el establecimiento de un punto de referencia GNSS próximo al área principal de muelles.

Para la instalación se seleccionó un sitio que proporcionara estabilidad al equipo y una visibilidad favorable hacia el cielo. Sobre este punto se instaló el receptor *Emlid Reach RS2+* y se realizó una sesión de observación estática destinada a obtener los datos necesarios para determinar posteriormente sus coordenadas y vincularlas con el marco geodésico utilizado en el proyecto.

Las condiciones meteorológicas de la jornada afectaron principalmente la logística y el ritmo de las actividades de campo. Debido al tiempo requerido para completar la sesión GNSS y disponer de un conjunto suficiente de observaciones, una parte

importante de la jornada se destinó al establecimiento del punto de referencia.

Una vez concluida la observación necesaria para la estación, se inició la distribución y levantamiento de los puntos destinados al apoyo terrestre de los vuelos fotogramétricos. Para estas observaciones se empleó el receptor móvil sobre bastón, utilizando posicionamiento relativo respecto de la estación base.

La Figura 2.3 muestra la ocupación de uno de los puntos de apoyo utilizados posteriormente durante el procesamiento fotogramétrico.



Figura 2.3: Levantamiento de un punto de apoyo fotogramétrico en Janitzio mediante un receptor GNSS.

2.4.2. Levantamiento en Tecuena

Después de los trabajos desarrollados en Janitzio, el personal y el equipo fueron trasladados hacia la isla de Tecuena mediante una embarcación local. Debido a la extensión reducida de la isla, las áreas de interés se encontraban relativamente próximas entre sí; sin embargo, el estado físico de la infraestructura presentó restricciones para

el establecimiento del equipo.

El muelle mostraba un deterioro considerable y existían pocas superficies suficientemente estables y despejadas para instalar un trípode convencional. Por esta razón fue necesario adaptar el procedimiento de instalación de la estación GNSS a las condiciones encontradas en campo.

Se identificó un elemento de la infraestructura que permitía mantener el receptor próximo a la zona de interés. Sobre éste se instaló el equipo utilizando un bastón de aplomar y un sistema de soporte auxiliar. Antes de comenzar la observación se verificó que la configuración proporcionara una posición suficientemente estable durante la sesión.

La adaptación del montaje constituye un ejemplo de las decisiones que deben tomarse durante un trabajo profesional cuando las condiciones reales del sitio no permiten reproducir exactamente una configuración ideal de levantamiento. En estos casos, debe privilegiarse la estabilidad del receptor, el correcto centrado cuando corresponda y la documentación detallada de las condiciones de observación.

Una vez establecida la referencia utilizada para el levantamiento, se procedió a capturar puntos mediante el receptor móvil. Las observaciones incluyeron elementos de la infraestructura existente y puntos destinados al apoyo de los levantamientos posteriores.

La Figura 2.4 muestra una de las mediciones realizadas sobre la infraestructura del muelle.



Figura 2.4: Levantamiento GNSS de un punto de apoyo sobre la infraestructura del muelle de Tecuena.

El levantamiento incluyó también puntos correspondientes a apoyos, pilares y

elementos representativos de la geometría del muelle. Esta información permitió relacionar espacialmente la infraestructura terrestre con los trabajos realizados posteriormente en el entorno lacustre.

2.4.3. Levantamiento en Yunuén

Para el traslado hacia Yunuén se modificó la ruta utilizada durante las jornadas anteriores. Debido a la distancia existente entre las islas y a la necesidad de transportar equipo de medición, se optó por regresar al territorio continental y continuar por vía terrestre hasta un punto de embarque más cercano a Yunuén. Esta decisión redujo el tiempo de navegación y facilitó el traslado seguro de los instrumentos.

Las condiciones del entorno en Yunuén fueron particularmente importantes para la observación GNSS. En varias zonas próximas a los muelles se encontró vegetación de considerable altura y densidad. Los árboles y el follaje reducen la visibilidad directa entre la antena y determinados satélites y pueden producir atenuación y propagación multitrayectoria de las señales (Leick et al., 2015; International Telecommunication Union, 2021). Estas condiciones pueden incrementar el ruido de las observaciones, disminuir el número de satélites utilizables y dificultar la obtención de soluciones fijas en posicionamiento RTK.

Durante las primeras horas de la jornada también existió neblina. No obstante, para las frecuencias utilizadas por los sistemas GNSS no resulta apropiado atribuir a la neblina un efecto de multitrayectoria comparable con el producido por superficies sólidas, cuerpos de agua, estructuras o vegetación próxima a la antena. Por esta razón, los principales factores considerados para explicar la degradación observada fueron la obstrucción del cielo, la vegetación y las condiciones geométricas del entorno.

Ante estas condiciones, fue necesario prolongar la adquisición de observaciones y seleccionar cuidadosamente los sitios de ocupación antes de continuar con los levantamientos.

A pesar de las restricciones encontradas, fue posible realizar el levantamiento de los dos muelles principales de la isla, registrando puntos correspondientes a la geometría de la infraestructura y los sitios destinados al apoyo fotogramétrico.

La Figura 2.5 muestra uno de los puntos observados en un entorno representativo de las condiciones de vegetación próximas a los muelles.



Figura 2.5: Punto de apoyo fotogramétrico georreferenciado mediante GNSS en la isla de Yunuén.

2.4.4. Levantamiento en La Pacanda

Las actividades en la isla de La Pacanda se realizaron bajo condiciones de visibilidad y acceso más favorables que las encontradas durante algunas de las jornadas anteriores.

Después del arribo se efectuó un reconocimiento del área para identificar las zonas adecuadas para el establecimiento de la estación GNSS y para distribuir los puntos requeridos por los levantamientos posteriores.

La menor presencia de obstáculos próximos a la antena proporcionó condiciones favorables para la recepción de señales GNSS. Esto permitió realizar de manera más eficiente las observaciones correspondientes al levantamiento con el receptor móvil y obtener soluciones RTK estables durante una mayor parte de la jornada.

La infraestructura de interés estaba constituida principalmente por dos muelles. La geometría y extensión de estas estructuras permitió realizar el levantamiento con una distribución de puntos ajustada a sus dimensiones y a los requerimientos establecidos para el proyecto.

Los puntos materializados y documentados durante estas actividades pueden servir como referencia para verificaciones o levantamientos posteriores siempre que se compruebe previamente su estabilidad física y se mantenga la información necesaria para reproducir el sistema de referencia utilizado.

La Figura 2.6 presenta uno de los puntos observados durante los trabajos de posicionamiento GNSS.



Figura 2.6: Levantamiento GNSS de un punto de apoyo en la isla de La Pacanda.

2.5. Apoyo terrestre para fotogrametría

Los levantamientos fotogramétricos requieren que el modelo reconstruido a partir de las imágenes sea relacionado con el sistema de coordenadas utilizado en el proyecto. Una de las metodologías tradicionales para realizar esta vinculación consiste en emplear puntos de control terrestre (*Ground Control Points*, GCP), cuyas coordenadas son determinadas independientemente mediante técnicas topográficas o geodésicas.

Los GCP deben ser claramente identificables tanto en campo como en las imágenes adquiridas desde la plataforma UAV. Su distribución espacial influye en la geometría y estabilidad del ajuste fotogramétrico, por lo que deben colocarse de acuerdo con las características y dimensiones del área levantada (Wolf et al., 2014; Colomina and Molina, 2014).

Debe distinguirse entre los GCP utilizados durante el ajuste y los puntos de verificación o *checkpoints*. Mientras los primeros intervienen en la georreferenciación del modelo, los segundos deben permanecer independientes del ajuste cuando se utilizan para evaluar la exactitud posicional del producto final (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2024).

2.5.1. Janitzio

En Janitzio se emplearon lonas de alto contraste que permitieran identificar con claridad los puntos de control en las imágenes del vuelo. De acuerdo con los requerimientos establecidos para el proyecto, se colocaron tres puntos de control terrestre

cuya posición fue determinada mediante observaciones GNSS.

Las dianas fueron distribuidas procurando que fueran claramente visibles desde la plataforma aérea y que permanecieran inmóviles durante la adquisición de las imágenes. Las coordenadas determinadas para estos puntos fueron utilizadas posteriormente durante el procesamiento del levantamiento fotogramétrico.

La Figura 2.7 muestra una de las lonas utilizadas como diana de control.



Figura 2.7: Diana de alto contraste utilizada como punto de control terrestre durante el levantamiento fotogramétrico mediante UAV.

2.5.2. Yunuén

En Yunuén se aprovecharon superficies despejadas localizadas en diferentes sectores de la isla para instalar las dianas destinadas al control terrestre.

Una vez colocadas, sus coordenadas fueron determinadas mediante observaciones GNSS y posteriormente incorporadas al procesamiento fotogramétrico. La selección de superficies abiertas facilitó tanto la observación GNSS como la identificación de las dianas en las imágenes.

La Figura 2.8 muestra una de las dianas colocadas durante esta etapa.



Figura 2.8: Diana de control terrestre colocada en Yunuén para su identificación durante el procesamiento de las imágenes del vuelo fotogramétrico.

2.6. Apoyo geodésico al levantamiento batimétrico

Además de proporcionar control para los levantamientos terrestres y fotogramétricos, el posicionamiento GNSS se utilizó para relacionar espacialmente la infraestructura de los muelles, la línea de costa y las observaciones correspondientes al levantamiento batimétrico.

En este contexto es importante distinguir entre posicionamiento y medición de profundidad. El receptor GNSS determina la posición de la antena y, cuando se encuentra instalado sobre una embarcación, permite conocer su trayectoria. La profundidad del cuerpo de agua debe obtenerse mediante el equipo batimétrico correspondiente. Ambos conjuntos de observaciones pueden integrarse posteriormente para generar un modelo georreferenciado del fondo (International Hydrographic Organization, 2022).

La correcta sincronización y referenciación espacial entre el sistema de posicionamiento y el sensor utilizado para determinar profundidades constituye un componente fundamental del levantamiento hidrográfico.

2.6.1. Janitzio

Las actividades de apoyo al levantamiento batimétrico en Janitzio incluyeron la medición de la infraestructura portuaria y de la zona de transición entre la superficie terrestre y el cuerpo de agua.

La jornada inició aproximadamente a las 05:00 horas con el propósito de aprovechar las primeras horas disponibles para el trabajo de campo. Debido a que ya se disponía del punto utilizado como referencia durante las jornadas anteriores, fue posible establecer con mayor rapidez la configuración necesaria para realizar observaciones con el receptor móvil.

Los trabajos comprendieron los cuatro muelles considerados dentro del área de intervención. Se levantaron puntos correspondientes a pilares, apoyos y otros elementos estructurales representativos de su geometría. En sitios donde la recepción de las señales presentaba mayores variaciones, las observaciones fueron mantenidas durante un intervalo suficiente para verificar la estabilidad de las coordenadas obtenidas.

Posteriormente se realizó el levantamiento de la franja costera con el objetivo de representar la transición entre la superficie emergida y el cuerpo de agua. Los puntos se distribuyeron siguiendo la geometría del sitio y las condiciones de acceso observadas durante la jornada.

En las zonas someras accesibles se densificó la información próxima a la orilla y a las estructuras de los muelles. Esta información proporciona una zona común de referencia entre la topografía terrestre y el modelo batimétrico obtenido posteriormente.

Para extender el levantamiento hacia las áreas próximas a los muelles se utilizó una embarcación local, cuya maniobrabilidad permitió recorrer sectores cercanos a la costa. El GNSS permitió registrar la posición de los puntos y trayectorias correspondientes, mientras que la determinación de las profundidades se realizó mediante el procedimiento batimétrico descrito en el capítulo correspondiente.

La Figura 2.9 muestra la captura de información GNSS en la zona de transición entre la infraestructura y el cuerpo de agua.



Figura 2.9: Levantamiento GNSS de puntos de apoyo en la zona de transición entre la infraestructura del muelle y el cuerpo de agua en Janitzio.

2.6.2. Tecuena

En Tecuena se realizó el levantamiento de la línea de costa próxima al muelle dentro de las zonas accesibles para el personal. El área disponible estuvo limitada por la presencia de pendientes, vegetación, propiedades particulares y otras estructuras próximas.

Después del levantamiento terrestre se utilizó una embarcación para extender el posicionamiento hacia el entorno lacustre inmediato. El receptor GNSS permitió registrar la trayectoria y posición de la embarcación sobre el espejo de agua.

Estas observaciones proporcionaron el control horizontal necesario para relacionar las mediciones batimétricas con la topografía terrestre. La profundidad del fondo, sin embargo, corresponde a la observación proporcionada por el sistema batimétrico y no a la coordenada de la antena GNSS instalada sobre la embarcación.

La Figura 2.10 muestra las condiciones existentes en el área lacustre próxima al muelle durante estas actividades.



Figura 2.10: Trabajos de apoyo geodésico al levantamiento batimétrico en la zona lacustre adyacente al muelle de Tecuena.

2.6.3. Yunuén

En Yunuén, la geometría del área próxima a uno de los muelles y la presencia de numerosas embarcaciones locales limitaron el acceso directo de la embarcación utilizada para los levantamientos.

Ante esta situación fue necesario adaptar la estrategia de adquisición para mantener puntos de referencia espacial próximos al área de interés. Se realizaron observaciones GNSS desde posiciones accesibles sobre las embarcaciones estacionadas, utilizando el receptor montado sobre un bastón y procurando mantenerlo estable durante cada ocupación.

Estas observaciones tuvieron como finalidad proporcionar posiciones de referencia en la zona próxima al muelle. Debido a que el receptor se encontraba sobre estructuras flotantes, estos puntos no deben considerarse vértices geodésicos permanentes ni puntos de control altimétrico estable. Su función dentro del proyecto fue exclusivamente apoyar la relación espacial entre la infraestructura, el área lacustre y las observaciones efectuadas durante el levantamiento.

La Figura 2.11 muestra las condiciones bajo las cuales se realizaron estas mediciones.



Figura 2.11: Captura de posiciones GNSS desde una embarcación en la zona de muelles de Yunuén.

2.6.4. La Pacanda

En La Pacanda las condiciones de navegación y recepción de las señales GNSS facilitaron la ejecución de los trabajos de apoyo al levantamiento batimétrico.

Mediante una embarcación local se realizaron recorridos desde las zonas próximas a los dos muelles, registrando mediante GNSS la posición y trayectoria correspondiente a los sectores considerados en el levantamiento.

La información obtenida permitió relacionar espacialmente las observaciones realizadas sobre el cuerpo de agua con los productos topográficos correspondientes a la zona terrestre. Posteriormente, ambos conjuntos de información fueron utilizados como insumos para la integración del modelo topográfico y batimétrico.

La Figura 2.12 muestra una de las actividades realizadas desde la embarcación.



Figura 2.12: Adquisición de información de posicionamiento durante los trabajos de apoyo al levantamiento batimétrico en La Pacanda.

En síntesis, en este capítulo se describió el establecimiento del control geodésico y las actividades de posicionamiento GNSS desarrolladas en Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda. Se definió el marco de referencia utilizado y se explicó la función de la RGNA dentro de la vinculación horizontal del proyecto, así como la necesidad de distinguir esta referencia de la componente vertical basada en bancos de nivel y modelos de altura. Asimismo, se documentaron las adaptaciones realizadas durante los trabajos de campo ante las condiciones particulares de acceso, infraestructura y vegetación presentes en las diferentes islas.

El posicionamiento GNSS proporcionó el marco espacial común utilizado para integrar los levantamientos topográficos, los puntos de control terrestre destinados al procesamiento fotogramétrico y la información de apoyo al levantamiento batimétrico. El siguiente capítulo describe la planeación y ejecución de los vuelos mediante UAV, el procesamiento de la información fotogramétrica y LiDAR, la generación de nubes de puntos y modelos digitales, así como las actividades correspondientes a la adquisición y procesamiento de la información batimétrica.

Capítulo 3

LiDAR, fotogrametría y batimetría aplicadas

El capítulo anterior describió el establecimiento del control geodésico y las actividades de posicionamiento GNSS utilizadas para proporcionar una referencia espacial común a los levantamientos realizados en Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda. A partir de este control, en el presente capítulo se describen las actividades relacionadas con la adquisición de información mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), sensores LiDAR e imágenes RGB, así como el levantamiento batimétrico desarrollado en las zonas próximas a los muelles.

Se presentan la planeación de las misiones de vuelo, las características principales del sensor DJI Zenmuse L2 y de la plataforma DJI Matrice 350 RTK, el procedimiento general de procesamiento y clasificación de las nubes de puntos y la generación de productos derivados. Asimismo, se describen las condiciones físicas del Lago de Pátzcuaro que influyeron en la adquisición de información y el procedimiento empleado para integrar la topografía terrestre con las observaciones batimétricas.

3.1. Planeación y ejecución de los vuelos

La planeación de una misión UAV constituye una etapa fundamental para asegurar que los datos obtenidos proporcionen la cobertura, densidad y calidad necesarias para generar los productos requeridos. Los parámetros de vuelo deben definirse considerando el tipo de sensor, las características del terreno, la geometría del área de interés y la resolución espacial esperada (Colomina and Molina, 2014; Shan and Toth, 2018).

Para los trabajos realizados se utilizó la plataforma *DJI Pilot 2*, compatible con el

sistema Zenmuse L2. El fabricante permite utilizar diferentes tipos de misiones, entre ellas rutas de área, rutas lineales y rutas mediante puntos de paso, dependiendo de las características del levantamiento (DJI, 2024).

La planeación general comprendió las siguientes actividades:

1. Delimitación del polígono correspondiente al área de levantamiento.
2. Definición de la altura y velocidad de vuelo de acuerdo con las características del sitio y los requerimientos de densidad de información.
3. Configuración de las líneas de vuelo y de su separación para obtener una cobertura uniforme del área.
4. Selección del modo de escaneo LiDAR y de los parámetros correspondientes al número de retornos.
5. Configuración de la adquisición simultánea de información LiDAR e imágenes RGB.
6. Verificación del estado de la solución GNSS/RTK y de la unidad de medición inercial (IMU) antes de iniciar cada misión.
7. Consideración de obstáculos, vegetación, infraestructura, áreas de despegue y aterrizaje y condiciones meteorológicas antes de ejecutar el vuelo.

Debido a que el sensor Zenmuse L2 integra tanto un escáner LiDAR como una cámara RGB, es necesario distinguir los principios de adquisición de ambas fuentes de información. El LiDAR determina distancias mediante la medición del tiempo de propagación de pulsos láser y genera directamente observaciones tridimensionales, mientras que la fotogrametría determina información geométrica mediante la correspondencia entre puntos observados en múltiples imágenes (Wolf et al., 2014; Shan and Toth, 2018).

La georreferenciación primaria de la nube de puntos LiDAR se obtiene mediante la integración de las observaciones GNSS y de la orientación proporcionada por la IMU del sistema. Los puntos de control terrestre establecidos en campo proporcionan información adicional para verificar la consistencia espacial de los productos y, en el caso del procesamiento fotogramétrico de imágenes, pueden intervenir en el ajuste y orientación del bloque.

Por esta razón, debe distinguirse entre la georreferenciación directa proporcionada por el sistema GNSS/IMU y los puntos de control terrestre utilizados durante la generación y evaluación de los productos cartográficos.

3.2. Sistema de adquisición aerotransportada

3.2.1. Sensor DJI Zenmuse L2

El DJI Zenmuse L2 es un sistema de adquisición geoespacial que integra un escáner LiDAR, una unidad de medición inercial de alta precisión y una cámara RGB con sensor CMOS de formato 4/3. El conjunto está diseñado para operar sobre plataformas UAV compatibles y permite adquirir simultáneamente información tridimensional, imágenes y datos necesarios para determinar la trayectoria y orientación del sensor (DJI, 2024).

El escáner LiDAR emplea una longitud de onda de aproximadamente 905 nm y dispone de modos de escaneo repetitivo y no repetitivo. En modo de retorno único puede registrar hasta aproximadamente 240 000 puntos por segundo, mientras que con retornos múltiples la tasa máxima especificada alcanza 1 200 000 puntos por segundo. El sistema puede registrar hasta cinco retornos asociados con un mismo pulso láser. Esta característica resulta particularmente útil en zonas con vegetación, debido a que un pulso puede interactuar con diferentes superficies antes de alcanzar el terreno. Sin embargo, la capacidad para registrar puntos correspondientes al suelo depende de factores como la densidad de la vegetación, el ángulo de incidencia, la altura de vuelo y la configuración del levantamiento.

El alcance nominal especificado por el fabricante depende principalmente de la reflectividad del objeto y de las condiciones de iluminación. Para una reflectividad del 50 % se especifican alcances del orden de 450 m en condiciones favorables, mientras que para superficies con reflectividad del 10 % el alcance disminuye aproximadamente a 250 m (DJI, 2024).

De acuerdo con el fabricante, el sistema puede alcanzar una exactitud nominal de aproximadamente 5 cm en horizontal y 4 cm en vertical bajo condiciones específicas de prueba a una altura relativa de 150 m, empleando solución RTK fija, escaneo repetitivo y procesamiento mediante DJI Terra. Estos valores corresponden a condiciones de ensayo controladas y no deben interpretarse directamente como la exactitud alcanzada durante todos los vuelos realizados en el proyecto (DJI, 2024).

Por esta razón, la exactitud real de los productos debe evaluarse mediante puntos de verificación independientes y no únicamente a partir de las especificaciones nominales del fabricante.

La IMU integrada registra las variaciones de orientación del sensor durante el vuelo. Su información se combina con las observaciones GNSS para reconstruir la trayectoria y actitud de la plataforma, parámetros necesarios para determinar las

coordenadas tridimensionales de los puntos registrados por el LiDAR.

La cámara RGB integrada dispone de un sensor CMOS de formato 4/3 y aproximadamente 20 megapíxeles. Las imágenes obtenidas proporcionan información radiométrica que puede utilizarse para colorear la nube de puntos y, cuando se realiza el procesamiento fotogramétrico correspondiente, para generar productos de imagen como ortomosaicos.

Las principales características del sistema relevantes para este proyecto pueden resumirse de la siguiente manera:

- escáner LiDAR aerotransportado;
- longitud de onda aproximada de 905 nm;
- hasta cinco retornos por pulso;
- tasa máxima de 240 000 puntos/s para retorno único;
- tasa máxima de 1 200 000 puntos/s utilizando retornos múltiples;
- IMU integrada;
- cámara RGB CMOS 4/3 de 20 megapíxeles;
- georreferenciación mediante integración GNSS/IMU;
- compatibilidad con procesamiento mediante DJI Terra.

La Figura 3.1 muestra el sensor utilizado durante los levantamientos.



Figura 3.1: Sensor DJI Zenmuse L2 utilizado para la adquisición de información LiDAR e imágenes RGB durante los vuelos.

3.2.2. Vehículo aéreo DJI Matrice 350 RTK

El *DJI Matrice 350 RTK* es una plataforma UAV multirrotor diseñada para aplicaciones profesionales de adquisición de información. Su sistema permite transportar diferentes sensores, entre ellos el Zenmuse L2, e incorpora capacidades GNSS y RTK para determinar con precisión la trayectoria del vehículo durante el vuelo (DJI, 2025).

El sistema GNSS del vehículo es compatible con las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, cuando se dispone de una solución RTK fija, la precisión nominal del posicionamiento es de

$$1\ \text{cm} + 1\ \text{ppm} \tag{3.1}$$

en la componente horizontal y

$$1.5\ \text{cm} + 1\ \text{ppm} \tag{3.2}$$

en la componente vertical. Estos valores corresponden al posicionamiento RTK del vehículo y no representan por sí mismos la exactitud final del producto cartográfico.

Entre las características operativas relevantes del Matrice 350 RTK se encuentran:

- masa aproximada de 6.47 kg con dos baterías TB65;

- masa máxima de despegue de 9.2 kg;
- velocidad horizontal máxima de 23 m/s;
- resistencia nominal al viento de hasta 12 m/s;
- tiempo máximo nominal de vuelo de hasta 55 minutos sin carga útil y en condiciones controladas;
- clasificación de protección ambiental IP55;
- operación mediante sistemas GNSS multiconstelación;
- compatibilidad con el sensor Zenmuse L2.

La autonomía efectiva durante las misiones realizadas con el sensor instalado es necesariamente menor que el tiempo máximo nominal especificado sin carga útil y depende de factores como la velocidad programada, condiciones del viento, temperatura, altitud, maniobras y masa transportada.

En este proyecto, el Matrice 350 RTK proporcionó la plataforma aérea para ejecutar las trayectorias de vuelo planificadas y transportar el sensor Zenmuse L2 sobre las áreas de interés.

La Figura 3.2 muestra la plataforma utilizada.



Figura 3.2: Vehículo aéreo DJI Matrice 350 RTK utilizado como plataforma para transportar el sensor Zenmuse L2.

3.3. Procesamiento de la información LiDAR y fotogramétrica

El procesamiento de la información adquirida durante los vuelos comprendió diferentes etapas, desde la generación inicial de la nube de puntos hasta su edición,

clasificación y utilización para producir modelos digitales.

Los datos originales del sensor Zenmuse L2 pueden ser procesados mediante *DJI Terra*. Este software integra las observaciones LiDAR, los datos de trayectoria GNSS y la información de orientación proporcionada por la IMU para generar una nube de puntos tridimensional georreferenciada. Asimismo, permite aplicar procedimientos de optimización de precisión, clasificación de puntos correspondientes al terreno y evaluación mediante puntos de control (DJI, 2026b).

Posteriormente, la nube de puntos puede ser editada y depurada mediante *DJI Modify*. Este software permite realizar operaciones como reducción de ruido, selección y reclasificación de puntos, extracción de terreno y clasificación semántica de diferentes elementos (DJI, 2026a).

El procedimiento general utilizado para organizar la información puede dividirse en las siguientes etapas:

1. **Generación y georreferenciación de la nube de puntos.** Se integraron las observaciones LiDAR con la trayectoria GNSS/IMU para obtener coordenadas tridimensionales de los puntos registrados.

2. **Verificación inicial.** Se revisó la cobertura del área levantada, la continuidad entre líneas de vuelo y la presencia de posibles zonas sin información o con ruido excesivo.

3. **Control geométrico.** Las coordenadas obtenidas fueron comparadas con los puntos de control y, cuando correspondió, con puntos independientes de verificación.

4. **Depuración.** Se identificaron y eliminaron observaciones consideradas anómalas o no representativas de las superficies de interés.

5. **Clasificación.** Los puntos fueron organizados de acuerdo con la superficie u objeto representado, distinguiendo principalmente terreno, vegetación, infraestructura y otros elementos.

6. **Generación de productos derivados.** A partir de la nube clasificada se obtuvieron los insumos necesarios para generar el Modelo Digital de Superficie (MDS), el Modelo Digital del Terreno (MDT), curvas de nivel y otros productos tridimensionales.

Es importante distinguir entre el MDS y el MDT. El MDS representa la superficie superior observable e incluye elementos como vegetación, construcciones y demás objetos existentes sobre el terreno. En contraste, el MDT busca representar la superficie del terreno desnudo y, por ello, requiere identificar y conservar principalmente los puntos clasificados como terreno.

Las imágenes RGB adquiridas durante el vuelo fueron utilizadas para complementar la interpretación visual de la nube de puntos y para los productos de imagen generados durante el procesamiento.

La Figura 3.3 presenta un ejemplo de la información obtenida durante el procesamiento y evaluación de la nube de puntos.



Figura 3.3: Vista del procesamiento y control de calidad de la nube de puntos generada a partir del levantamiento LiDAR.

3.4. Condiciones del entorno relevantes para el levantamiento

La cuenca del Lago de Pátzcuaro es una cuenca endorreica localizada dentro del Eje Neovolcánico Transversal. Las características topográficas, hidrológicas y de cobertura vegetal de la región influyen directamente en la adquisición de información geoespacial, particularmente en las zonas próximas a la ribera.

El vaso lacustre se encuentra aproximadamente a los 2, 035 m sobre el nivel medio del mar y está rodeado por relieves volcánicos de mayor elevación. En las partes altas de la cuenca se presentan principalmente comunidades forestales de pino, encino y otras especies características de la región (González-Sosa et al., 2010).

Los procesos de erosión y transporte de sedimentos constituyen un problema importante en la cuenca. La pérdida de cobertura vegetal y determinados cambios de uso del suelo incrementan el transporte de materiales hacia el lago y contribuyen al proceso de azolvamiento (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, sf; Chacón-Torres et al., 2026).

Asimismo, el Lago de Pátzcuaro presenta variaciones importantes en su nivel y extensión superficial. Estudios recientes han documentado cambios en la línea de costa y procesos de desecamiento particularmente notorios en la zona sur del lago (Contreras Figueroa, 2025).

Estas condiciones justifican la generación de cartografía y modelos de elevación actualizados, debido a que la geometría de la línea de costa y de las zonas someras puede cambiar con respecto a productos cartográficos históricos.

3.5. Relieve subacuático y levantamiento batimétrico

La batimetría tiene como objetivo determinar la configuración geométrica del fondo de un cuerpo de agua mediante observaciones de profundidad vinculadas con una posición horizontal y una referencia vertical conocidas.

En el Lago de Pátzcuaro, la profundidad presenta variaciones espaciales importantes. Estudios previos han identificado sectores someros en la parte sur y profundidades mayores hacia otros sectores del lago; asimismo, la zona próxima a las islas presenta una geometría condicionada tanto por el origen volcánico de la cuenca como por los procesos posteriores de sedimentación (González-Sosa et al., 2010; Chacón-Torres et al., 2026).

Debido a que el nivel y la morfología del lago han cambiado a lo largo del tiempo, en este reporte se evita utilizar valores históricos de profundidad como representación directa de las condiciones observadas durante el levantamiento. Para fines del proyecto, las profundidades relevantes corresponden a las determinadas durante las propias jornadas de campo.

La Figura 3.4 muestra algunos de los perfiles obtenidos para representar la relación entre la infraestructura de los muelles, el nivel del agua y el relieve subacuático.

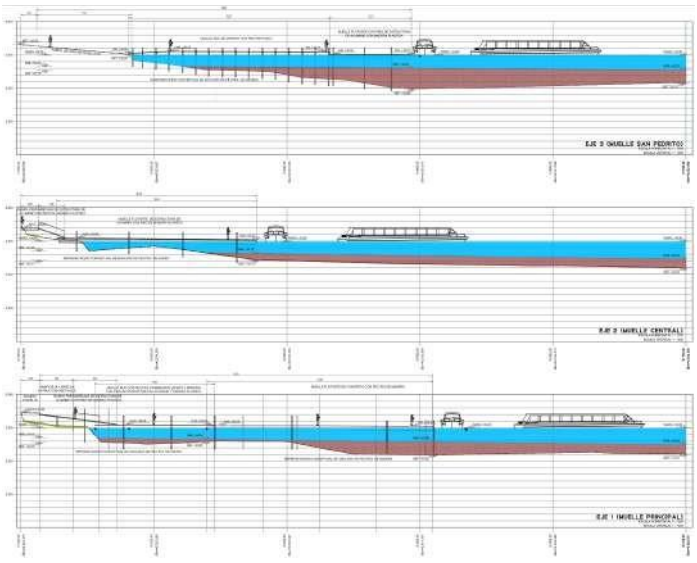


Figura 3.4: Perfiles batimétricos utilizados para representar la relación geométrica entre la infraestructura del muelle, la superficie del agua y el fondo lacustre.

3.5.1. Metodología del levantamiento batimétrico

Para determinar la configuración del fondo en las zonas de interés se utilizó un dispositivo de medición de profundidad con un alcance de hasta 6 m, en combinación con el posicionamiento GNSS utilizado durante las jornadas de campo.

El posicionamiento permitió asociar cada observación de profundidad con una coordenada horizontal dentro del sistema de referencia establecido previamente. De esta manera, cada medición batimétrica quedó definida por una posición (E, N) y por la cota correspondiente al fondo.

Conceptualmente, cuando la profundidad d se mide desde la superficie libre del agua, la elevación del fondo puede expresarse como

$$H_f = H_a - d, \tag{3.3}$$

donde H_f corresponde a la elevación del fondo, H_a a la elevación de la superficie del agua referida al sistema vertical empleado y d a la profundidad medida.

Cuando la elevación se obtiene mediante una antena GNSS instalada sobre la embarcación, deben considerarse además las separaciones verticales o *offsets* existentes entre el punto de referencia de la antena, la superficie del agua y el punto utilizado para realizar la medición de profundidad.

La determinación y registro adecuado de estos desplazamientos resulta indispensable para mantener consistencia vertical entre las observaciones batimétricas y la

topografía terrestre.

La posición de la embarcación fue determinada mediante GNSS y relacionada con la red de control establecida en tierra. De esta forma fue posible integrar posteriormente las mediciones de profundidad con los puntos correspondientes a la línea de costa y con los productos topográficos.

La Figura 3.5 muestra una de las actividades realizadas durante la adquisición de información en la zona inmediata al muelle.



Figura 3.5: Adquisición de observaciones de profundidad y posición durante el levantamiento batimétrico en la zona próxima al muelle.

3.5.2. Integración entre topografía y batimetría

La integración de información terrestre y subacuática requiere disponer de una referencia espacial común. Los puntos levantados mediante GNSS en la línea de costa y en las áreas próximas a los muelles proporcionaron una zona de transición entre ambos conjuntos de datos.

Una vez determinadas las elevaciones correspondientes al terreno emergido y al fondo lacustre, las observaciones pueden integrarse para construir una superficie continua. Para ello debe evitarse que los procedimientos de interpolación generen pendientes o discontinuidades artificiales en sectores donde existen cambios bruscos de geometría, como muros, bordes de muelle y otras estructuras.

La posición de los elementos de infraestructura levantados en tierra permite además relacionar la profundidad existente con respecto a los frentes de atraque y evaluar la geometría disponible para la operación de embarcaciones.

3.6. Azolvamiento y su relación con el proyecto

El azolvamiento corresponde al proceso de acumulación de sedimentos transportados hacia un cuerpo de agua. En la cuenca del Lago de Pátzcuaro se ha documentado una aportación continua de sedimentos asociada con procesos de erosión, pérdida de cobertura vegetal y modificaciones del uso del suelo (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, sf; Chacón-Torres et al., 2026).

Este proceso modifica progresivamente la morfología del fondo y puede reducir la profundidad disponible en áreas próximas a la costa y en canales de navegación. También contribuye a cambios en la extensión del espejo de agua y en la geometría de las zonas someras (Contreras Figueroa, 2025).

Desde el punto de vista del levantamiento geomático, la batimetría permite identificar la configuración actual del fondo y determinar las diferencias de elevación existentes entre distintos sectores. Cuando se dispone de levantamientos realizados en diferentes épocas bajo un mismo sistema de referencia, también es posible analizar cambios morfológicos y estimar variaciones volumétricas.

Sin embargo, debe señalarse que un levantamiento batimétrico convencional determina principalmente la geometría de la superficie del fondo y no permite, por sí solo, identificar las propiedades mecánicas de los materiales ni determinar con certeza el espesor de los diferentes estratos sedimentarios.

La caracterización del espesor de azolve, la capacidad portante del terreno y la profundidad necesaria para el desplante de cimentaciones requieren información geotécnica adicional, obtenida mediante sondeos, muestreos u otros métodos específicos. Por esta razón, dichas determinaciones corresponden a los estudios de geotecnia y mecánica de suelos y no forman parte del alcance directo del levantamiento geomático descrito en este reporte.

La información batimétrica sí constituye un insumo importante para evaluar las profundidades existentes en las proximidades de los muelles, identificar zonas someras y calcular volúmenes geométricos cuando se dispone de una superficie de referencia apropiada.

La Figura 3.6 presenta la integración de información planimétrica y batimétrica obtenida en uno de los muelles de Janitzio.



Figura 3.6: Integración de información planimétrica y batimétrica correspondiente a la zona de uno de los muelles de Janitzio.

En síntesis, en este capítulo se describieron los procedimientos de adquisición de información mediante LiDAR, imágenes RGB y levantamientos batimétricos empleados durante el proyecto. Se presentó la planeación de las misiones mediante UAV, las principales características del sensor Zenmuse L2 y de la plataforma Matrice 350 RTK y el flujo general de procesamiento de la información mediante DJI Terra y DJI Modify. Asimismo, se explicó la generación, depuración y clasificación de las nubes de puntos y su relación con la obtención de modelos digitales.

Finalmente, se describieron las condiciones ambientales del Lago de Pátzcuaro que influyen en los levantamientos y el procedimiento utilizado para relacionar las mediciones de profundidad con el control GNSS establecido previamente. De esta manera, la información LiDAR, fotogramétrica, topográfica y batimétrica quedó integrada dentro de un mismo marco espacial. En el siguiente capítulo se presentan los modelos digitales y productos cartográficos derivados de estos datos, así como los procedimientos empleados para su preparación y entrega dentro del proyecto de infraestructura.

Capítulo 4

Modelos digitales y productos cartográficos

Los capítulos anteriores describieron el contexto del proyecto, el establecimiento del control geodésico y la adquisición de información mediante GNSS, LiDAR, imágenes RGB y batimetría. A partir de estos datos, el presente capítulo describe el procesamiento realizado para generar los productos geoespaciales utilizados como insumos en las etapas posteriores del proyecto de infraestructura.

Se presentan el tratamiento de la componente altimétrica, la integración de los datos GNSS con la información aerotransportada, la generación y clasificación de las nubes de puntos, la obtención de Modelos Digitales de Superficie (MDS) y Modelos Digitales del Terreno (MDT), la construcción y edición de superficies mediante redes irregulares de triángulos (TIN), la generación de curvas de nivel y ortomosaicos y, finalmente, los procedimientos empleados para evaluar la consistencia geométrica de los productos obtenidos.

4.1. Tratamiento de la componente altimétrica

4.1.1. Alturas elipsoidales y ortométricas

El posicionamiento mediante GNSS proporciona coordenadas tridimensionales referidas a un elipsoide de referencia. En la componente vertical, los receptores GNSS determinan una altura elipsoidal h, definida geométricamente respecto de dicho elipsoide.

Sin embargo, para diferentes aplicaciones de ingeniería resulta conveniente expresar las elevaciones mediante alturas ortométricas H, relacionadas con el campo

de gravedad terrestre. La transformación entre ambas requiere conocer la separación entre el elipsoide de referencia y el geoide, denominada ondulación geoidal N (Hofmann-Wellenhof and Moritz, 2006).

La relación aproximada entre estas cantidades se expresa mediante

$$H = h - N, \tag{4.1}$$

donde:

- H es la altura ortométrica;
- h es la altura elipsoidal obtenida mediante GNSS;
- N es la ondulación geoidal correspondiente a la posición del punto.

La transformación debe realizarse mediante el modelo geoidal adoptado para el proyecto y mantenerse de manera consistente durante todo el procesamiento. En México, el INEGI proporciona modelos gravimétricos nacionales que permiten obtener la separación entre el geoide y el elipsoide GRS80 asociado con el marco geodésico oficial (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2025).

Es importante documentar explícitamente el modelo geoidal y su versión, debido a que diferentes modelos pueden proporcionar valores distintos de N. Por lo tanto, en la memoria de cálculo deben registrarse el marco horizontal, la época de referencia, el modelo geoidal y la metodología utilizada para generar las alturas finales.

La Figura 4.1 muestra una de las configuraciones GNSS utilizadas para obtener información altimétrica durante los trabajos de campo.



Figura 4.1: Configuración del equipo GNSS durante las actividades de levantamiento altimétrico.

4.2. Control geodésico utilizado durante el procesamiento

El control geodésico descrito en el capítulo anterior proporcionó la referencia espacial común para integrar las diferentes fuentes de información.

Las observaciones registradas en las estaciones establecidas durante los trabajos de campo fueron procesadas utilizando como referencia estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI. Para mantener consistencia con el Sistema Geodésico Nacional, las coordenadas deben relacionarse con el marco ITRF2008, época 2010.0, considerando además la época en la que se realizaron las observaciones (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010, 2024).

El procesamiento GNSS puede utilizar, entre otros insumos, los archivos de observaciones de las estaciones involucradas, coordenadas y velocidades de las estaciones RGNA y efemérides precisas. Estos elementos permiten determinar las coordenadas de los puntos establecidos en campo y mantener la trazabilidad entre las observaciones originales y los productos generados.

A partir de los puntos de referencia se determinaron mediante RTK las coordenadas de los diferentes puntos utilizados durante las actividades topográficas y de apoyo fotogramétrico.

Debe distinguirse entre dos tipos de puntos utilizados para evaluar y controlar los productos:

- **Puntos de control terrestre (GCP):** intervienen durante el ajuste o georreferenciación de los productos.
- **Puntos de verificación (*checkpoints*):** no intervienen en el ajuste y se reservan para evaluar independientemente la exactitud del producto final.

Esta separación es necesaria para evitar evaluar un producto utilizando los mismos puntos con los que fue ajustado (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2024).

La Figura 4.2 muestra la interfaz empleada durante una de las etapas de procesamiento de las observaciones GNSS.

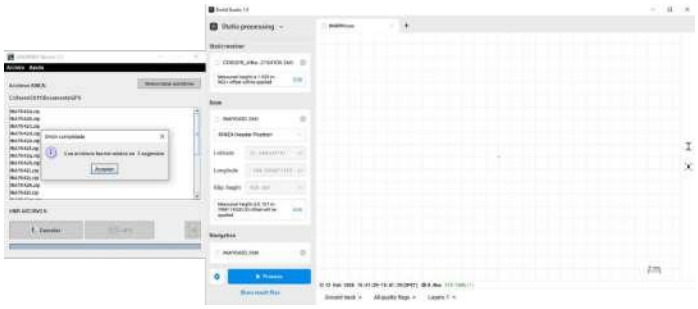


Figura 4.2: Interfaz utilizada durante el procesamiento de observaciones GNSS para la determinación de coordenadas de control.

4.3. Integración de los datos adquiridos

Los datos utilizados para generar los modelos digitales procedieron de diferentes fuentes: observaciones GNSS, información de trayectoria y orientación del UAV, mediciones LiDAR e imágenes RGB.

Los parámetros de vuelo y las características del sistema DJI Matrice 350 RTK y del sensor Zenmuse L2 fueron descritos en el capítulo anterior. Para esta etapa del trabajo, el objetivo principal consistió en transformar los registros originales de los diferentes sensores en una representación tridimensional coherente y referida al sistema de coordenadas adoptado para el proyecto.

La determinación de la posición y orientación del sensor durante el vuelo se realizó mediante la integración de las observaciones GNSS y de la Unidad de Medición Inercial (IMU). La información de trayectoria permite transformar las mediciones realizadas en el sistema propio del sensor hacia el sistema de coordenadas utilizado en el levantamiento (Shan and Toth, 2018).

Cuando se utiliza georreferenciación directa, la precisión de la trayectoria GNSS/IMU influye directamente en la calidad geométrica de la nube de puntos. Por esta razón, los datos de control terrestre constituyen un elemento adicional para revisar y, cuando el procedimiento empleado lo permita, ajustar la consistencia espacial del levantamiento.

La Figura 4.3 muestra la preparación de la plataforma utilizada para adquirir la información posteriormente procesada.



Figura 4.3: Preparación del DJI Matrice 350 RTK utilizado durante la adquisición de información geoespacial.

4.4. Procesamiento digital de la información

4.4.1. Procesamiento GNSS y trayectoria del sensor

Una vez concluidas las actividades de campo, los archivos originales fueron organizados y transferidos al entorno de procesamiento.

Para las observaciones GNSS estáticas se utilizaron procedimientos de posicionamiento relativo respecto de las estaciones de referencia seleccionadas. El procesamiento incluyó las observaciones GNSS, coordenadas de referencia y, cuando correspondió, efemérides precisas. La guía operativa del INEGI contempla estos elementos dentro del procesamiento y ajuste de levantamientos GNSS vinculados a la RGNA (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2024).

La calidad de una solución GNSS no debe describirse únicamente mediante expresiones generales como “precisión milimétrica”. Para documentar el resultado deben reportarse los indicadores obtenidos por el software empleado, como la solución alcanzada, las desviaciones estándar estimadas, las características de los vectores y cualquier otro estadístico disponible que permita evaluar la calidad del posicionamiento.

Para el sistema aerotransportado se procesó la trayectoria GNSS/IMU asociada con el sensor. Esta información permitió determinar la posición y orientación correspondientes a los instantes de adquisición y constituyó uno de los insumos fundamentales para la georreferenciación de las mediciones LiDAR.

4.4.2. Generación y clasificación de la nube de puntos

La información registrada con el sensor Zenmuse L2 fue procesada para obtener una nube tridimensional georreferenciada. Dependiendo del producto de salida, cada punto puede contener atributos como coordenadas X, Y y Z, intensidad del retorno, número de retorno y valores de color RGB.

El flujo de trabajo utilizó herramientas especializadas para las distintas etapas del procesamiento. DJI Terra se empleó para el procesamiento inicial de los datos del sensor y la generación de los productos georreferenciados, mientras que DJI Modify permitió realizar operaciones posteriores de edición, filtrado y clasificación de la nube de puntos.

También pueden utilizarse herramientas de código abierto para determinadas tareas de análisis y procesamiento. QGIS proporciona capacidades para trabajar con información ráster, vectorial y nubes de puntos, mientras que PDAL permite desarrollar flujos reproducibles para filtrar, transformar y procesar datos tridimensionales (QGIS Development Team, 2026; PDAL Contributors, 2026).

Por esta razón, el flujo utilizado en el proyecto no debe describirse en conjunto como “software libre”, debido a que DJI Terra, DJI Modify y AutoCAD Civil 3D son aplicaciones propietarias. En cambio, QGIS y PDAL sí corresponden a herramientas de código abierto.

La clasificación de la nube tuvo como objetivo separar los puntos correspondientes al terreno de aquellos asociados con vegetación, infraestructura y otros objetos.

El procesamiento automático proporciona una clasificación inicial que posteriormente debe ser inspeccionada. En DJI Modify, por ejemplo, existen herramientas específicas para clasificación del terreno y clasificación de diferentes categorías de

objetos (DJI, 2026a).

Posteriormente se realizó una revisión visual para identificar posibles errores de clasificación. Esta etapa resulta particularmente importante en zonas con bordes de muelles, vegetación densa, superficies próximas al agua y cambios bruscos de elevación, donde los algoritmos automáticos pueden asignar categorías incorrectas.

No todos los retornos registrados sobre el agua representan una superficie estable o útil para la generación de modelos terrestres. Por esta razón, las observaciones anómalas o inconsistentes en zonas lacustres fueron revisadas y, cuando correspondió, excluidas de la superficie del terreno.

4.5. Generación de modelos digitales

4.5.1. Modelo Digital de Superficie

El Modelo Digital de Superficie (MDS) representa la elevación de la superficie observable e incluye tanto el terreno como los objetos localizados sobre éste, por ejemplo edificaciones, infraestructura y vegetación.

A partir de la nube de puntos georreferenciada puede generarse una representación ráster mediante la asignación o interpolación de valores de elevación sobre una malla regular.

El MDS resulta útil para representar la configuración tridimensional general del entorno y para analizar elementos que sobresalen de la superficie terrestre.

4.5.2. Modelo Digital del Terreno

El Modelo Digital del Terreno (MDT) busca representar únicamente la superficie del terreno. Para su generación se utilizaron principalmente los puntos previamente clasificados como suelo o terreno.

La calidad del MDT depende, por lo tanto, tanto de la exactitud de la nube original como de la correcta clasificación de los puntos. Una clasificación incorrecta de vegetación, construcciones u otros objetos como terreno puede introducir deformaciones en la superficie interpolada (Li et al., 2005; Shan and Toth, 2018).

En áreas con discontinuidades, como muros, bordes de plataformas y taludes, la interpolación automática debe revisarse para evitar la formación de superficies artificiales entre elementos que presentan cambios abruptos de elevación.

4.5.3. Modelo de sombreado del relieve

A partir del MDT se generó un modelo de sombreado del relieve o *hillshade*. Este producto simula la iluminación de la superficie utilizando un azimut y un ángulo de elevación definidos para una fuente de luz hipotética.

El *hillshade* facilita la interpretación visual de cambios de pendiente, depresiones, crestas y otras características geomorfológicas presentes en el modelo. Sin embargo, no constituye por sí mismo un método para diagnosticar grietas, fallas geológicas o daños estructurales; cualquier interpretación de este tipo requeriría información adicional y una escala adecuada.

La Figura 4.4 muestra el sombreado generado para el área del panteón de Janitzio.



Figura 4.4: Modelo de sombreado del relieve del área del panteón de Janitzio derivado del modelo digital de elevación.

La Figura 4.5 presenta una representación hipsométrica del modelo digital que permite identificar visualmente las variaciones de elevación.

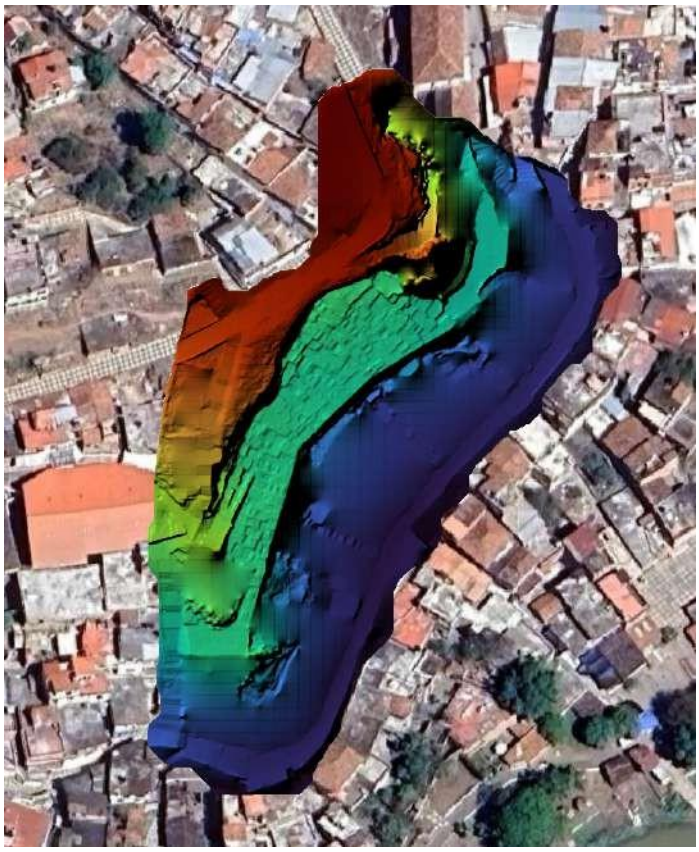


Figura 4.5: Representación del modelo digital de elevación mediante una rampa de valores altimétricos.

4.5.4. Generación del ortomosaico

Las imágenes RGB adquiridas durante los vuelos fueron utilizadas para generar ortomosaicos de las áreas levantadas.

Un ortomosaico se obtiene mediante la orientación de las imágenes, la corrección de las deformaciones producidas por la perspectiva y el relieve y el posterior ensamblado de las fotografías dentro de un sistema de coordenadas común (Wolf et al., 2014).

Durante la ortorrectificación se utiliza un modelo de elevación apropiado para corregir el desplazamiento debido al relieve. El tipo de superficie utilizada debe ser consistente con las características del producto que se desea generar, particularmente en zonas con vegetación o estructuras elevadas.

La Figura 4.6 muestra uno de los ortomosaicos obtenidos.



Figura 4.6: Ortomosaico del muelle y su entorno inmediato en la isla de Yunuén.

4.6. Generación de superficies TIN y planos altimétricos

4.6.1. Construcción y edición de la red irregular de triángulos

Para utilizar la información altimétrica dentro de los procesos de diseño y representación en plataformas CAD se generaron superficies mediante una Red Irregular de Triángulos (*Triangulated Irregular Network*, TIN).

Una TIN representa una superficie continua mediante triángulos cuyos vértices corresponden a puntos con coordenadas tridimensionales. Su principal ventaja es que permite representar una superficie con una densidad variable y conservar elementos geométricos relevantes mediante líneas de rotura (Li et al., 2005).

La nube de puntos clasificada como terreno se utilizó como uno de los principales insumos para construir estas superficies. Posteriormente se realizó una revisión de la triangulación para detectar caras que atravesaran incorrectamente discontinuidades del terreno.

En lugares como muros de contención, bordes de muelle, escalinatas, coronas y pies de talud se incorporaron, cuando fue necesario, líneas de rotura o *breaklines*. Estas líneas condicionan la triangulación y permiten representar con mayor fidelidad

cambios bruscos en la geometría.

La edición de la superficie resulta particularmente importante en zonas próximas al agua, debido a que la ausencia de puntos válidos o la presencia de observaciones anómalas puede generar triángulos artificiales entre la superficie terrestre y sectores sin información.

4.6.2. Generación de curvas de nivel

A partir de la superficie TIN revisada se generaron las curvas de nivel correspondientes a los planos altimétricos.

Las curvas de nivel representan líneas que unen puntos de igual elevación. Su equidistancia debe definirse de acuerdo con la escala del producto, la precisión de los datos, la morfología del terreno y los requerimientos técnicos del proyecto.

Cuando el Anexo Técnico establezca equidistancias específicas, éstas deben mantenerse en los entregables y documentarse expresamente. No obstante, la generación de intervalos menores no implica por sí misma una mayor precisión si la calidad vertical del modelo no permite respaldarlos.

La información final fue organizada en capas temáticas para facilitar su utilización dentro de los procesos de diseño. Entre las capas generadas se incluyeron curvas de nivel, infraestructura existente, línea de costa, puntos de control y elementos correspondientes a los levantamientos batimétricos.

La Figura 4.7 muestra un ejemplo de la integración de diferentes elementos planimétricos y altimétricos en el plano correspondiente a Yunuén.

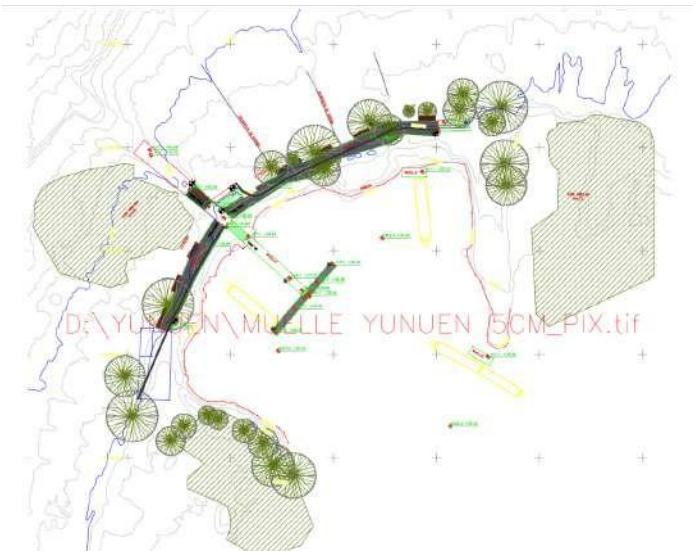


Figura 4.7: Integración de elementos planimétricos y altimétricos en el área del muelle de Yunuén.

La Figura 4.8 presenta otro ejemplo de los productos cartográficos obtenidos para el área de intervención en Janitzio.



Figura 4.8: Producto cartográfico correspondiente al área del panteón de Janitzio.

4.7. Control de calidad y validación de los productos

La evaluación de la calidad posicional permite determinar si los productos generados son adecuados para el propósito previsto. Para realizar esta evaluación es necesario utilizar puntos de verificación independientes que no hayan intervenido en el ajuste del modelo (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2024).

Para la componente vertical, el error de cada punto puede expresarse como

$$e_{H_i} = H_i^{\text{modelo}} - H_i^{\text{control}}, \tag{4.2}$$

y el Error Cuadrático Medio vertical se determina mediante

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} H_i^{\text{modelo}} - H_i^{\text{control}}\ ^2}, \tag{4.3}$$

donde n representa el número de puntos independientes utilizados para la evaluación.

Para las componentes planimétricas pueden calcularse de manera equivalente

$$RMSE_E = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (E_i - E_i^{\text{control}})^2}, \tag{4.4}$$

y

$$RMSE_N = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (N_i - N_i^{\text{control}})^2}. \tag{4.5}$$

A partir de ambas componentes puede obtenerse el error cuadrático medio horizontal:

$$RMSE_{2D} = \sqrt{RMSE^2{}_E + RMSE^2{}_N}. \tag{4.6}$$

Los resultados deben acompañarse del número de puntos utilizados, su distribución espacial y las características de las superficies donde fueron establecidos. Las normas de exactitud posicional de ASPRS señalan que tanto el número como la distribución de los puntos independientes influyen directamente en la validez de la evaluación (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2024).

Cuando el proyecto establezca tolerancias contractuales de exactitud horizontal o vertical, los resultados obtenidos deben compararse directamente contra esos valores. Dichas tolerancias deben citarse a partir del Anexo Técnico o documento contractual correspondiente, evitando presentarlas como límites universales aplicables a cualquier levantamiento LiDAR o fotogramétrico.

La evaluación de la componente vertical debe considerar además la referencia altimétrica utilizada. Si las alturas ortométricas se obtienen mediante un modelo geoidal, la incertidumbre de dicho modelo forma parte de la cadena de incertidumbre del producto y debe tomarse en consideración cuando se reportan exactitudes de

pocos centímetros.

Finalmente, los planos se estructuraron con los elementos cartográficos necesarios para identificar correctamente el producto, incluyendo sistema de coordenadas, marco de referencia, unidades, escala, orientación, simbología, información altimétrica y demás metadatos requeridos por el proyecto.

La Figura 4.9 muestra uno de los planos resultantes de la integración de la información levantada y procesada.

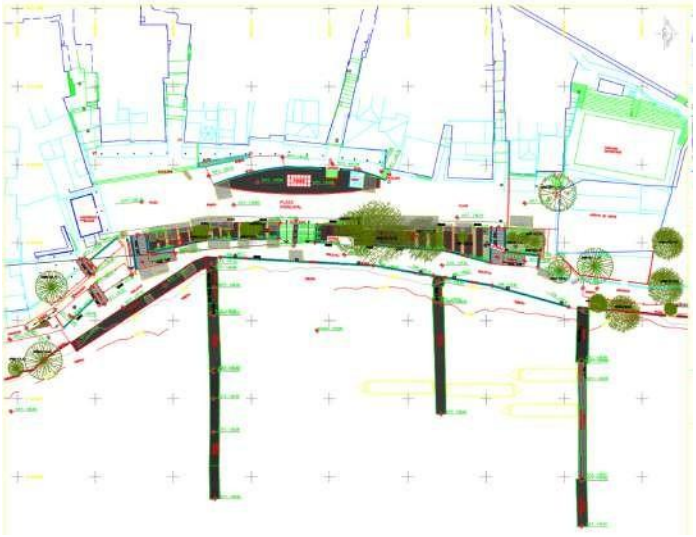


Figura 4.9: Planimetría del área de intervención en Janitzio con la infraestructura y los elementos levantados organizados en el plano final.

En síntesis, en este capítulo se describió el proceso mediante el cual las observaciones obtenidas en campo fueron transformadas en productos geoespaciales utilizados dentro del proyecto de infraestructura. Se explicó el tratamiento de las alturas, la integración del control GNSS con la información aerotransportada, el procesamiento y clasificación de las nubes de puntos y la generación de MDS, MDT, modelos de sombreado, ortomosaicos, superficies TIN y curvas de nivel.

Asimismo, se estableció la importancia de diferenciar los puntos utilizados para ajustar los productos de aquellos destinados a verificar independientemente su exactitud, y se presentaron los principales indicadores empleados para evaluar la consistencia geométrica de los resultados. De esta manera, los levantamientos descritos en los capítulos anteriores quedaron integrados en productos cartográficos y modelos tridimensionales que pueden utilizarse como insumos para las etapas posteriores de análisis y diseño de infraestructura. El capítulo siguiente presenta las conclusiones de la experiencia profesional, las principales competencias aplicadas durante el desarrollo

de los trabajos y la continuidad de las actividades del proyecto.

Capítulo 5

Conclusiones y continuidad del proyecto

Los capítulos anteriores documentaron progresivamente el contexto y alcance del proyecto, el establecimiento del control geodésico, las actividades de posicionamiento GNSS, la adquisición de información mediante LiDAR e imágenes RGB, los trabajos de apoyo al levantamiento batimétrico y, finalmente, el procesamiento de los datos para generar modelos digitales y productos cartográficos. A partir de este recorrido, el presente capítulo sintetiza los principales resultados de la experiencia profesional, las competencias de Ingeniería Geomática aplicadas durante el desarrollo de los trabajos y la posible continuidad de las actividades de infraestructura en las islas del Lago de Pátzcuaro.

5.1. Conclusiones

La participación en los levantamientos realizados en las islas de Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda permitió aplicar de manera integrada diferentes técnicas propias de la Ingeniería Geomática dentro de un proyecto real de infraestructura civil. Las actividades desarrolladas comprendieron desde el establecimiento y utilización del control geodésico hasta la adquisición, procesamiento, integración y representación de información tridimensional correspondiente al terreno, la infraestructura existente y las zonas lacustres próximas a los muelles.

El posicionamiento mediante GNSS permitió establecer una referencia espacial común para los diferentes levantamientos. Las observaciones estáticas, el procesamiento diferencial y el posicionamiento RTK mediante receptores Emlid Reach RS2+ proporcionaron las coordenadas necesarias para relacionar las actividades realizadas en

las distintas jornadas y mantener la información dentro del marco geodésico adoptado por el proyecto, referido al ITRF2008, época 2010.0.

Uno de los principales retos del trabajo consistió en adaptar los procedimientos de levantamiento a las condiciones particulares de cada isla. La accesibilidad limitada, el transporte marítimo del equipo, la presencia de vegetación, las características físicas de los muelles y la disponibilidad de superficies adecuadas para establecer los receptores GNSS obligaron a tomar decisiones operativas directamente en campo. Esta experiencia permitió comprobar que la ejecución de un levantamiento geomático no depende únicamente del conocimiento de los instrumentos, sino también del criterio técnico necesario para adaptar la metodología sin perder la consistencia y trazabilidad de las observaciones.

La utilización del DJI Matrice 350 RTK equipado con el sensor Zenmuse L2 permitió complementar los levantamientos terrestres mediante la adquisición de información LiDAR e imágenes RGB. La nube de puntos tridimensional generada proporcionó una representación detallada de las superficies y elementos presentes en las áreas de intervención, mientras que el procesamiento y clasificación posterior permitieron separar puntos correspondientes al terreno, vegetación e infraestructura.

A partir de la información adquirida y procesada fue posible generar productos como nubes de puntos georreferenciadas y clasificadas, Modelos Digitales de Superficie (MDS), Modelos Digitales del Terreno (MDT), modelos de sombreado, curvas de nivel, ortomosaicos y superficies TIN. Estos productos fueron organizados posteriormente dentro de planos y archivos compatibles con plataformas CAD y Sistemas de Información Geográfica, facilitando su utilización por otras disciplinas involucradas en el proyecto.

El levantamiento batimétrico complementó la información correspondiente a la superficie terrestre mediante observaciones de profundidad en las zonas próximas a los muelles. La vinculación de estas mediciones con el control GNSS permitió mantener una referencia espacial común entre la topografía emergida y el relieve subacuático. Esta integración es particularmente importante en proyectos de infraestructura lacustre, debido a que permite representar la relación entre la línea de costa, las estructuras de atraque y las profundidades existentes en sus proximidades.

Los procedimientos de control de calidad constituyeron otra parte relevante del flujo de trabajo. La revisión de las soluciones GNSS, la inspección y depuración de las nubes de puntos y la comparación de los modelos con puntos de control o verificación permitieron identificar inconsistencias antes de la generación de los productos finales. Cuando se disponga de puntos independientes de verificación y de los estadísticos

correspondientes, los valores de error y RMSE deberán incorporarse a la memoria técnica para cuantificar de manera explícita la exactitud alcanzada.

En este sentido, una de las principales conclusiones derivadas de la experiencia profesional es que la calidad de un producto geomático no depende exclusivamente de la precisión nominal de los instrumentos utilizados. La correcta selección del sistema de referencia, la planificación de las observaciones, las condiciones de adquisición, el procesamiento de los datos, la clasificación de la información y la validación independiente de los resultados forman parte de una misma cadena de trabajo y deben mantenerse consistentes desde el levantamiento hasta la generación de los planos finales.

Asimismo, la información geomática obtenida debe entenderse como un insumo para las etapas posteriores del proyecto de infraestructura. Los modelos topográficos y batimétricos permiten conocer la geometría de las áreas de intervención y proporcionan información para la planeación y el diseño; sin embargo, no sustituyen los estudios estructurales, hidráulicos, geotécnicos o de mecánica de suelos necesarios para definir las soluciones constructivas de los muelles.

5.2. Competencias profesionales aplicadas

El desarrollo de los trabajos permitió aplicar conocimientos adquiridos durante la formación en Ingeniería Geomática en diferentes etapas de un mismo proyecto. Entre las principales competencias utilizadas se encuentran el establecimiento y manejo de sistemas de referencia, el posicionamiento mediante GNSS, el levantamiento topográfico, la adquisición de información mediante UAV, el procesamiento de nubes de puntos LiDAR, la generación de modelos digitales y la integración de información dentro de plataformas CAD y SIG.

Además de los conocimientos técnicos, la experiencia requirió desarrollar capacidades de planeación, organización y resolución de problemas en campo. Las condiciones particulares de cada isla hicieron necesario evaluar alternativas para la instalación del equipo, modificar rutas de traslado, seleccionar sitios adecuados para el posicionamiento y adaptar los procedimientos de adquisición a las restricciones físicas encontradas.

Otro aspecto relevante fue la necesidad de mantener una comunicación continua entre las actividades geomáticas y los requerimientos de otras disciplinas de ingeniería. Los productos generados no constituyen un fin aislado, sino una representación espacial destinada a proporcionar información para la toma de decisiones durante las

etapas posteriores del proyecto.

De esta manera, la experiencia profesional permitió comprender de manera práctica la función del ingeniero geomático dentro de un proyecto multidisciplinario de infraestructura civil: establecer la referencia espacial, adquirir y evaluar información del territorio y transformarla en productos geoespaciales confiables que puedan ser utilizados por otros especialistas.

5.3. Continuidad del proyecto

La información obtenida durante los levantamientos constituye una base geoespacial para las etapas subsecuentes relacionadas con la rehabilitación de la infraestructura de los muelles de Janitzio, Tecuena, Yunuén y La Pacanda.

A partir de los modelos digitales, planos topográficos, ortomosaicos y productos batimétricos generados pueden desarrollarse análisis adicionales relacionados con las condiciones actuales de los sitios de intervención. Estos productos pueden integrarse con los estudios estructurales, hidráulicos, ambientales y geotécnicos necesarios para definir las soluciones específicas de rehabilitación o construcción.

La continuidad de los trabajos deberá mantener el mismo sistema de referencia utilizado durante los levantamientos y conservar la documentación correspondiente a estaciones, puntos de control, modelos geoidales, archivos de observación y productos procesados. Esto permitirá que nuevos levantamientos o modificaciones del proyecto puedan incorporarse sin introducir inconsistencias espaciales.

Cuando se realicen nuevas campañas de medición, los puntos materializados durante el proyecto podrán utilizarse como referencia siempre que previamente se verifique su estabilidad física. Asimismo, la repetición de levantamientos bajo un mismo marco geodésico permitiría evaluar cambios en la línea de costa, modificaciones de la infraestructura o variaciones en la geometría de las zonas lacustres.

En etapas posteriores también será conveniente complementar la información geomática con los resultados de otras disciplinas. En particular, la caracterización de los materiales del fondo, el espesor de sedimentos y las condiciones de cimentación deberá obtenerse mediante los estudios geotécnicos correspondientes, mientras que el dimensionamiento y análisis de las estructuras deberá desarrollarse dentro del proyecto de ingeniería civil.

La conservación organizada de los archivos originales y de los productos procesados permitirá además mantener la trazabilidad del trabajo realizado. Los registros GNSS, archivos de vuelo, imágenes, nubes de puntos, modelos digitales, observacio-

nes batimétricas, planos y memorias de procesamiento conforman conjuntamente el respaldo técnico del levantamiento y pueden servir como referencia durante las etapas posteriores del proyecto.

En síntesis, la experiencia profesional descrita en este reporte permitió participar en un flujo completo de trabajo geomático aplicado a infraestructura civil, desde el establecimiento del control geodésico y la adquisición de información en campo hasta el procesamiento, evaluación e integración de productos cartográficos tridimensionales. Los trabajos realizados permitieron aplicar conocimientos de geodesia, GNSS, topografía, LiDAR, fotogrametría, batimetría y sistemas de información geográfica dentro de condiciones reales de operación.

La experiencia también permitió reconocer la importancia del criterio profesional para resolver las dificultades que se presentan durante un proyecto de campo y la necesidad de documentar adecuadamente cada etapa para garantizar la trazabilidad de la información. Los productos generados proporcionan una base espacial para las actividades subsecuentes del proyecto de infraestructura y representan el resultado de la participación profesional desarrollada durante los trabajos realizados en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán.

Bibliografía

Acuña, R., editor (1987). *Relaciones geográficas del siglo XVI: Michoacán*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2024). *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. ASPRS, 2 edition. Version 2.0.

Chacón-Torres, A., Sauno-Contreras, F., Rosas-Monge, C., Trueba Regalado, R., Tzintzun-Pedraza, K. X., Martínez-Ramírez, L. J., and Jacobo-Escamilla, A. I. (2026). Lake patzcuaro, michoacan, mexico: The challenge for sustainable restoration. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 31(1).

Colomina, I. and Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92:79–97.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (s.f.). Región hidrológica prioritaria 62: Pátzcuaro y cuencas endorreicas cercanas.

Contreras Figueroa, P. (2025). Un paisaje lacustre cambiante: Urandén y el desecamiento del lago de pátzcuaro (1980–2022). *Relaciones Estudios de Historia y Sociedad*, 46(182):9–34.

DJI (2024). *Zenmuse L2: User Manual and Technical Specifications*. DJI Enterprise.

DJI (2025). *Matrice 350 RTK: User Manual*. DJI Enterprise.

DJI (2026a). *DJI Modify: User Manual*. DJI Enterprise.

DJI (2026b). *DJI Terra: User Manual and Technical Documentation*. DJI Enterprise.

Emlid (2026). Reach rs2+: Multi-band rtk gnss receiver. Technical specifications. Documentación técnica del fabricante.

Fondo Nacional de Fomento al Turismo (2026). Invierte fonatur 300 millones de pesos en infraestructura turística en michoacán. Comunicado institucional.

García Quintana, J. (2003). La relación de michoacán. In Ortega y Medina, J. A., Camelo, R., and Romero Galván, J. R., editors, *Historiografía mexicana. Volumen I. Historiografía novohispana de tradición indígena*, pages 169–184. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Históricas, México.

González-Sosa, E., Mastachi-Loza, C. A., Rivera-Vázquez, J. B., Gutiérrez-López, A., Lafragua, J., and Guevara-Escobar, A. (2010). La evaporación en la cuenca del lago de pátzcuaro, méxico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(3):51–69.

Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*. Springer, Vienna, 2 edition.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Norma técnica para el sistema geodésico nacional. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 2010.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023). *Guía Operativa de la Red Geodésica Vertical*. INEGI, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024). *Guía operativa de la Red Geodésica Horizontal 2024*. INEGI, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2025). *El Geoide Gravimétrico Mexicano 2025: Características del modelo nacional de alturas geoidales*. INEGI.

International Hydrographic Organization (2022). *IHO Standards for Hydrographic Surveys*. International Hydrographic Organization, Monaco, 6.1.0 edition.

International Organization for Standardization (2023). Iso 19157-1:2023 geographic information—data quality—part 1: General requirements. Technical report, International Organization for Standardization.

International Telecommunication Union (2021). *Recommendation ITU-R P.833-10: Attenuation in Vegetation*. ITU Radiocommunication Sector.

Leick, A., Rapoport, L., and Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons, 4 edition.

Li, Z., Zhu, Q., and Gold, C. (2005). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press.

PDAL Contributors (2026). *PDAL: Point Data Abstraction Library*. Biblioteca para procesamiento de datos de nubes de puntos.

QGIS Development Team (2026). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. Software libre y de código abierto.

Shan, J. and Toth, C. K., editors (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press, 2 edition.

Teunissen, P. J. G. and Montenbruck, O., editors (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Cham.

Wolf, P. R., DeWitt, B. A., and Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill Education, 4 edition.