

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS**

**INVESTIGACIÓN DEL USO DE LA TELEDETECCIÓN MEDIANTE
DATOS DE SENSORES REMOTOS, PARA LA UTILIZACIÓN DE
LOS RESULTADOS EN UN CASO PRÁCTICO DE SERVICIOS DE
CONSULTORÍA EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la
Comisión del Programa de Posgrado en Geografía para optar al grado y título
de Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y
Teledetección

SAÚL ROJAS DELGADO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica

2024

Dedicatoria

Agradecimientos

A Steven, Lucía y Andrés, por toda su colaboración, orientación y amabilidad, para hacer posible este camino.

A Wendy y Jorge por su tiempo y guía basada en toda su experiencia.

A los profesores del Posgrado involucrados, por su buena disposición.

Y a todas las personas que me escucharon, dieron ánimo y rezaron por mí.

Hoja de aprobación

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Comité de Gestión Interinstitucional del Programa (CI) de Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, de la Universidad de Costa Rica y la Universidad Nacional, como requisito para optar por el grado de Magíster en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

M.Sc. Luis Francisco Rodríguez Soto
Representante de la decanatura del Sistema de Estudios de Posgrado

Dr. Rafael Arce Mesén
Representante del director del Programa de Posgrado en Geografía
de la Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

M.Sc. Steven Oreamuno Herra
Tutor

M.Sc. Ana Lucía Garita Fernández
Asesora

M.Sc. Andrés Felipe Zamora Coto
Asesor

Saúl Rojas Delgado
Sustentante

Índice de contenidos

	Página
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Antecedentes.....	4
1.3.1. Primera área de estudio	4
1.3.2. Segunda área de estudio	8
1.4. Objetivos.....	11
1.4.1. Objetivo General	11
1.4.2. Objetivos Secundarios.....	11
Capítulo 2: Marco Teórico	12
2.1. Técnicas de medición y representación de la Tierra	12
2.1.1. LiDAR.....	12
2.2. Modelos digitales de elevaciones	14
2.3. Métodos de interpolación de un MDE.....	16
2.4. Imágenes y sensores térmicos.....	17
2.4.1. Sensores térmicos en RPAS	20
2.4.2. Sensores térmicos FLIR	20
2.5. Puentes vehiculares y sus partes principales	21
2.6. La consultoría en los servicios de ingeniería y arquitectura.....	22
Capítulo 3: Metodología.....	25
3.1. Materiales y equipos.....	25
3.2. Evaluación de la calidad de los datos disponibles	28
3.2.1. Sensor LiDAR.....	28
3.2.2. Cámara térmica M2ED.....	30
3.2.3. Cámara térmica Flir.....	32
3.3. Preparación y procesamiento de los datos	33
3.3.1. Sensor LiDAR.....	33
3.3.2. Cámara térmica M2ED.....	36
3.3.3. Cámara térmica Flir.....	40
3.4. Adaptación a cada caso práctico de servicios de consultoría en ingeniería y arquitectura.....	43
3.4.1. Primera área de estudio	43
3.4.2. Segunda área de estudio	43
Capítulo 4: Resultados.....	47
4.1. Primera área de estudio.....	47
4.1.1. Fase I, trámite de estudios básicos	51
4.1.2. Fases II y III, trámite de anteproyecto y diseño definitivo.....	62
4.2. Segunda área de estudio	63
4.2.1. Cámara térmica M2ED.....	63
4.2.2. Cámara térmica Flir.....	67
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones.....	100
5.1. Primera área de estudio.....	100
5.2. Segunda área de estudio	101
Referencias Bibliográficas.....	103

Índice de Figuras

	Página
Figura No. 1. 1 Ubicación administrativa del primer proyecto.....	5
Figura No. 1. 2 Total de obras, año 2022 en los cantones de San Ramón y San Carlos	6
Figura No. 1. 3 Clase de permiso de construcción tramitado en los cantones de San Ramón y San Carlos para el año 2022.....	6
Figura No. 1. 4 Distribución preliminar de tipos de obras en Costa Rica para el año 2023.	7
Figura No. 1. 5 Estadísticas preliminares del número de obras de construcción respecto al total en todo Costa Rica para el año 2023.....	7
Figura No. 1. 6 Ubicación administrativa del segundo proyecto	9
Figura No. 2. 1 Concepto de técnica LiDAR en un RPAS.....	13
Figura No. 2. 2 Comportamiento del infrarrojo en el espectro electromagnético.....	18
Figura No. 2. 3 Espectro electromagnético para el ser humano.....	19
Figura No. 2. 4 Algunos elementos de la subestructura y superestructura de un puente	22
Figura No. 3. 1 Ubicación del mojones y proyecto en la comunidad El Castillo	29
Figura No. 3. 2 Ubicación de planes de vuelos con sensor térmico realizados sobre el Puente Rafael Iglesias Castro.....	31
Figura No. 3. 3 Recorridos realizados para recolectar datos con la cámara térmica Flir.....	33
Figura No. 3. 4 Nube de puntos LAS sin procesar.....	34
Figura No. 3. 5 Clasificación manual de la nube puntos LAS	35
Figura No. 3. 6 Herramienta path profile para clasificación manual de puntos LAS	35
Figura No. 3. 7 Visualización de imágenes térmicas cargadas en Pix4D Mapper	37
Figura No. 3. 8 Visualización de tipo de procesamiento termal realizado en Pix4D Mapper.....	37
Figura No. 3. 9 Configuración de parámetros para los productos de salida en Pix4D Mapper	38
Figura No. 3. 10 Implementación de “tie points” en Pix4D Mapper	39
Figura No. 3. 11 Ejecución del flujo de trabajo para salida de la información en Pix4D Mapper....	39
Figura No. 3. 12 Ejemplo de salida del flujo de trabajo en Pix4D Mapper	40
Figura No. 3. 13 Visualización de imágenes en FLIR Thermal Studio.....	41
Figura No. 3. 14 Reporte térmico de FLIR Thermal Studio	42
Figura No. 3. 15 Detalle de tipos de daño y la evaluación del grado de daño según la inspección. .	44
Figura No. 3. 16 Detalle observaciones para los tipos de daño según la inspección.	45
Figura No. 3. 17 Detalle fotografías y esquemas para los tipos de daño según la inspección.	46
Figura No. 3. 18 Subdivisión por secciones establecidas para la inspección del puente	46
Figura No. 4. 1 Nube de puntos LAS clasificada.....	47
Figura No. 4. 2 MDE confeccionado	48
Figura No. 4. 3 Subcuencas y flujo acumulativo en el área de estudio.....	52
Figura No. 4. 4 Pendiente del terreno en grados	54
Figura No. 4. 5 Vulnerabilidad del acuífero Fortuna	56
Figura No. 4. 6 Características existentes en el área de estudio.....	58
Figura No. 4. 7 Zonas de vida y áreas silvestres protegidas en el área de proyecto	61
Figura No. 4. 8 Curvas de nivel del área de proyecto	63
Figura No. 4. 9 Mapa de reflectancia del vuelo No. 2	64
Figura No. 4. 10 Ortofoto y mapa de reflectancia del vuelo No. 1	65
Figura No. 4. 11 Ampliación de mapa de reflectancia del vuelo No. 2.....	66
Figura No. 4. 12 Reporte térmico de las juntas de expansión obstruidas en la sección No. 1	68
Figura No. 4. 13 Reporte térmico del descascaramiento de vigas en la sección No. 1	70
Figura No. 4. 14 Ampliación de daños en barandas de acero	71

Figura No. 4. 15 Reporte térmico de deformación de barandas en la sección No. 2	72
Figura No. 4. 16 Reporte térmico de grietas en una dirección de la losa en la sección No. 2	73
Figura No. 4. 17 Patrón térmico del asfalto en las grietas de una dirección	74
Figura No. 4. 18 Reporte térmico del acero expuesto en la sección No. 2	75
Figura No. 4. 19 Ampliación al reporte térmico del acero expuesto en la sección No. 2	76
Figura No. 4. 20 Reporte de grietas en dos direcciones en la losa de la sección No. 3	77
Figura No. 4. 21 Variación de temperaturas en viga diafragma de la sección No. 3.....	78
Figura No. 4. 22 Reporte de descascaramiento en la viga diafragma de la sección No. 3.....	79
Figura No. 4. 23 Reporte de descascaramiento en la viga diafragma de la sección No. 3.....	80
Figura No. 4. 24 Temperaturas debajo del tablero influenciadas por el ambiente	81
Figura No. 4. 25 Reporte de grietas en cuerpo de la pila inclinada de la sección No. 3	82
Figura No. 4. 26 Ampliación de delaminaciones en las barandas de la sección No. 8	83
Figura No. 4. 27 Reporte térmico delaminaciones en las barandas de la sección No. 8.....	84
Figura No. 4. 28 Ampliación de eflorescencias en vigas de la sección No. 8.....	85
Figura No. 4. 29 Reporte térmico de eflorescencias en vigas principales de la sección No. 8	86
Figura No. 4. 30 Reporte térmico de grietas en martillo (pila inclinada) de la sección No. 8	87
Figura No. 4. 31 Ampliación de grietas de una dirección en cuerpo principal (pila).....	88
Figura No. 4. 32 Reporte térmico de grietas en cuerpo principal (pila) de la sección No. 8	88
Figura No. 4. 33 Reporte térmico de filtraciones en juntas de expansión de la sección No. 9	90
Figura No. 4. 34 Detalle de estructuras con humedad producto de filtraciones en juntas de expansión de la sección No. 9.....	91
Figura No. 4. 35 Reporte térmico obstrucciones en juntas de expansión del a sección No. 9.....	92
Figura No. 4. 36 Reporte térmico grietas en viga principal de la sección No. 9.....	93
Figura No. 4. 37 Acumulación de grasa en viga principal de la sección No. 9.....	94
Figura No. 4. 38 Reporte térmico de filtraciones en apoyos de la sección No. 9	95
Figura No. 4. 39 Detalle ampliado de los apoyos en la sección No. 9.....	96
Figura No. 4. 40 Reporte térmico de grietas en cuerpo principal (pila) de la sección No. 9	97

Índice de Cuadros

	Página
Cuadro No. 2. 1 Tipos de inspección en puente de Costa Rica.....	23
Cuadro No. 3. 1 Parámetros técnicos DJI Matrice 300RTK	25
Cuadro No. 3. 2 Parámetros técnicos GS-LIVOX MID40	26
Cuadro No. 3. 3 Parámetros técnicos DJI Mavic 2 Enterprise Dual	26
Cuadro No. 3. 4 Parámetros técnicos Teledyne FLIR One Gen 3.....	27
Cuadro No. 3. 5 Parámetros técnicos de la computadora.....	28
Cuadro No. 3. 6. Coordenadas CRTM05 de los puntos de control (mojones) para levantamiento LiDAR.....	29
Cuadro No. 3. 7 Características obtenidas del vuelo térmico efectuado	31
Cuadro No. 3. 8 Características obtenidas del recorrido con la cámara térmica Flir	33
Cuadro No. 4. 1 Resumen de requisitos para obtener permiso de construcción para obra comercial en San Ramón	49
Cuadro No. 4. 2 Principales daños en juntas de expansión de la sección No. 1	67
Cuadro No. 4. 3 Principales daños en losa de la sección No. 1	69
Cuadro No. 4. 4 Principales daños en viga principal de concreto de la sección No. 1	69
Cuadro No. 4. 5 Principales daños en losa de la sección No. 1	70
Cuadro No. 4. 6 Principales daños en las barandas de la sección No. 2	71
Cuadro No. 4. 7 Principales daños en la losa de la sección No. 2.....	72
Cuadro No. 4. 8 Principales daños en el cuerpo de la pila de la sección No. 2.....	74
Cuadro No. 4. 9 Principales daños en la losa de la sección No. 3.....	76
Cuadro No. 4. 10 Principales daños en la viga diafragma de concreto de la sección No. 3	78
Cuadro No. 4. 11 Principales daños en la pila inclinada de la sección No. 3	79
Cuadro No. 4. 12 Principales daños en cuerpo de la pila inclinada de la sección No. 3.....	81
Cuadro No. 4. 13 Principales daños en baranda (acero) de la sección No. 8	82
Cuadro No. 4. 14 Principales daños en baranda (concreto) de la sección No. 8.....	83
Cuadro No. 4. 15 Principales daños en losa de la sección No. 8	84
Cuadro No. 4. 16 Principales daños en martillo (pila inclinada) de la sección No. 8.....	86
Cuadro No. 4. 17 Principales daños en cuerpo principal (pila inclinada) de la sección No. 8.....	87
Cuadro No. 4. 18 Principales daños en baranda (acero) de la sección No. 9.....	89
Cuadro No. 4. 19 Principales daños en juntas de expansión de la sección No. 9	89
Cuadro No. 4. 20 Principales daños en losa de la sección No. 9	92
Cuadro No. 4. 21 Principales daños en viga principal de concreto de la sección No. 9	93
Cuadro No. 4. 22 Principales daños en apoyos de la sección No. 9.....	94
Cuadro No. 4. 23 Principales daños en cuerpo principal (pila) de la sección No. 9	96
Cuadro No. 4. 24 Daños verificados con cámara térmica FLIR en el puente Rafael Iglesias Castro	98

Lista de abreviaturas

APC	Administrador de Proyectos de Construcción
App	Application
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
AYA	Acueductos y Alcantarillados
BIM	Building Information Modeling
CCC	Cámara Costarricense de la Construcción
CENIGA	Centro Nacional de Información Geoambiental
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica
CNE	Comisión Nacional de Emergencias
CNFL	Compañía Nacional de Fuerza y Luz
CONAVI	Consejo Nacional de Vialidad
ECW	Enhanced Compression Wavelet
EGM 96	Earth Gravitational Model 1996
EXIF	Exchangeable Image File Format
FAA	Federal Aviation Administration
FLIR	Forward Looking InfraRed
GAM	gran área metropolitana
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOD	Ground water occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater
GPS	Global Positioning System
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IDW	Distancia Inversa Ponderada
IGN	Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
Ins	Sistema Inercial de Navegación
INS	Instituto Nacional de Seguros
Iota	Internet Of Things
JPG	Joint Photographic Experts Group
LANAMME	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
LAS	LASer
LiDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MDT	Modelo Digital del Terreno
Megapixel	MP
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
MSX	Imagen Dinámica Multiespectral
PDF	Portable Document Format
RGB	Red, Green, Blue

RJPEG	JPG radiométrico
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
SENARA	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento
SETENA	Secretaría Técnica Nacional Ambiental
Shapefile	SHP
SIA	Significancia de impacto ambiental
SIG	Sistema de Información Geográfica
SKD	Software Development Kit
SNIT	Sistema Nacional de Información Territorial
TIFF	Tagged Image File Format
TIN	Triangulated Irregular Network
UCR	Universidad de Costa Rica
UTM	Universal Transverse Mercator
VANT	Vehículo aéreo no tripulado
WFS	Web Feature Server
WGS84	World Geodetic System 1984
WPAN	Wireless Personal Area Network

Resumen

El fin de este proyecto de graduación consistió en preparar datos de sensores remotos, para investigar el grado de uso en dos casos del sector construcción. Con el primero, se investigó la aplicabilidad de los datos LiDAR en la gestión de requisitos para conseguir el permiso de construcción de una edificación comercial. En el segundo caso, se utilizaron imágenes térmicas, para inspeccionar y determinar los daños de un puente vehicular.

Primera área de estudio

Los datos LiDAR se tomaron en setiembre de 2021, con un sensor GS-Livox MID40 instalado en un dron DJI Matrice 300 RTK. Con los datos se generó un modelo digital de elevaciones (MDE) en formato ráster, basado en la interpolación de tipo TIN (*Triangulated Irregular Network*), el muestreo de las celdas utilizó la metodología del vecino más cercano.

Se investigó los trámites institucionales necesarios para tener la aprobación del permiso de construcción, identificándose veinticinco diferentes requisitos, de los cuales once tienen lazo directo con insumos que se podrían derivar del MDE. Cada trámite se recreó en función de los requisitos y de las condiciones observadas en la propiedad, utilizando como base solo la información LIDAR. Según el análisis, es posible obtener el permiso de construcción.

Segunda área de estudio

Se tomaron datos térmicos del puente Rafael Iglesias Castro en dos fechas diferentes, primero, se voló el puente con un dron térmico DJI Mavic 2 Enterprise Dual, en diciembre de 2023, y segundo, se recorrió el puente con un sensor de mano Teledyne FLIR One Gen 3, en abril de 2024.

Se pretendió generar mapas térmicos del puente desde diferentes perspectivas, sin embargo, se presentó incompatibilidad entre los datos sin procesar y el software de procesamiento. En dos de las misiones, los datos no se procesaron por aspectos relacionados al plan de vuelo. En las restantes misiones, los valores de temperatura de los objetos no se asignaron al píxel del mapa resultante, únicamente se obtuvieron resultados de la banda RGB (*Red, Green, Blue*). Se consideró que, un segundo vuelo no resolvería el problema por completo, se optó por inspeccionar los daños del puente utilizando un sensor térmico portátil FLIR y un software combinable para generar un informe resultante en cada imagen de interés.

Con base en las inspecciones realizadas por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR) en junio de 2021 y los resultados de los reportes térmicos, se encontró correspondencia entre las transferencias de calor que experimentaron los materiales de las estructuras y la evaluación y tipo de daño catalogado en las inspecciones. La estimación de la temperatura superficial de cada daño estuvo condicionada por el contenido de vapor de agua de la atmósfera y la emisividad de la superficie estudiada.

Capítulo 1: Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El sector construcción es parte de una industria compuesta por un conglomerado de actividades, cuyo objetivo o producto radica en construir obras civiles. Existen obras habitacionales, urbanísticas, comerciales, industriales, institucionales entre otras. A su vez, la construcción se puede clasificar en ampliaciones, remodelaciones y construcción nueva. Por otra parte, la construcción se acuerpa mediante dos mecanismos de financiamiento, la obra pública cuando se promueve por una administración de gobierno en beneficio de la comunidad y la obra privada, en donde la inversión proviene del capital de particulares y bajo intereses no necesariamente abiertos al público.

En Costa Rica, diversos actores institucionales anualmente estudian y analizan el comportamiento del sector construcción, a efectos de obtener valores estadísticos que permitan generar perspectivas de crecimiento o disminución de este, el cual es un pilar de la activación económica y la generación de empleo en el país.

El panorama futuro del sector construcción constantemente se impulsa hacia un crecimiento sostenible, con el objetivo de alcanzar un desarrollo que combine la expansión económica y responsabilidad ambiental. Por ello, se fomenta la descarbonización, se plantean soluciones innovadoras y sostenibles que mejoren las obras y otorguen competitividad.

La Promotora de Comercio Exterior (PROCOMER, 2022) indica que parte del desafío futuro de los profesionales en arquitectura, ingeniería y construcción, se encuentra en la implementación de nuevas tecnologías que contribuyan a avanzar hacia la sostenibilidad, debido a que la digitalización ha sido más lenta que en otros sectores. Así se empiezan a implementar nuevas modalidades, como es el caso de la impresión 3D, el escaneo de obras civiles, el Iota (*Internet Of Things*, por sus siglas en inglés), el modelado BIM (*Building Information Modeling*, por sus siglas en inglés), la robótica o la realidad virtual. Por tanto, con la implementación de nuevas tecnologías, el objetivo se alcanza, por ejemplo, al levantar información con la máxima confortabilidad y el gasto mínimo de recursos.

La presente investigación se basa en dos casos prácticos a recrear en el contexto de la innovación, pertenecen al ámbito de acción del sector construcción y se encuentran en la provincia de Alajuela. El primero, consiste en simular la gestión de requisitos mediante insumos geoespaciales innovadores, a fin de verificar su nivel de aplicación y contribución para optar por un permiso de construcción de edificación comercial nueva, en el cantón de San Ramón. En el segundo caso, se investigan los daños de un puente vehicular que presenta un deterioro estructural significativo, utilizando técnicas innovadoras de percepción remota, con el fin de verificar los insumos que podrían generarse y su aporte para futuras remodelaciones. El puente está ubicado en la zona limítrofe de los distritos de El Rosario del cantón de Naranjo y Puente de Piedra del cantón de Grecia.

1.2. Justificación

Las investigaciones de (Briñeza & Penagos, 2021) señalan que, las empresas deben definir la forma en que se administran los recursos, no limitándose únicamente a producir riqueza y generar empleo. Por el contrario, comprometiéndose a potenciar y ayudar al florecimiento de la sociedad. Una empresa sostenible es aquella que crea valor económico, medioambiental y social a corto y largo plazo, contribuyendo al aumento del bienestar y progreso. Según estos autores, es necesario conocer métodos y técnicas que se están implementando en otros ámbitos para identificar la aplicabilidad de la sostenibilidad en las empresas del sector construcción.

Según (Moreno, 2012) la competitividad se obtiene con la búsqueda del desarrollo sustentable; ésta se concibe como un medio que posibilita niveles más elevados de bienestar. La competitividad se considera un eje en las transformaciones de las organizaciones, siendo la base de los nuevos modelos de comercio. La introducción de la tecnología en todo aparato productivo propicia cambios sustanciales en los métodos de producción generando competitividad. Esto, naturalmente constituye una enorme desventaja para las economías subdesarrolladas como la de Costa Rica, donde la competitividad se basa en el bajo costo de la fuerza de trabajo y en la abundancia de materias primas.

La actuación del gobierno y de los directivos de las empresas juega un rol prioritario en el fomento de la competitividad. El primero, generando las condiciones que favorezcan la competencia entre empresas, que minimicen los riesgos económicos en marcos estables para la aplicación de políticas económicas; y los segundos, dirigiendo a las empresas de manera innovadora, rentable y responsable (Moreno, 2012).

De acuerdo con la Cámara Costarricense de la Construcción (CCC), la importancia del sector construcción en la economía costarricense se refleja en el aporte que da al crecimiento de la producción nacional y la generación de empleo de manera directa e indirecta en los sectores productivos proveedores de dicha actividad. Así, esta industria toma un papel principal en los procesos de crecimiento y de desarrollo nacional. (CCC, 2022).

Según informes de la CCC acerca del desarrollo económico del sector construcción, particularmente del sector privado, la construcción de obras nuevas depende del comportamiento de los precios de los insumos utilizados, de las tasas de interés, así como del acceso al crédito. A su vez, en la infraestructura pública, la construcción de obras nuevas depende tanto del nivel de ingresos del Estado, como de la decisión de invertir en nuevas obras, es decir, el sector construcción afecta la economía y es afectado por ella, independientemente de estar en el ámbito privado o público (CCC, 2022).

La Ley Orgánica del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA), Ley No. 3663 de 10 de enero de 1966, define sus fines primordiales en el artículo

No. 4, de lo cual, es importante tener en consideración lo acotado en su inciso b), donde se indica que será un fin primordial velar por el decoro de las profesiones, reglamentar su ejercicio y vigilar el cumplimiento de lo dispuesto en esta ley, su reglamento y reglamentos especiales del Colegio Federado, así como lo dispuesto en las leyes y reglamentos relativos a los campos de aplicación de las profesiones que lo integran. Así las cosas, los servicios de consultoría en ingeniería y arquitectura estarán normados por dicho organismo el cual es de carácter público (CFIA, 2015).

La Asamblea de Representantes del CFIA, mediante acuerdo No. 03 de la sesión extraordinaria No. 02-18/19-AER del 26 de marzo de 2019, acordó aprobar el nuevo Reglamento para la Contratación de Servicios de Consultoría en Ingeniería y Arquitectura de Costa Rica (CFIA, 2019).

En el artículo No. 6 del Reglamento citado previamente, se aclara que las actividades de consultoría abarcan todo el quehacer profesional en las distintas ramas de la ingeniería y la arquitectura, por lo que la clasificación de los servicios profesionales únicamente se debe considerar como una guía, sin que se pretenda, con ello, describir el total de los servicios que de las distintas disciplinas puedan derivarse en un determinado momento.

Retomando el rol de los sectores público y privado en los proyectos constructivos, se considera que los sensores remotos son una herramienta tecnológica que puede desempeñar un papel más preponderante en la competitividad e innovación del sector construcción de Costa Rica; la metodología de adquisición de datos de la superficie terrestre y el procesamiento e interpretación de los insumos, puede aplicarse de tal forma que mejore las condiciones normales, desde un punto de vista de tiempo y costo, en comparación con las metodologías más tradicionales.

En este estudio se utiliza la teledetección desde la perspectiva de recopilación de datos, para investigar el contexto de aplicación en los servicios de consultoría en construcción, en particular, el campo del diseño en la arquitectura y la inspección de obra en ingeniería.

Es importante considerar que la teledetección consiste en un conjunto de procesos relacionados con la detección y monitoreo de las características físicas de un área determinada, típicamente midiendo sus propiedades de radiación emitida y reflejada a larga distancia, generalmente desde un satélite o un avión. Sin embargo, en esta investigación los datos remotos se recopilaron y utilizaron para un área y distancia menor a la relacionada con esta metodología, debido a que en la adquisición de la información se utilizó un sensor activo instalado en un dron y un sensor pasivo portátil.

El beneficio de los sensores remotos pasivos, entre ellos, los sensores térmicos, se justifica en el principio de radiación reflejada y emitida por los distintos componentes de la superficie de un objeto, y cómo las características particulares de cada material permiten extraer y traducir rasgos o elementos. Se pueden citar otros campos de acción fuera del objeto

de estudio de la presente investigación donde se observan utilidades, por ejemplo, en los estudios preliminares de una obra, para poder detectar el estado de una infraestructura que a simple vista no se observa. Por otro lado, la periodicidad en el registro de la información que facilita esta técnica, puede contribuir en la fase de organización y dirección de ejecución de un proyecto u obra, y en la fase que contempla los servicios de operación y gestión del mantenimiento de los proyectos y obras ya concluidas, debido a que, cronológicamente se puede alimentar con datos la evolución o condición de las estructuras.

La técnica LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*, por sus siglas en inglés) representa un método de captura de información por sensores remotos activos que goza también de diversas aplicaciones muy beneficiosas y que no forman parte del estudio de la presente investigación. Siendo una técnica que produce un barrido tridimensional del área de estudio con gran exactitud y precisión, además, puede trabajarse a escalas pequeñas y obtener productos como las nubes de puntos, lo cual permite trazar una correlación interdisciplinar a aplicar en cualquier estudio geoespacial.

Otro factor beneficioso a investigar en los sensores remotos, es la generación de imágenes de bandas espectrales, ya que, con este tipo de fuentes es posible extraer información inaccesible al ojo humano, a causa de la lejanía, la corta visual, los obstáculos, entre otros. Para así generar diagnósticos o monitorear condiciones particulares de algún elemento. Siendo importante para este caso, contar con un instrumento que produzca resultados a una escala óptima para la dimensión del proyecto y así generar resultados lo suficientemente fiables para tomarse como insumo base en la generación de información, pero que también pueda incluirse en trámites oficiales ante instituciones públicas.

1.3. Antecedentes

El desarrollo de la investigación, se ha enfocado en dos ubicaciones diferentes del territorio costarricense, por tal motivo, para detallar el estado actual, se enumeran las siguientes subdivisiones:

1.3.1. Primera área de estudio

Corresponde con un terreno localizado en la región socioeconómica Huetar Norte. Ubicado en la zona limítrofe de los distritos de La Fortuna del cantón de San Carlos y Peñas Blancas del cantón de San Ramón.

El terreno administrativamente, está localizado en el distrito de Peñas Blancas, no obstante, la ruta que da acceso al lugar y las actividades relativas del sitio, están mayormente involucradas al distrito de La Fortuna, según se detalla seguidamente:

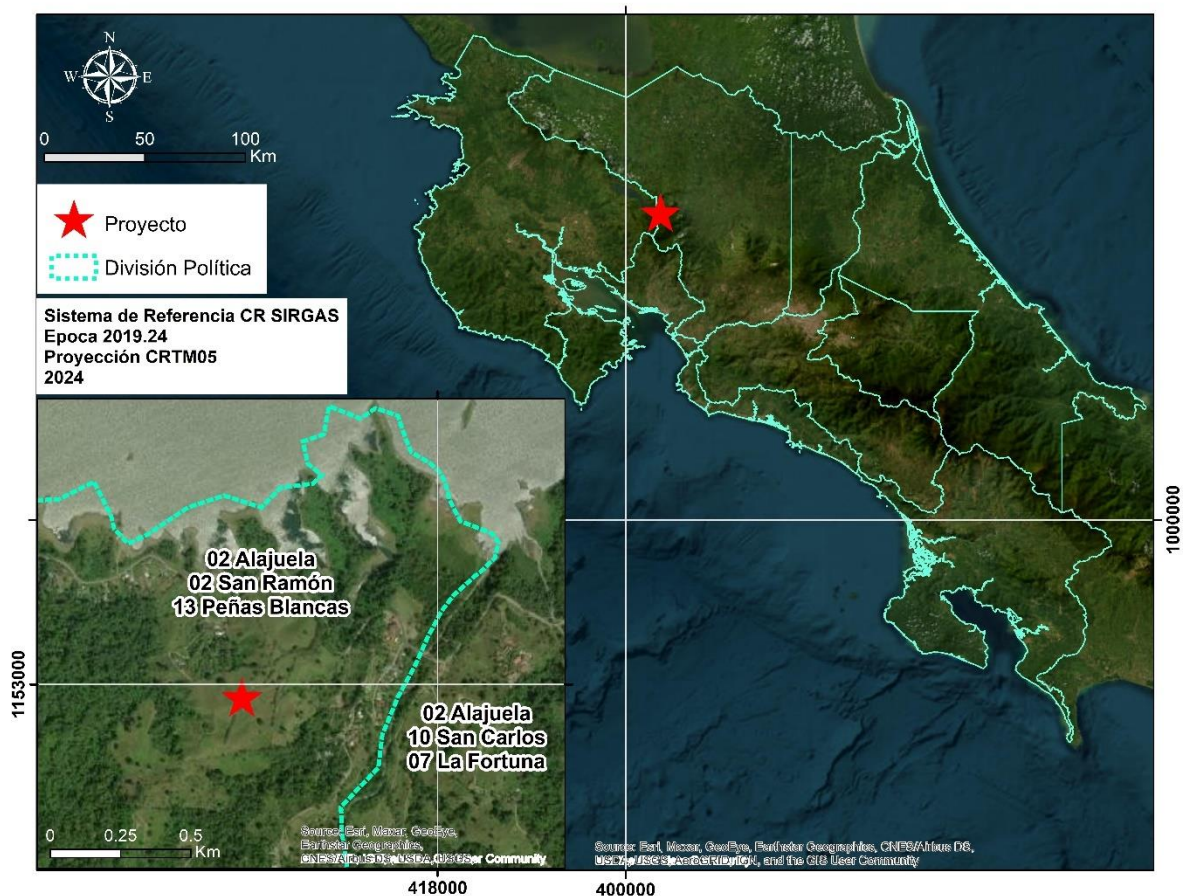


Figura No. 1. 1 Ubicación administrativa del primer proyecto
Fuente: Elaboración propia

El Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), anualmente genera estadísticas del comportamiento del sector construcción en cada uno de los cantones de Costa Rica. Específicamente para el registro de esas estadísticas, se utiliza como fuente el permiso de construcción extendido por las municipalidades, una vez que este ha sido aprobado y los derechos de ley han sido cancelados. Sin embargo, no significa que todas las obras hayan sido ejecutadas o realizadas en su totalidad (INEC, 2024).

Los cantones de San Ramón y San Carlos, cuentan con las siguientes estadísticas en cuanto a número de obras y clase de permiso de construcción aprobados para el año 2022.

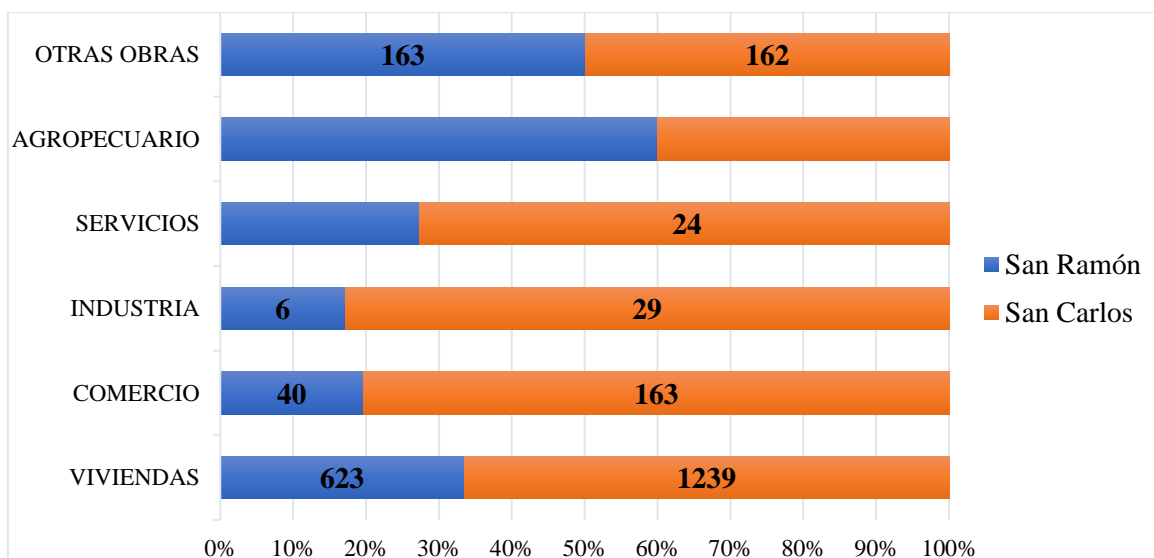


Figura No. 1. 2 Total de obras, año 2022 en los cantones de San Ramón y San Carlos
Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (INEC, 2023)

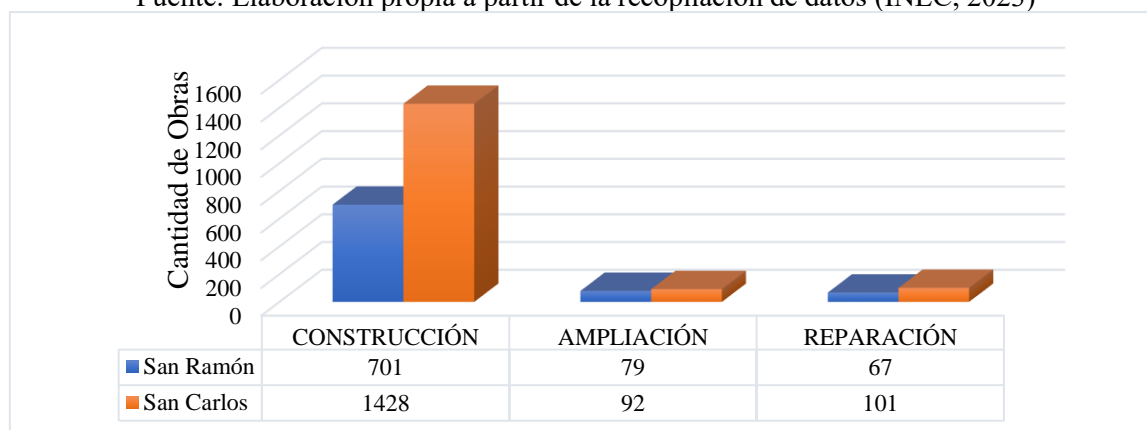


Figura No. 1. 3 Clase de permiso de construcción tramitado en los cantones de San Ramón y San Carlos para el año 2022

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (INEC, 2023)

En las figuras anteriores, se observa que en ambos cantones predominan las construcciones destinadas a la vivienda, obteniéndose un 76 % equivalente a 1239 viviendas en San Carlos y 73 % en San Ramón, correspondiente a 623 viviendas. El segundo lugar en ambos cantones es ocupado por construcciones de tapias, infraestructura y otros destinos, los cuales se agrupan en “Otras Obras”. Por otro lado, en la Figura No. 1. 3 se obtiene que, para ambos cantones, predomina la construcción nueva como permiso de construcción más tramitado.

Para el 2023 no se cuenta con los resultados absolutos publicados, debido a que estos se informan durante el último semestre del siguiente año. No obstante, las cifras preliminares divulgadas señalan que, en Costa Rica el número de obras fue de 33 956, de las cuales 22 199 forman parte de edificios residenciales, 4 093 no residenciales y 7 664 otras obras, para los cantones en análisis se desglosa según se detalla en la Figura No. 1. 4.

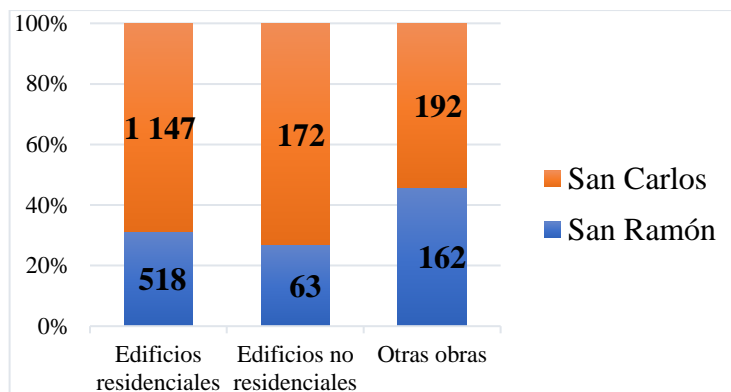


Figura No. 1. 4 Distribución preliminar de tipos de obras en Costa Rica para el año 2023.

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (INEC, 2024)

En San Ramón, el número preliminar de obras de construcción para el periodo 2023 fue de 743, mientras que, en San Carlos se alcanzaron 1 511. Al compararse con las estadísticas de 2022, ambos cantones disminuyeron levemente el número de obras, reduciéndose 104 construcciones en San Ramón y 110 en San Carlos. La provincia de Alajuela con 7 474 obras representa el 17 % del total de Costa Rica, asimismo, San Carlos es el cantón con más obras y San Ramón el cuarto lugar de la provincia de Alajuela, según se detalla en la Figura No. 1. 5.

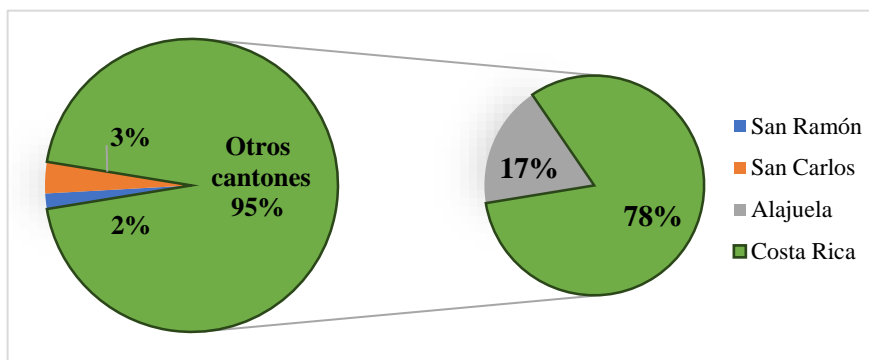


Figura No. 1. 5 Estadísticas preliminares del número de obras de construcción respecto al total en todo Costa Rica para el año 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (INEC, 2024)

1.3.1.1. Estudios LiDAR relacionados al tema de investigación

La técnica LiDAR se ha diversificado en un gran número de aplicaciones a partir de los avances tecnológicos en drones, los cuales han tenido un continuo desarrollo desde 2006 cuando la FAA (*Federal Aviation Administration*, por sus siglas en inglés) emitió los primeros permisos comerciales de drones y en el 2010, cuando se creó el Parrot AR Dron, el primer dron controlado por un teléfono inteligente conectado a través de Wi-Fi. Progresivamente se han obtenido mejoras a estos equipos, entre ellas, aumentar la capacidad de la carga útil, ampliar la duración de las baterías o incorporar sensores específicos como el LiDAR (IBM, 2022).

Según (IBM, 2022) la gama de usos del LiDAR es amplia; en el área de agricultura, para estimar la biomasa de los cultivos, y para detectar las propiedades del suelo mediante el mapeo de variaciones en profundidad, pendiente o humedad. En el área automotriz, formando parte de los sistemas de asistencia al conductor en vehículos autónomos. En el área de energía, para la evaluación de recursos eólicos, exploración en el sector del petróleo y gas o la gestión de la vegetación para el mantenimiento de las líneas eléctricas. En entretenimiento, se aplica para crear mapas de entornos en aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada. En el área de la fabricación, se implementa en la creación de modelos 3D de objetos para su uso en la industria manufacturera, así como para control de calidad. En las áreas de cartografía y topografía, se aprovecha para crear modelos digitales de elevación y elaborar mapas de carreteras, puentes y otros elementos geográficos y de infraestructura. Y finalmente en el área de construcción, se utiliza para inspeccionar con rapidez y precisión obras, calcular el volumen de los materiales a utilizarse, así como realizar inspecciones de seguridad y detectar posibles peligros.

Los proyectos de construcción por lo general son grandes y complejos, para poder diseñarse y ejecutarse requieren planificaciones considerando costos, normativas gubernamentales, peligros ambientales, informes técnicos, mapas, entre otros. En ese sentido, la tecnología LiDAR aporta insumos para producir modelos en 3D del área, que contribuyen a simular y poner a prueba anteproyectos de la obra definitiva (ACI USA Inc, 2024).

Es importante mencionar que, muchas estructuras necesitan monitoreo permanente de manera preventiva para detectar posibles fallas estructurales, con el fin de alertar a tiempo sobre la necesidad de trabajos de reparación. La tecnología LiDAR es fundamental para monitorear estructuras inaccesibles a las personas (ACI USA Inc, 2024).

Además del monitoreo, la seguridad tiene un impacto en el proceso de construcción, por ejemplo, los modelos 3D se pueden utilizar para predecir el alcance de inundaciones y desarrollar estrategias para mitigar las consecuencias relacionadas a la lluvia o eventos hidrometeorológicos (ACI USA Inc, 2024).

1.3.2. Segunda área de estudio

Corresponde con un puente vehicular localizado al oeste de la Gran Área Metropolitana (GAM), ubicado en la zona limítrofe de los distritos de El Rosario del cantón de Naranjo y Puente de Piedra del cantón de Grecia (Figura No. 1. 6). Este puente cruza sobre el cañón del Río Colorado, el cual tiene una profundidad aproximada de 100 m.

El puente se ubica en la Ruta Nacional No. 1, en el kilómetro 34+380. Se inauguró en 1972, con el nombre de Puente Rafael Iglesias Castro, en honor al expresidente 16° de la República de Costa Rica. La longitud total del puente es de 204 metros (m) siendo el tramo suspendido del puente el más largo, midiendo 124 m entre los cabezales de las pilas inclinadas (Vargas Alas, 2017).



Figura No. 1. 6 Ubicación administrativa del segundo proyecto

Fuente: Elaboración propia

1.3.2.1. Los puentes Çanakkale 1915 y Rafael Iglesias Castro

El Puente de Çanakkale 1915 es un puente colgante situado al sur de las ciudades de Lapseki y Galípoli, en Turquía; el puente atraviesa el estrecho de Los Dardanelos, que comunica al Mar Egeo con el Mar de Mármara y a su vez con el Mar Negro. La luz principal del puente es de 2 023 m, este se conforma por 3 vanos, siendo su material predominante el acero; el largo total es de 4 610 m, su ancho es de 45 m y el gálibo (altura máxima sobre el nivel del curso de agua) es de 69 m. Con su inauguración el 18 de marzo de 2022, se convirtió en el puente colgante más largo del mundo, (CNN Travel, 2022).

Como parte del proceso de auscultación que es requerido para una estructura de tales dimensiones, el consorcio encargado del control y mantenimiento, instauró un sistema de detección automática de incidentes basado en cámaras térmicas que ofreciera resultados de detección fiables a los operarios en todas las condiciones climáticas.

Cómo las cámaras térmicas miden la emisión calórica de los cuerpos y no se ven afectadas por la niebla, el mal tiempo o el resplandor del sol, se utilizan para detectar condiciones del tráfico. Para ello, se utiliza un sistema de detección automática de incidentes que consta de

98 cámaras Flir modelo ITS-632 Dual AID, colocadas cada 96 m en ambos sentidos de circulación. Este tipo de sensor es capaz de detectar incidentes como colisiones, vehículos detenidos, conductores y peatones en sentido contrario, incendios, datos de tráfico, entre otros, todos ellos bajo condiciones climáticas y de iluminación difíciles. (FLIR Teledyne, 2022).

Adicional a las cámaras que registran incidentes, se instalaron 8 cámaras de la serie Flir Elara DX, las cuales son multiespectrales, permiten efectuar movimientos horizontales, verticales o acercamientos según la necesidad. Tienen el propósito de monitorear la estructura del puente. Con estas cámaras se supervisa zonas más extensas, sin tener afectaciones por oscuridad, destellos o mal tiempo. Su objetivo consta de estar generando imágenes de la infraestructura bajo condiciones críticas y de forma remota (FLIR Teledyne, 2022).

De acuerdo a las investigaciones de (Vargas Alas, 2017), el gobierno de Costa Rica afronta retos relacionados con el mantenimiento del puente Rafael Iglesias Castro, como la limpieza, la reparación de elementos de servicio como juntas de expansión, barreras vehiculares y la reparación de algunos deterioros que la estructura presenta. El autor indicó que el reto consiste en buscar los métodos de accesos más adecuados y seguros para que el personal que brinda el mantenimiento periódico pueda hacer inspecciones detalladas y análisis estructurales exhaustivos del puente de forma segura y productiva.

Además (Vargas Alas, 2017) indicó que “...las cargas vehiculares y el peso propio de la estructura se transmiten verticalmente, generando tensión en los cables de la banda tensada y compresión en el tablero del tramo central, lo cual genera compresión en las pilas inclinadas y tensión en los cables que van hacia los bloques de anclaje. En los tramos de 25 m y 15 m las cargas se transmiten verticalmente desde el tablero, distribuyéndose en las vigas apoyadas en las pilas verticales y los bastiones. En las cimentaciones se observó que el puente actúa como un arco, transmitiendo fuerzas de compresión por las pilas inclinadas hacia el suelo y a través de las vigas superiores que soportan la superficie de ruedo. La banda tensada transmite las fuerzas de compresión que provienen de los marcos centrales hacia las pilas inclinadas por medio de fuerzas de tensión.” (p. 7). La descripción anterior permite entender cómo la estructura se comporta ante las cargas vehiculares y gravitacionales, y evidenciar la necesidad de monitorear constantemente los elementos ante posibles aumentos de los deterioros.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Investigar el uso de la teledetección en los servicios de consultoría en ingeniería y arquitectura en Costa Rica, mediante la combinación de datos de sensores remotos, para la utilización de los resultados en un caso práctico de aplicación.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar datos LiDAR e imágenes aéreas de un sector de la comunidad El Castillo, localizada entre La Fortuna de San Carlos y Peñas Blancas de San Ramón, mediante el recibimiento de datos digitales, para una modelización del lugar con adecuada resolución espacial.
- Verificar la aplicabilidad de datos LiDAR a partir de la creación de un modelo digital de elevaciones, de manera que los insumos obtenidos permitan el ejercicio de un caso práctico de atención de servicios de consultoría.
- Recopilar datos de imágenes térmicas de un puente localizado en una ruta nacional de Costa Rica, mediante la ejecución de un vuelo de RPAS con sensor térmico, para la generación de insumos termográficos de la estructura.
- Comprender la utilidad de las bandas multiespectrales, a partir de la obtención de imágenes aéreas de RPAS, de manera que los insumos obtenidos permitan el ejercicio de un caso práctico de atención de servicios de consultoría.
- Generar un proceso de retroalimentación del quehacer profesional y el uso de la teledetección en los servicios de consultoría en ingeniería y arquitectura, por medio de los resultados que se obtengan de la percepción remota del terreno, objetos y métodos utilizados.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Técnicas de medición y representación de la Tierra

La topografía es la disciplina encargada del estudio de mediciones y representación de la superficie de la Tierra delimitada en una extensión menor que la geodesia, donde la inclusión de las variaciones temporales por medio de mediciones de distancia, tiempo y gravedad en el entendimiento de los cambios de la Tierra no están sustancialmente involucradas.

Particularmente la topografía al no abarcar el estudio respecto a la dinámica en el tiempo, facilita medir y representar la superficie de la Tierra con un enfoque distinto. Hoy en día, esta técnica contempla, al igual que la geodesia, precisión y exactitud en sus deducciones, para ello se requiere una obtención y procesamiento de datos, el análisis de resultados y la representación gráfica de información dimensional de la superficie terrestre y su entorno.

La topografía realiza una representación de la realidad determinando la proyección espacial de cada elemento horizontal y verticalmente, debido a que la superficie terrestre no es plana. El método que se ocupa de la parte horizontal se le conoce como planimetría y al que involucra las alturas o profundidades como altimetría (IAGS, 1970).

En la actualidad, técnicas como LiDAR, GPS (*Global Positioning System*, por sus siglas en inglés) y su versión ampliada GNSS (*Global Navigation Satellite System*, por sus siglas en inglés), fotogrametría entre otros, son empleadas por otras disciplinas para trabajos en los que se requiere topografía para fines científicos o investigativos, donde los atributos de un objeto tales como la posición espacial o elevación de referencia son de utilidad para modelar fenómenos, realizar estimaciones e interpretar eventos.

LiDAR se usa a menudo para la delineación automatizada de hábitats, a pesar de la incertidumbre vertical que se ha encontrado en los datos recopilados con los sistemas aéreos topográficos al utilizar esta técnica, por ejemplo, en zonas de vegetación densa o pendientes pronunciadas. La necesidad de mapear áreas con mayor facilidad, ha producido el desafío de buscar métodos estandarizados que sean eficientes y repetibles. La importancia de los análisis de incertidumbre mediante pruebas estadísticas, iteraciones o el refinamiento manual se utilizan cada vez más como soluciones para la extracción automatizada de información en ambientes dependientes de la elevación (Enwright, 2017).

2.1.1. LiDAR

El sistema LiDAR es una técnica que combina tecnología óptica de teledetección remota para medir propiedades de luz reflejada o esparcida hacia atrás por un blanco remoto, con el fin de estimar la distancia, velocidad y otras propiedades del blanco. El sistema LiDAR más utilizado es el que determina la distancia de un objeto mediante la medición del retardo de los pulsos láser. Al ser un sistema RADAR, que usa ondas de radiofrecuencia en lugar de

radiación a frecuencias ópticas, la distancia del objeto se determina midiendo el retardo entre la transmisión de un pulso y la detección de la señal (Fuentes, et al., 2014).

Según Chance (2000), con el pulso láser empleado se mide la distancia inclinada del punto reflejado y el ángulo del rayo localizado en un sistema de coordenadas. De cada rayo se obtiene tiempo, distancia láser, error del dato y la intensidad además de las coordenadas del origen de cada pulso, los datos del Sistema Inercial de Navegación (INS, por sus siglas en inglés) y las coordenadas del sistema satelital.

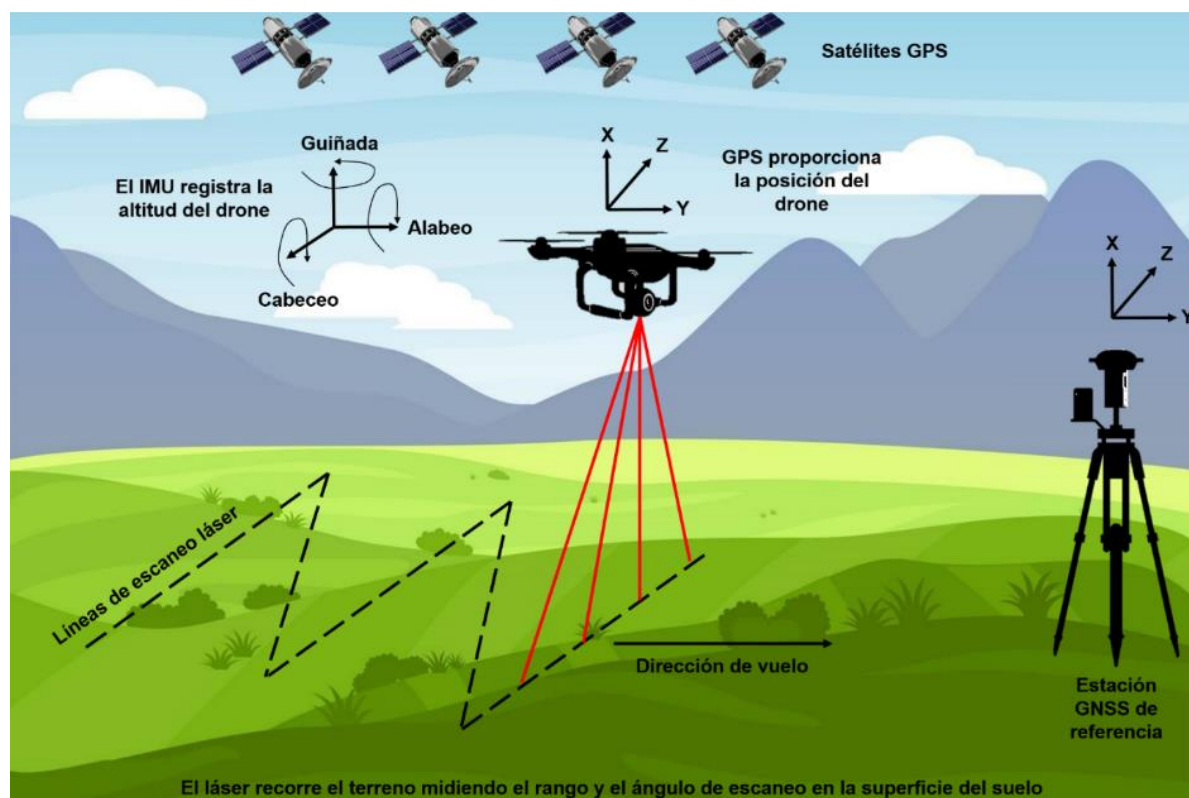


Figura No. 2. 1 Concepto de técnica LiDAR en un RPAS

Fuente: (Chance, 2000)

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI, 2015), LiDAR integra las tecnologías del GNSS, unidad de medición inercial y sensores láser, para coleccionar datos de altitud. Estos datos sirven para definir superficies del terreno y generar modelos digitales de elevación, para lo cual se eliminan los retornos que presentan anomalías altimétricas (puntos altos y bajos) posteriormente los puntos obtenidos se comparan con puntos de control terrestre con el objeto de verificar la información y poder reducir errores sistemáticos en altura. Posteriormente, se aplica un proceso de ajuste entre líneas que permite reducir otros errores a fin de procurar la redundancia en áreas de sobreposición.

Los pulsos láser emitidos se reflejan desde objetos sobre y por encima de la superficie del suelo: vegetación, edificios, puentes y así sucesivamente, exceptuando al agua que no genera retornos. Un pulso láser emitido puede regresar al sensor como uno o muchos

retornos. Cualquier pulso láser emitido que encuentre varias superficies de reflejo a medida que viaja hacia el suelo se divide en tantas devoluciones como superficies reflectoras existen. El primer pulso láser devuelto es el más importante y se asociará con la entidad más grande en el panorama como una copa de árbol o la parte superior de un edificio, comúnmente se trabaja con los primeros y últimos retornos. La primera devolución también puede representar el suelo, en cuyo caso el sistema sólo detectará un regreso. Varias devoluciones pueden detectar las elevaciones de varios objetos dentro de la huella láser de un pulso láser saliente. Las devoluciones intermedias, en general, se utilizan para la estructura de la vegetación, y la última devolución para los modelos de terreno de suelo desnudo, (INEGI, 2015).

Las investigaciones de Rodríguez (2008) muestran que LiDAR es un sistema basado en la tecnología láser de dos frecuencias (azul-verde e infrarrojo), que traza un patrón de arco a través del rumbo de vuelo de la plataforma aerotransportada, graba las señales de llegada de las reflejadas por la superficie del terreno, la diferencia del tiempo medido entre los dos pulsos de luz reflejados es convertida en distancia.

Para la aplicación de la técnica, es necesario la combinación de mediciones GNSS, sistemas inerciales, láser y cámaras digitales, todo instalado en una plataforma de un helicóptero o avión debidamente configurado y con apoyo terrestre de receptores GNSS, y ubicados sobre estaciones con coordenadas conocidas en tierra, ya que desde estas es posible obtener coordenadas y elevación de todos los puntos observados desde el sistema aerotransportado (Rodríguez, 2008).

Los componentes de hardware principales de un sistema LiDAR independientemente del ámbito de ocupación incluyen un vehículo de recolección: vehículo aéreo no tripulado (VANT), avión, helicóptero, sistema de escáner láser, GPS e INS el cual mide la rotación, inclinación y cabeceo del sistema.

2.2. Modelos digitales de elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es una representación numérica y discreta de una superficie continua, que generalmente hace referencia a la superficie de la tierra. Se ha convertido en una fuente de información de primera mano para el estudio del ambiente, ya que es el equivalente moderno de la cartografía tradicional de elevaciones simbolizadas mediante curvas de nivel.

En cuanto a la construcción de un MDE, los trabajos de campo establecidos con las técnicas de medición y representación de la Tierra como las mencionadas anteriormente, permiten obtener datos bastante precisos, además facilitan adaptar el muestreo a las condiciones y las irregularidades del terreno. El principal inconveniente es el elevado costo económico de recolección de información que ofrecen en la actualidad. El método de generación de MDE más habitual y económico es la digitalización de curvas de nivel, sin embargo, según (Olaya, 2014) pueden existir diversas fuentes:

- a) Métodos directos mediante sensores remotos:
 - Altimetría: altímetros transportados por aviones o satélites que permiten determinar las diferencias de altitud entre la superficie terrestre y el vehículo que transporta el altímetro.
 - Radargrametría o interferometría de imágenes radar.
- b) Métodos directos sobre el terreno:
 - Con equipos de topografía convencional.
 - Con receptores de sistemas de posicionamiento GNSS.
- c) Métodos indirectos:
 - Restitución fotogramétrica a partir de fuentes analógicas (fotografía aérea) o digitales (imágenes de satélite).
 - Digitalización de curvas de nivel de un mapa.

El término MDE comúnmente se ha confundido con el de Modelo Digital del Terreno (MDT) debido a discrepancias asociadas a conceptos del lenguaje español y su empleo como sinónimos (Olaya, 2014).

Un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, mientras que un MDE es un caso particular dentro de los MDT en el cual la variable detallada es la elevación (Olaya, 2014). Según este mismo autor, el concepto de MDT es más genérico y no guarda relación con el relieve, ya que puede recoger variables como la temperatura o la humedad en un punto dado, obteniendo un Modelo Digital de Temperaturas para este caso. El MDT no es sino una capa con información continua que contiene la relativa a elevaciones, aunque pudiendo recoger cualquier otra variable con esas características (Olaya, 2014).

Los MDE son representaciones matemáticas de la topografía basada en muestreos de coordenadas este, norte y elevación de la superficie del suelo en intervalos de cuadrícula regular. Estos conjuntos de datos se pueden usar para producir mapas topográficos o detallados modelos matemáticos de la superficie del suelo (Dzurisin, 2007).

Los MDE generalmente se asocian por definición como entidades ráster e incluso algunos autores así lo reflejan explícitamente, sin embargo, no necesariamente pertenecen a dicho formato. Las redes de triángulos irregulares (TIN, por sus siglas en inglés) son una buena forma de modelar el relieve, no obstante, la implementación de algoritmos de análisis basados en TIN resultan complejos, por ello, son menos frecuentes al igual que la práctica del análisis de un MDE en formato TIN (Olaya, 2014).

El formato más adecuado, tanto por sus características como por la facilidad con la que permite la implementación de algoritmos, es el formato ráster, de ahí la relación de varios autores entre los MDE y este formato (Olaya, 2014).

Un MDE permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. En los MDE existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos (INEGI, 2014).

En los MDE la interpolación se usa para predecir la elevación de las unidades en las que se encuentra subdividido el espacio, en el caso de la estructura vectorial se define por la ecuación de un plano que pasa a través de tres puntos no colineales en el espacio, y en el caso de los ráster se calcula la elevación del centro geométrico de las celdas en que se divide el espacio geográfico. Esta división al encontrarse regularmente distanciada no quiere decir que los valores de la elevación en la superficie real sean igualmente homogéneos (Bosque, 1992).

2.3. Métodos de interpolación de un MDE

Según Bosque (1992), la interpolación es definida como un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral con valor estimado), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales).

De acuerdo con Velásquez, Marín y Ordoñez (2013) se debe cumplir una serie de condiciones para que el valor estimado de la interpolación sea fiable: se debe crear una superficie continua a partir de datos distribuidos discretamente en el espacio, debe tener propiedades matemáticas y debe ajustarse a los datos con un nivel de precisión determinado.

La confiabilidad de la predicción con cualquier algoritmo de interpolación está fuertemente relacionada con la calidad de los datos de la muestra inicial, una mala distribución de los mismos o una intermediación por falta de ellos, hacen que el resultado se aparte de la geometría que realmente tiene la zona representada mediante el MDE (Velasquez, Marin, & Ordonez, 2013).

La interpolación tiene como objetivo estimar a partir de una muestra, valores de elevación para un conjunto de puntos (este, norte). Además, la interpolación puede utilizarse para: estimar valores de elevación para ubicaciones particulares (este, norte); estimar valores de elevación para una cuadrícula rectangular o cambiar la resolución de la cuadrícula en un archivo ráster (método conocido como remuestreo) (Fallas, 2007).

Según (Burrough, 1986) los métodos de interpolación se clasifican en dos grandes categorías:

- Los que asumen una superficie discreta.
- Los que asumen una superficie continua.

La técnica de superficie discreta es utilizada en el área de procesamiento digital de imágenes o en el análisis de conjuntos de datos multivariados y se fundamenta en la condición

de que existen unidades homogéneas en el conjunto de datos. La función del algoritmo es tratar de definir los límites entre dichas unidades (Fallas, 2007).

Los métodos basados en el concepto de continuidad parten del supuesto de que la superficie puede describirse utilizando una función matemática y puntos de muestreo. Los métodos pueden dividirse en locales y globales. Los primeros utilizan todos los puntos de muestreo para crear la superficie; en tanto que los segundos utilizan sólo un subconjunto de los mismos (concepto de vecino más cercano) (Fallas, 2007).

Por otra parte, cada modelo de datos puede expresarse mediante diferentes estructuras de datos. Las más representativas son dos estructuras vectoriales y dos estructuras ráster: la primera basada en contornos y en un TIN, y la segunda basada en matrices regulares y matrices jerárquicas (Felicísimo, 1994).

Según Felicísimo (1994) la estructura de datos TIN se compone de un conjunto de triángulos adosados, que se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, apoyándose y uniéndose sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. La creación de un TIN se compone de dos partes diferentes: la triangulación y la selección de los puntos que deben usarse como vértices.

Los TIN son una representación de datos geoespaciales digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Existen diversos métodos para formar estos triángulos, donde la triangulación de Delaunay es el método más recurrente al aplicarse (aunque existen otros menos comunes como el orden de distancias).

Una triangulación de Delaunay es un algoritmo formulado para construir una red de triángulos que cumplen con la condición matemática de Delaunay, la cual dice que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de una red no debe contener ningún vértice de otro triángulo (Cruz, 2016).

2.4. Imágenes y sensores térmicos

Todos los sistemas de imágenes térmicas están diseñados para utilizar la radiación e iluminación infrarroja, que abarca las longitudes de onda de luz entre 0.7 y 350 μm . La luz natural que es visible o la infrarroja que es invisible, son subproductos de un efecto llamado radiación térmica de cuerpo negro y está asociada con el calor.

En física, la radiación es la emisión o transmisión de energía en forma de ondas o partículas a través del espacio o sobre un medio material. Existen diversos tipos de radiación, por ejemplo: gravitacional, acústica, de partículas o electromagnética, dentro de esta última, se encuentra la radiación visible y la infrarroja (FAMAF, 2024).

Cuando un objeto se ilumina producto de la emisión o transmisión de energía, parte de la luz se absorbe y se refleja. Un cuerpo negro ideal absorbe toda la radiación que se le transmite. Al calentarse, emite energía electromagnética producto de la agitación térmica de los electrones de la superficie. La intensidad de esa radiación depende de su frecuencia y de la temperatura. Si este objeto está en equilibrio térmico con el entorno, irradia tanta energía como la que absorbe, por consiguiente, un cuerpo negro absorbe y emite perfectamente la radiación (FAMAF, 2024).

Cualquier objeto a una determinada temperatura irradia luz, y la temperatura del objeto determina cuánta radiación se emite y en qué longitud de onda, siguiendo lo que se denomina curva de radiación del cuerpo negro. Los objetos más calientes emiten longitudes de onda más cortas con mayor intensidad, en comparación con las emitidas por objetos más fríos. Las temperaturas asociadas con la emisión de la luz visible suelen ser superiores, mientras que los objetos a temperaturas más frías emiten en las bandas infrarrojas. Se suele dividir la radiación infrarroja en tres bandas. La banda del infrarrojo cercano está entre 0.7 y 4 μm (hasta 400 °C), la del infrarrojo medio está entre 5 y 25 μm (hasta -150 °C) y la del infrarrojo lejano, entre 25 y 350 μm (Kopp, 2009).

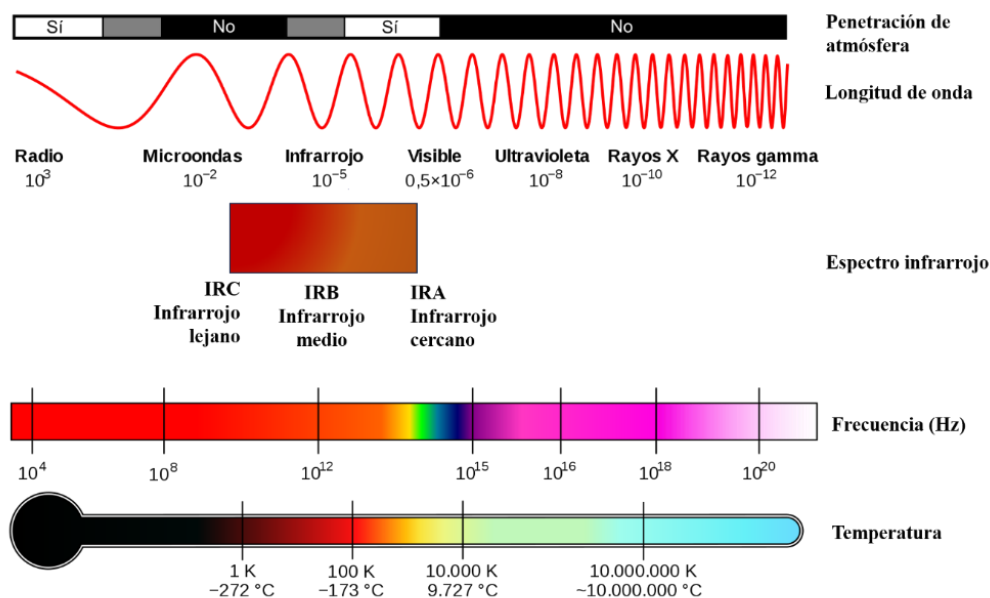


Figura No. 2. 2 Comportamiento del infrarrojo en el espectro electromagnético

Fuente: (NASA, 2013)

Los sensores térmicos miden fundamentalmente la temperatura de la superficie de un objeto y están diseñados para detectar cambios sutiles de temperatura. Existen objetos que reflejan la radiación térmica en mayor grado que otros, las superficies no reflectantes, como el hormigón, la madera e incluso los seres humanos, tienen un alto grado de emisividad y por ello se pueden medir con mayor precisión mediante imágenes térmicas (DJI Enterprise, 2021).

Como se indicó anteriormente, los sensores térmicos trabajan en el infrarrojo térmico, que equivale aproximadamente entre los -20 y 350 °C. Los sensores térmicos utilizan microbolómetros, el cual es un bolómetro de pequeño tamaño, que se utiliza como detector de longitudes de onda específicas, al recibir la radiación infrarroja se calienta y cambia su resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia se mide y se equipara a una determinada temperatura, asignado un color para cada temperatura y formando una imagen coloreada (de acuerdo a rangos de temperatura). La no uniformidad de temperaturas suele indicar alguna falla o punto crítico, siendo este el principal objeto de estudio (Promax, 2019).

Los seres humanos pueden sentir el calor, pero no pueden verlo, porque el calor ocurre en la longitud de onda infrarroja del espectro electromagnético (Figura No. 2. 3). Los sensores térmicos, capturan la transmisión de energía en la longitud de onda infrarroja y generan imágenes interpretables que se ajustan a la visión humana. Es importante tener en cuenta que, no todos los objetos emiten una firma de calor precisa. El grado en el que un objeto absorbe o refleja el calor se llama emisividad y varía mucho entre los objetos. Además, los objetos con alta emisividad, como la madera, se pueden detectar con facilidad con un dispositivo para imágenes térmicas, mientras que los de baja emisividad, como el yeso, no se pueden detectar con facilidad con una cámara térmica (DJI Enterprise, 2021).

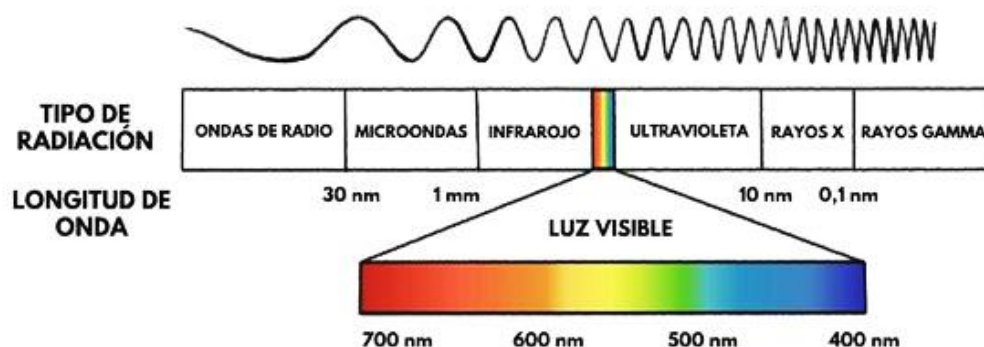


Figura No. 2. 3 Espectro electromagnético para el ser humano

Fuente: (Monza Lista, 2020)

La radiación electromagnética emitida por la superficie terrestre en la región del infrarrojo térmico, típicamente se encuentra entre los 8 y 14 μm . En ese intervalo se produce el 80 % de la emisividad de la superficie terrestre (Martínez-Barbáchano, 2019). La emisividad es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro.

La estimación de la temperatura superficial está condicionada, principalmente, por el contenido de vapor de agua de la atmósfera (especialmente sensible en la zona intertropical) y la emisividad de la superficie estudiada. Por todo ello, una correcta estimación de la temperatura superficial implica necesariamente la consideración y corrección de estos factores (Martínez-Barbáchano, 2019).

La radiación emitida por una superficie a una determinada longitud de onda, dentro del rango infrarrojo térmico, es función no sólo de su temperatura, sino que depende también de su emisividad. Es por ello, un parámetro crítico para el estudio del balance radiativo terrestre (Martínez-Barbáchano, 2019).

2.4.1. Sensores térmicos en RPAS

Un RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*, por sus siglas en inglés) hace referencia al concepto de una aeronave que vuela sin tripulación y que es controlada remotamente. Un VANT, es propiamente el vehículo de vuelo, comúnmente conocido con el sinónimo de dron (PITRA-LANAMME-UCR, 2017).

Existen RPAS con características particulares que permiten soportar sensores específicos, por ejemplo, los sensores térmicos integrados, que pueden medir información termográfica de objetos. Los RPAS térmicos, cuentan con microbolómetros; en las misiones el objetivo del plan de vuelo consta de recopilar información de calor, a través de la absorción de energía infrarroja y crear un termograma basado en las mediciones. En síntesis, las cámaras térmicas constan de un objetivo especializado que permite el paso de las frecuencias infrarrojas. Por tal motivo, la cámara incluye un sensor térmico y un procesador de imágenes que se encuentran almacenados en una funda protectora. Mientras el VANT vuela, el sensor térmico de la cámara detecta longitudes de onda infrarrojas y las convierte en señales electrónicas. Después de recibir las señales, el procesador de imágenes crea el termograma o imagen termográfica, que se compone de un mapa de color que muestra diferentes valores de temperatura (DJI Enterprise, 2021).

2.4.2. Sensores térmicos FLIR

El infrarrojo de barrido frontal o FLIR (*Forward Looking InfraRed*, por sus siglas en inglés) también es una tecnología basada en imágenes y video de sensores térmicos, para un rango específico de longitudes de onda, generalmente entre 8 y 12 μm . Los sensores FLIR, crean imágenes a partir del calor y no de la luz visible, debido a que los diferentes materiales absorben e irradian energía térmica a diferentes velocidades, un área que se considera de una sola temperatura, es en realidad un mosaico de temperaturas sutilmente diferentes. Los FLIR son capaces de detectar estas diferencias de temperatura relativa y convertirlas en detalles de imagen (Teledyne FLIR, 2023).

Las inconsistencias en las diferencias de los valores de pixel de esta metodología, se corrigen asignando valores medidos en fábrica a través de una transformación lineal en la imagen de salida. Por otro lado, algunas empresas ofrecen tecnologías que combinan una imagen del espectro visible con una una imagen de espectro infrarrojo, con el fin de proporcionar una imagen bidimensional. Para ello, el equipo dispone de una combinación de sistemas de lentes, un sistema afocal de reimaginación y una matriz de detección, que permite

variar el campo de visión y enfocar la radiación colimada en el objeto de interés (Medvey, 2013).

En las cámaras FLIR el grado de sensibilidad es muy alto, permitiendo detectar diferencias de temperatura muy pequeñas. Esto favorece aplicaciones donde se requiere alta sensibilidad, como detección de pequeños cambios de temperatura en un proceso. Las cámaras FLIR suelen incluir capacidades avanzadas de procesamiento de imágenes, como la capacidad de mejorar el contraste, ajustar el color y eliminar el ruido de la imagen. Esto puede hacer que las imágenes FLIR sean más claras y detalladas que las capturadas con una cámara térmica tradicional (Teledyne FLIR, 2023).

2.5. Puentes vehiculares y sus partes principales

Un puente es una estructura construida sobre una obstrucción o depresión, se utiliza para el paso de cargas móviles, en donde la luz de medida a lo largo del centro de la vía es igual o mayor a seis metros entre la parte interna de sus bastiones o arcos. Los puentes están compuestos fundamentalmente por dos partes, la superestructura y la subestructura.

La superestructura comprende todos los componentes que se encuentran por encima de los elementos de soporte. Entre estos componentes se encuentran la superficie de rodamiento, sobre la cual circulan los vehículos, la cual puede ser de asfalto o de concreto. La losa, cuya función principal es distribuir las cargas transversal y longitudinalmente en toda la longitud del puente. Las vigas son los miembros principales del puente y se diseñan para resistir el trabajo a flexión. Las juntas de expansión, que consisten en dispositivos que permiten pequeños movimientos de la superestructura sin que se produzcan daños, (CNE, 2024).

La subestructura está formada por todos los elementos que requiere la superestructura para sustentarse (Figura No. 2. 4). Entre ellos se encuentran: los apoyos, que son dispositivos diseñados para transmitir reacciones de un miembro de la estructura a otro y permitir el movimiento longitudinal como resultado de cargas de temperatura y cargas superpuestas sin transmitir fuerzas horizontales a la subestructura. Los bastiones, que sirven de apoyo a los extremos de los puentes, además sirven de muro de retención del relleno que se encuentra en los accesos de aproximación del puente. Las pilas son las estructuras verticales de soporte de los puentes, son apoyos intermedios que transmiten a las cimentaciones los esfuerzos que reciben de los elementos portantes. El estribo es un elemento estructural en el que el tablero se apoya en ambos extremos, se cimenta sobre el terreno y sirve de elemento de transición entre la vía y el tablero, colabora junto con las pilas en la sustentación del tablero. Los cabezales, son elementos que soportan transversalmente la losa y transmiten las cargas procedentes de esta hacia las columnas (CNE, 2024).

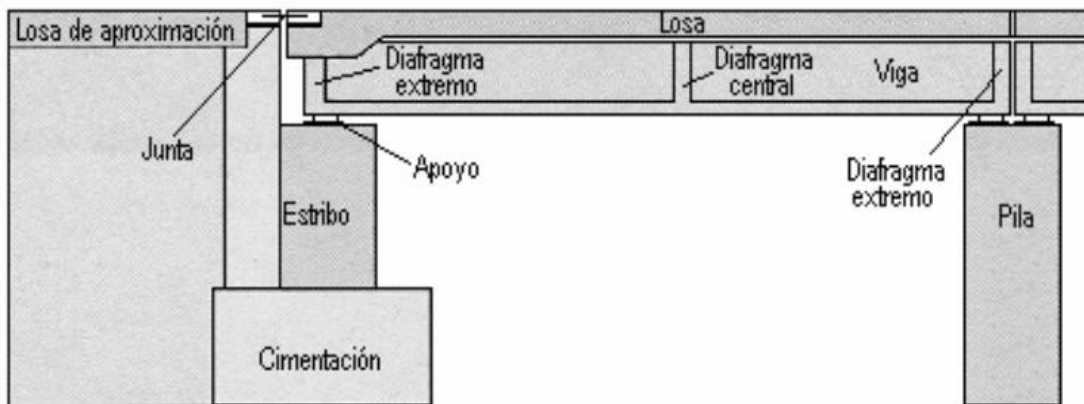


Figura No. 2. 4 Algunos elementos de la subestructura y superestructura de un puente
Fuente: (ANIPPAC, 2016)

2.6. La consultoría en los servicios de ingeniería y arquitectura

La arquitectura es una disciplina correlacionada entre el arte, el diseño, la planificación y la construcción, que tiene como objeto, formar espacios o estructuras que cumplan funcionalmente a un conjunto de personas. Por otro lado, la ingeniería a grandes rasgos emplea principios científicos para diseñar y construir dichas estructuras, basándose en tecnología, técnicas y herramientas para resolver problemas en el proceso de ejecución.

En términos generales, la consultoría se convierte en una operación que puede implicar dos tipos de asesoramientos para la ingeniería y la arquitectura: uno orientado al contenido del estudio, es decir, con el problema en sí, y el otro orientado al proceso de su realización, esto es, con la forma de afrontar los problemas (García-Ramos & Dávila, 2008).

En la orientación al contenido, se requiere contratar consultores o expertos para que solucionen un problema determinado o resuelvan una situación de crisis estructural del servicio. Para solucionar el problema, el consultor recoge datos y dictamina una solución que se le expone al cliente o interesado (García-Ramos & Dávila, 2008). A efectos del presente Proyecto de Graduación, este tipo de consultoría será objeto de investigación y aplicación práctica con la segunda área de estudio (Puente Rafael Iglesias Castro).

En la segunda área de estudio, el concepto de inspección de un puente es un tema recurrente, se entiende por inspección de un puente al reconocimiento, ya sea visual o a partir de técnicas más especializadas, de los elementos estructurales y no estructurales de un puente y de su condición por parte de un inspector debidamente calificado (LANAMME-UCR, 2022). Existen distintos tipos de inspección, los cuales se detallan a continuación.

Cuadro No. 2. 1 Tipos de inspección en puentes de Costa Rica

Tipo	Descripción	Intervalo de aplicación
Inspección de inventario	Es programada con el propósito de obtener un registro de las características de gestión básicas del puente. Entre estas se encuentran las dimensiones y características de los elementos de la superestructura, subestructura, los accesos y accesorios, así como características funcionales, registro fotográfico o planos del puente.	Se realiza una única vez durante la vida de servicio del puente, en un plazo no mayor a 3 meses desde que se completa su construcción o rehabilitación.
Inspección rutinaria	Es programada para realizar observaciones y mediciones sobre la condición estructural y funcional del puente. Se inspecciona visualmente elementos estructurales y no estructurales, accesorios y aspectos hidrológicos-hidráulicos, de seguridad vial, geotécnicos y sísmicos. Con ella se determina si la estructura logra satisfacer los requisitos vigentes de servicio. Además, se pretende identificar cualquier cambio con respecto a la condición inicial del puente luego de ser construido, o bien, con respecto a condiciones registradas previamente en otras inspecciones.	De 2 a 4 años.
Inspección detallada	Es programada, se realiza a profundidad en uno o todos los elementos del puente. El objetivo es encontrar cualquier deficiencia que no sea detectable a través de los procedimientos de inspección rutinaria, o bien, donde se necesite indagar con más detalle en lo observado en una inspección previa.	Se define a partir de una inspección rutinaria que amerite solicitarla.
Inspección de elementos críticos	Se verifica un elemento crítico por fractura o los componentes de un elemento crítico por fractura. Un elemento crítico por fractura es aquel cuyo fallo podría comprometer la estabilidad del puente, o provocar que la operación de uno o más tramos de la superestructura o subestructura no sean seguros.	Se define a partir de una inspección rutinaria que amerite solicitarla.
Inspección especial	Es una inspección no programada, se realiza a discreción de la organización responsable de la gestión del puente. Esta inspección sirve para monitorear deficiencias identificadas durante una inspección previa, confirmar sospechas o notificaciones de daños, o para monitorear detalles especiales o características del puente que no necesariamente tienen defectos.	Se realiza en un intervalo a discreción de la organización responsable de la gestión del puente.

Tipo	Descripción	Intervalo de aplicación
Inspección por eventos extremos	Su finalidad es evaluar el daño estructural después de la ocurrencia de fenómenos naturales, tales como eventos hidrometeorológicos, eventos sísmicos, o por acciones humanas como la colisión de un camión o un incendio.	Se debe realizar en un plazo no mayor a 7 días naturales después del evento.
Inspección básica	Es una inspección programada donde se ejecuta una revisión rápida de la condición del puente, con el fin de corroborar si la estructura se encuentra en condición aceptable o satisfactoria.	Se lleva a cabo cuando el intervalo de inspección rutinaria se amplía a periodos mayores de 2 años.

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (LANAMME-UCR, 2022)

Por su parte, la consultoría orientada al proceso de realización, se enfatiza en ayudar a los demás a ayudarse a sí mismos, no en resolver sus problemas ni en darles consejo de experto. Así, sería un conjunto de actividades que realiza el consultor para ayudar al cliente a percibir y comprender los acontecimientos del proceso que se presentan en su ambiente y a influir sobre ellos (García-Ramos & Dávila, 2008). Esta clasificación de consultoría será objeto de investigación y aplicación práctica con la primera área de estudio (terreno en El Castillo).

La consultoría de procesos intenta ayudar a los clientes o interesados a desarrollar decisiones estratégicas y tácticas de operaciones y, en definitiva, a mejorar el proceso productivo. La consultoría debe comenzar considerando los procesos de negocio de la empresa consultada, incluyendo los recursos materiales, financieros y humanos, siendo la tecnología una herramienta que forma parte de los mismos. Por ello, se debe analizar en detalle los procesos, aplicar reingeniería, desarrollar procedimientos, y fijar niveles de servicio y estándares de acuerdo a las mejores prácticas de cada industria. Con el objetivo de reducir costos y mejorar la eficiencia en las operaciones (García-Ramos & Dávila, 2008).

Capítulo 3: Metodología

3.1. Materiales y equipos

Los equipos y materiales empleados fueron: Dron DJI Matrice 300RTK, sensor LiDAR GS-Livox MID40, dron DJI Mavic 2 Enterprise Dual, sensor Teledyne FLIR One Gen 3 iOS, computadora, memoria USB, disco duro externo, impresora, tintas de impresión y hojas de papel.

La computadora y sensor FLIR utilizados son pertenecientes al proponente, el dron DJI Matrice 300RTK y sensor LiDAR son propiedad de la empresa Intopo SRL, el dron DJI Mavic 2 Enterprise Dual y las licencias de software para los flujos de trabajo realizados, pertenecen al Programa de Posgrado en Geografía de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica (UCR).

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas de los equipos utilizados:

Cuadro No. 3. 1 Parámetros técnicos DJI Matrice 300RTK

Ítem	Parámetro
Dimensiones	810×670×430 mm
Peso	3.6 kg
Frecuencia de operación	2,4000-2,4835 GHz 5,725-5,850 GHz
Precisión de desplazamiento	Vertical: ±0.1 m (sistema de visión habilitado) ±0.5 m (GPS habilitado) ±0.1 m (RTK habilitado) Horizontal: ±0.3 m (sistema de visión habilitado) ±1.5 m (GPS habilitado) ±0.1 m (RTK habilitado)
Precisión de posicionamiento RTK	Cuando RTK está habilitado y fijo: 1 cm+1 ppm (horizontal) 1.5 cm + 1 ppm (vertical)
Velocidad máxima	23 m/s
Tiempo máximo de vuelo	55 minutos
GNSS	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo
Clasificación	IP45
Campo de visión	Adelante/Atrás/Abajo: 65° (H), 50° (V) Izquierda/Derecha/Arriba: 75°(H), 60°(V)
Cámara FPV	
Resolución	960 p
Campo de visión	145°

Ítem	Parámetro
Cuadros por segundo	30 fps

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (DJI, 2024)

Cuadro No. 3. 2 Parámetros técnicos GS-LIVOX MID40

Ítem	Parámetro
Peso	1.2 Kg (sin cámara)
Precisión de medición	0.1 m
Rango de poder	12V a 16V
Temperatura de trabajo	20 °C a +55 °C
Retornos	2
Plataforma de soporte	DJI M210, M300, M600
Almacenamiento	64GB Interna, 128 GB Tarjeta externa
Rango de medición	90 m 10 % Reflectividad, 130 m 20 % Reflectividad, 260 m 80 % Reflectividad
Clase de láser	Clase 1, 90 5nm
Rango máximo	260 m
Rango mínimo	0.3 m
Precisión de rango	±5 cm (@0.3 m~1m), ±2 cm (@1 m~200 m)
Datos	Doble eco, 100.000 puntos/seg.
Campo de visión (FOV)	38.4° vista circular
Frecuencia	200Hz
Ángulo de rumbo	0.08°
Ángulo de cabeceo	0.03°
Ángulo de alabeo	0.03°
Precisión de posición	≤ 0.05 m
Tipo de señal GNSS	GPS L1/L2 GLONAS L1/L2 BDS B1/B2
Formato de nube de puntos	Formato LAS, formato TXT personalizado
Compatibilidad de Software	LiDAR 360, Global Mapper, ArcGIS, Erdas Imagine, LiDAR_Mate, Point Cloud Catalyst, Point Cab, TerraSolid, TopoDoT, LAStools,

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (Livox, 2024)

Cuadro No. 3. 3 Parámetros técnicos DJI Mavic 2 Enterprise Dual

Ítem	Parámetro
Dimensiones	322 × 242 × 84 mm
Peso	1.1 kg
Frecuencia de operación	2.400 – 2.4835 GHz 5.725 – 5.850 GHz

Ítem	Parámetro
Precisión de desplazamiento	Vertical: ±0.1 m (con posicionamiento por visión) ±0.5 m (con posicionamiento por GPS) Horizontal: ±0.3 m (con posicionamiento por visión) ±1.5 m (con posicionamiento por GPS)
Velocidad máxima	50 kph
Tiempo máximo de vuelo	31 minutos
GNSS	GPS+GLONASS
Cámara térmica M2ED	
Sensor	Microbolómetro VOx no refrigerado
Resolución del sensor	160×120
Tamaño de píxel	12 micras
Banda espectral	8-14 micras
Tamaño de imagen	640×480 (4:3); 640×360 (16:9)
Lente	HFOV: 57° Apertura: f/1.1
Cámara visual M2ED	
Sensor	CMOS de 1/2.3"; Píxeles efectivos: 12M
Tamaño máximo de imagen	4056 × 3040 (4:3); 4056 × 2280 (16:9)
Lente	Campo de visión: aprox. 85° Equivalente al formato de 35 mm: 24 mm Apertura: f/2.8 Enfoque: 0.5 m a ∞

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (DJI, 2024)

Cuadro No. 3. 4 Parámetros técnicos Teledyne FLIR One Gen 3

Ítem	Parámetro
Resolución térmica	80x60
Peso	34.5 g
Rango de temperatura del objeto	(-)20 °C — 120 °C
Teléfono	iOS
Exactitud	±3 °C o ±5 %, típico porcentaje de la diferencia entre la temperatura ambiente y la de la escena. Aplicable 60 segundos después del arranque cuando la unidad está entre 15 °C – 35 °C y la escena está entre 5 °C – 120 °C.
Medidor puntual	Un medidor puntual (centrado)
Distancia MSX ajustable	0.3 m – Infinito
VFOV/VFOV	50° ± 1° / 38° ± 1°
Sensibilidad térmica [MRDT]	150 mK

Ítem	Parámetro
Sensor termal	
Tamaño de píxel	17 μm
Rango espectral	8 – 14 μm
Resolución visual	1440x1080

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de datos (Teledyne Flir, 2024)

Cuadro No. 3. 5 Parámetros técnicos de la computadora

Ítem	Parámetro
Modelo.	HP Laptop
Procesador	MD Ryzen 5 5500U, Radeon Graphics, 2,10 GHz
RAM	16.0 GB
SDD	500 GB
Sistema Operativo	64 bits, procesador x64
Windows	11 home

Fuente: Elaboración propia

3.2. Evaluación de la calidad de los datos disponibles

La investigación constó de tres diferentes fuentes de información geoespacial obtenidas en campo, a saber, datos LiDAR del terreno ubicado en la comunidad de El Castillo. Para el Puente Rafael Iglesias Castro, los datos provinieron de dos fuentes de imágenes térmicas, generadas con el sensor del dron Mavic 2 Enterprise Dual y con el sensor FLIR portátil.

3.2.1. Sensor LiDAR

El vuelo LiDAR se efectuó el 9 de setiembre del año 2021, fue realizado por Intopo SRL, una empresa de origen costarricense, especializada en consultoría de proyectos de topografía, agrimensura, fotogrametría, sistemas de posicionamiento global, LiDAR, control de obras, batimetría y Sistemas de Información Geográfica (SIG), (Intopo SRL, 2023).

Del vuelo se generaron archivos LASer (LAS) y su versión comprimida LAZ, los cuales almacenan datos tridimensionales del terreno. Asimismo, archivos en formato ECW (*Enhanced Compression Wavelet*, por sus siglas en inglés) que contienen imágenes aéreas del lugar.

Los datos LiDAR fueron georreferenciados a partir de dos mojones de control topográfico establecidos en el área donde se localiza el proyecto, los mojones se denominaron Gollas 1 y Gollas 2 (Figura No. 3. 1).

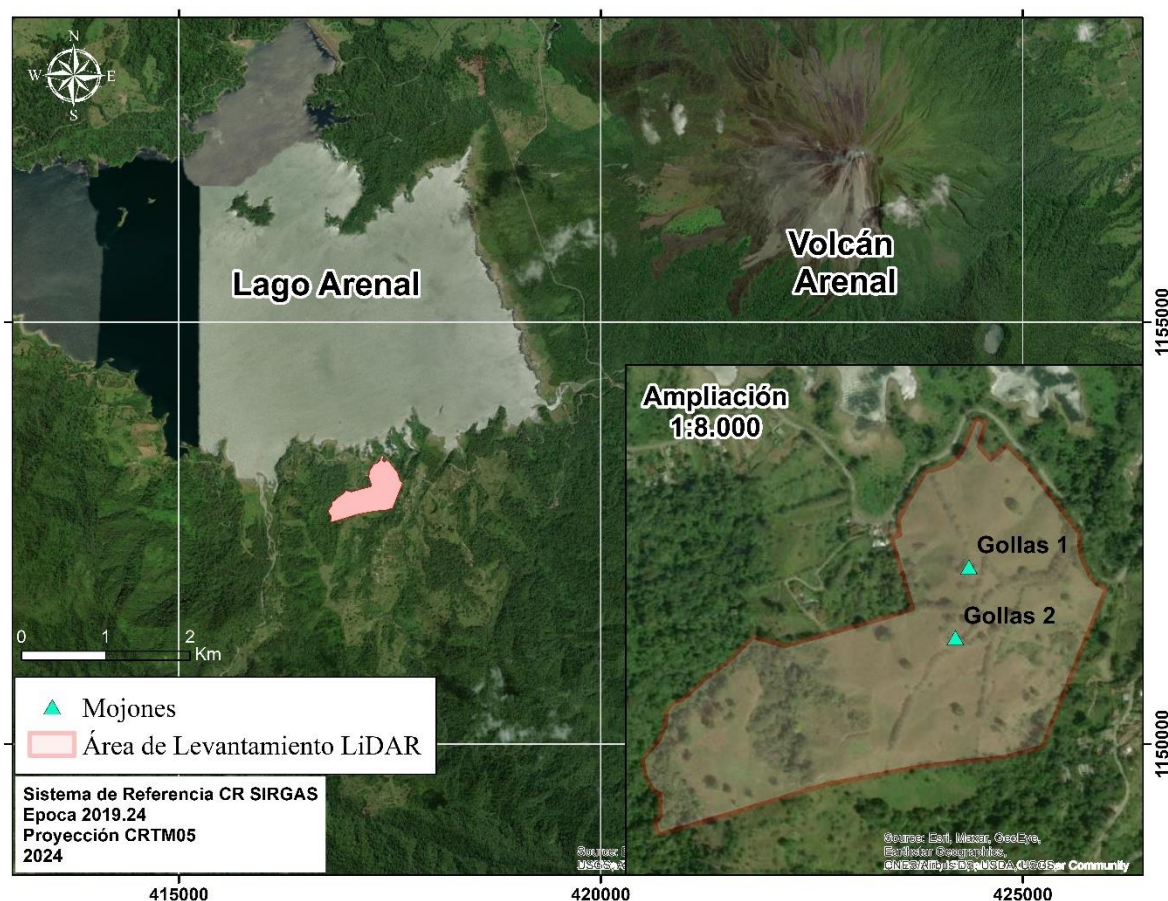


Figura No. 3. 1 Ubicación del mojones y proyecto en la comunidad El Castillo

Fuente: Elaboración propia

En cada uno de los mojones se realizó una medición GNSS, utilizando receptores marca Trimble, modelo R8, en modo estático. Posteriormente, mediante la página web de procesamiento en línea Spiderweb RINEX, del Instituto Geográfico Nacional (IGN), se procesaron los datos y se obtuvieron las coordenadas en el sistema de referencia CRTM05, época 2019.24, datum CR SIRGAS. Las elevaciones están referidas al modelo de geoide EGM 08 (*Earth Gravitational Model 2008*, por sus siglas en inglés) (Cuadro No. 3. 6).

Cuadro No. 3. 6. Coordenadas CRTM05 de los puntos de control (mojones) para levantamiento LiDAR

Punto	Norte (m)	Este (m)	Altura Elipsooidal (m)	Elevación Ortométrica (m)	Desviación Estándar Norte(m)	Desviación Estándar Este (m)	Desviación Estándar Altura y Elevación (m)
Gollas 1	1153137.139	417392.136	622.413	612.023	0.0003	0.0021	0.0103
Gollas 2	1153003.145	417366.471	622.478	612.088	0.0046	0.0041	0.0228

Fuente: Elaboración propia

Los metadatos de los archivos LAS cuentan con las siguientes características:

Cuadro No. 3. 7 Características del vuelo LiDAR efectuado

Total de puntos en el archivo LAS	243 344 247
Densidad de puntos LiDAR	907.44 puntos / m ²
Espaciamiento entre puntos LiDAR	0.0332 m
Área de proyecto	0.664 km ²
Elevación mínima	547.947m
Elevación máxima	679.07m
Fecha de vuelo	9/9/2021
Software de procesamiento	Global Mapper
Almacenamiento de nube de puntos	2.4 GB
Retornos	2

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Cámara térmica M2ED

El vuelo se efectuó el 10 de diciembre del año 2023, fue realizado en coordinación con el Posgrado en Geografía, adscrito a la Escuela de Geografía, de la UCR. La colaboración permitió tener el apoyo de un piloto con licencia RPAS quien recolectó la información.

Se utilizó un dron marca DJI, modelo Mavic 2 Enterprise Dual, placa RPAS-2052-CR. La planificación de cada vuelo se realizó con el control remoto del equipo, en el software de campo DJI Pilot. Los vuelos se tomaron entre 60 m y 80 m de altura, además se realizaron fotografías con ángulos en nadir y oblicuo.

La recopilación de la información se efectuó en la franja horaria comprendida entre las 10:00am y las 11:00am. La temperatura se encontraba en 29 grados Centígrados (°C) y se presentó un clima mayormente soleado. Se efectuaron cuatro planes de vuelo, el primero en el sentido de avance de la Ruta Nacional No. 1, es decir, sobre el puente, avanzando desde Grecia hacia Naranjo. El segundo, en sentido transversal a la posición del puente, desde aguas abajo hacia aguas arriba. El tercero y el cuarto, en paralelo al puente, posicionándose aguas abajo y aguas arriba respectivamente, avanzando desde la margen izquierda hacia la margen derecha en ambos casos (Figura No. 3. 2 y Cuadro No. 3. 7).

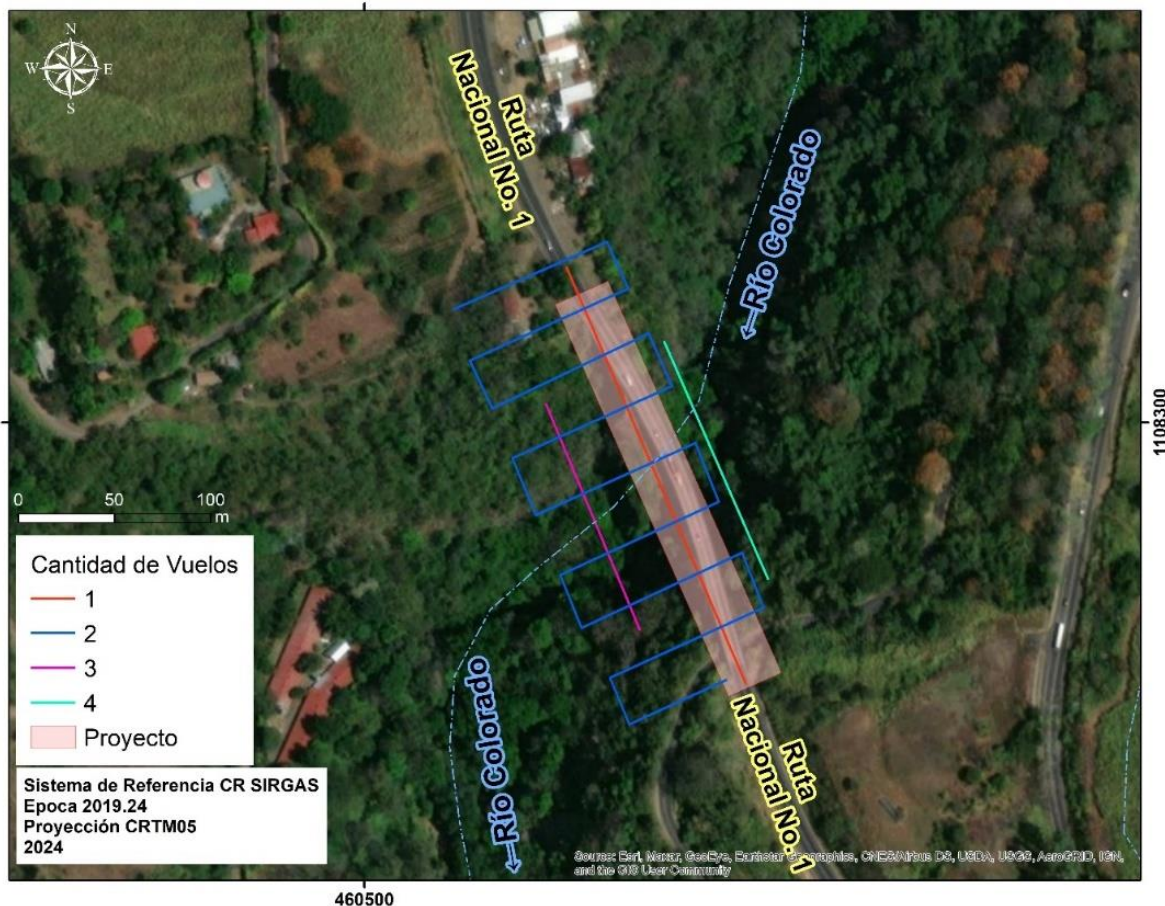


Figura No. 3. 2 Ubicación de planes de vuelos con sensor térmico realizados sobre el Puente Rafael Iglesias Castro

Fuente: Elaboración propia

Del vuelo se generaron archivos en formato JPG (*Joint Photographic Experts Group*, por sus siglas en inglés) que contienen las fotografías aéreas RGB (*Red, Green, Blue*, por sus siglas en inglés) y térmicas del lugar.

Los datos de imágenes aéreas fueron georreferenciados a partir de la configuración realizada para el vuelo del Dron Mavic 2 Enterprise Dual. Sistema de coordenadas WGS84 (*World Geodetic System 1984*, por sus siglas en inglés), zona 16 Norte UTM (*Universal Transverse Mercator*, por sus siglas en inglés), datum WGS1984 y alturas referidas al modelo de geode EGM 96 (*Earth Gravitational Model 1996*, por sus siglas en inglés).

Cuadro No. 3. 7 Características obtenidas del vuelo térmico efectuado

Vuelo	Cantidad de imágenes (JPG)	Peso (MB)
1	68	301
2	176	744
3	74	252
4	100	338

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Cámara térmica Flir

Las fotografías se tomaron el 15 de abril de 2024, la visita se enfocó en recoger datos de imágenes térmicas en sitios del proyecto donde, se presumía evidencia física de elementos estructurales con algún tipo de deterioro. Para lograr el cometido, se recorrió la superestructura y subestructura del puente, hasta donde las condiciones de seguridad lo permitieran, asimismo, factores como el tránsito vehicular, las ráfagas de viento, la inaccesibilidad de elementos y la topografía quebrada alrededor del puente, incidieron al momento de tomar los registros.

Con la visita se generaron archivos JPEG, cada uno de un megapixel (MP) con una resolución de 1080x1440. La cámara Flir One Gen 3, requiere emparejamiento con un teléfono inteligente para funcionar, por lo que se utilizó un Iphone 12 Pro, para el desarrollo de este proyecto. La cámara y el teléfono inteligente se interconectan mediante una conexión WPAN (*Wireless Personal Area Network*, por sus siglas en inglés) y una aplicación celular de Teledyne FLIR. Con esta conexión se accede a la tecnología de Imagen Dinámica Multiespectral (MSX) integrada en el sensor Flir, y utilizada para mejorar la visualización, al grabar detalles con la cámara del teléfono inteligente en la imagen térmica.

Las imágenes generadas con la cámara Flir One Gen 3, poseen una georreferenciación menos exacta, se obtiene a partir de la configuración de geolocalización que brinda el teléfono inteligente vinculado para realizar las capturas. Resultando insumos en el sistema de coordenadas WGS84, datum WGS1984. La geolocalización móvil de los teléfonos inteligentes se determina a partir de la transmisión de datos GNSS, desde torres telefónicas con radiofrecuencia.

La recopilación de fotografías se efectuó en la franja horaria comprendida entre 10:00 am y las 11:30 am. La temperatura se encontraba en 34 °C y se presentó un clima mayormente soleado. Se efectuó un recorrido de ida y vuelta para tomar imágenes en la superestructura del puente, teniendo como punto de salida y llegada, el margen izquierdo del puente, sobre el Río Colorado en la Ruta Nacional No.1.

Para acceder a la subestructura del puente, se debieron efectuar dos recorridos de forma separada. El primero en la margen izquierda del Río Colorado, en esta zona, debajo del puente, atraviesa la Ruta Nacional No. 716, que comunica Grecia con Santa Eulalia. Se ingresó por esa carretera y desde ahí se realizó la recopilación de imágenes hasta los sitios donde las condiciones de seguridad lo permitieron. El segundo recorrido fue en la margen derecha del Río Colorado, este sector está cubierto de vegetación, por tal motivo se debió circular entre plantas, rocas y arbustos para tener acceso a la subestructura del puente. La parte central de la subestructura compuesta por las vigas, no fueron sujetas a la verificación mediante la cámara Flir One Gen 3, producto de las condiciones de poca seguridad que se podrían experimentar en caso de acceder (Figura No. 3. 3 y Cuadro No. 3. 8).

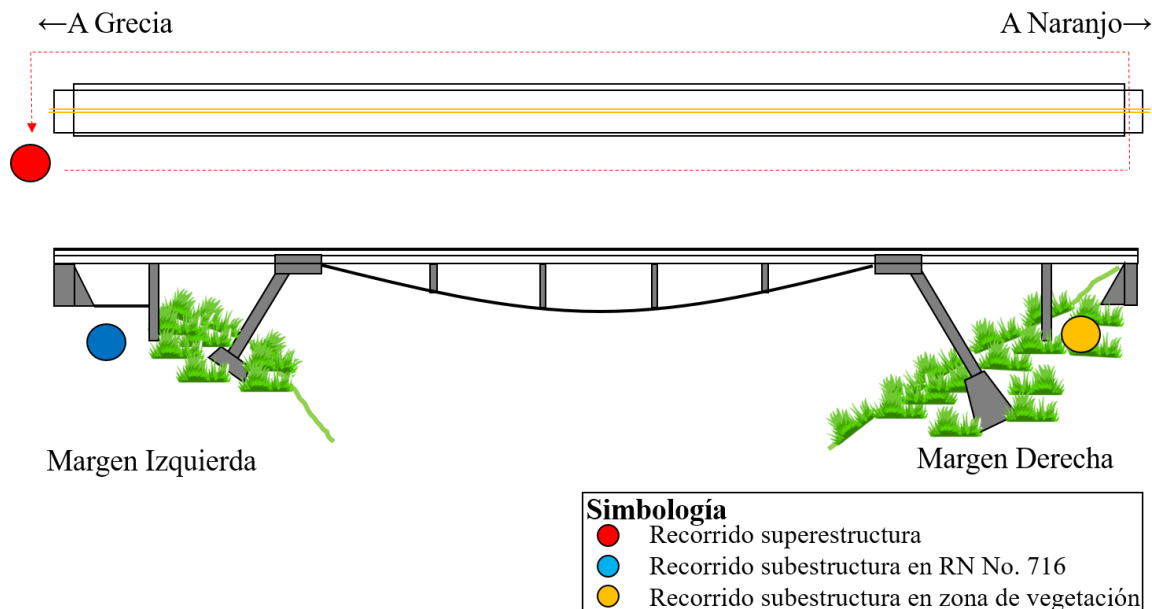


Figura No. 3. 3 Recorridos realizados para recolectar datos con la cámara térmica Flir

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 3. 8 Características obtenidas del recorrido con la cámara térmica Flir

Recorrido	Cantidad de imágenes (JPEG)	Peso (MB)
1	45	106
2	87	144
3	90	146

Fuente: Elaboración propia

3.3. Preparación y procesamiento de los datos

En la investigación se efectuaron tres diferentes procesamientos de la información obtenida en campo, un primer flujo de trabajo para los datos LiDAR del terreno ubicado en la comunidad de El Castillo. Para el Puente Rafael Iglesias Castro, se realizaron dos flujos de trabajo independientes, con el objetivo de procesar los datos de las imágenes térmicas producidas con cada uno de los sensores (el colocado en el dron y el sensor FLIR de mano).

3.3.1. Sensor LiDAR

Los datos propiedad de la empresa Intopo SRL, se solicitaron y obtuvieron a través de una nota de autorización con fines académicos, generada con apoyo del Programa de Posgrado en Geografía, de la Escuela de Geografía de la UCR. La empresa remitió los datos vía correo electrónico.

Los datos fueron procesados en el software Global Mapper, versión profesional. Esta versión, cuenta con un módulo con énfasis en topografía y el manejo de datos geoespaciales de elevaciones. Las herramientas que posee, permiten aligerar los tamaños de las nubes de puntos, generar clasificaciones empleando los estándares de la ASPRS (*American Society for*

Photogrammetry and Remote Sensing, por sus siglas en inglés) y extraer características esenciales de esos datos.

El procesamiento de los datos se realizó a partir de la creación de un proyecto; primero, se agregó la nube de puntos clasificada automáticamente, en formato LAS. Posteriormente, se agregó el ortomosaico en formato ECW para poder hacer el proceso de edición de forma más visual. En la siguiente figura, se detalla la nube de puntos en tonos blancos y grises, debido a que se efectuó una visualización por intensidad del pulso láser emitido; de fondo se encuentra la imagen aérea del lugar.

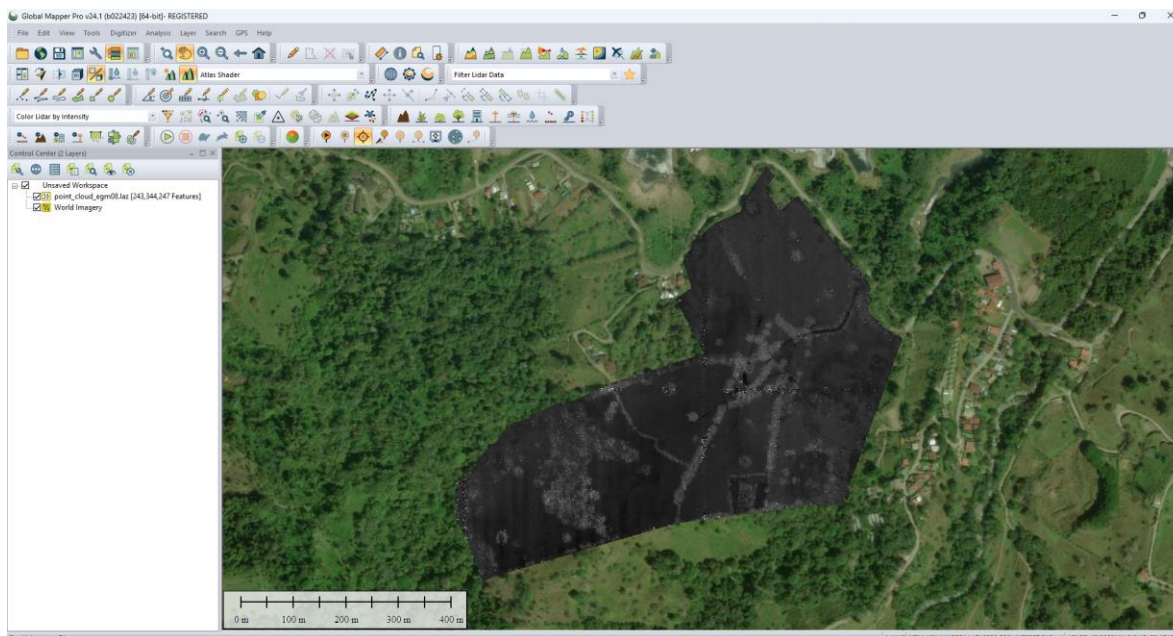


Figura No. 3. 4 Nube de puntos LAS sin procesar

Fuente: Elaboración propia

La edición de la nube de puntos, se realizó con la barra de herramientas del módulo LiDAR. Los datos se depuraron con las herramientas de autoclasificación y clasificación manual de puntos hasta optimizar adecuadamente la nube de puntos, el procesamiento demandó de varias horas para completarse.

La depuración se efectuó principalmente en los grupos de puntos sin clasificar, a efectos de reducir el alto porcentaje que ostentaban (alrededor del 60 %), adicionalmente se hicieron reajustes entre las clasificaciones de terreno natural, vegetación baja y media, según los estándares de la ASPRS. La clasificación manual se basó en las herramientas de control de selección disponibles para el usuario, en algunos casos, también se utilizó las herramientas del perfil (*path profile*) y los estilos de visualización de la nube de puntos, por ejemplo, visualización por retornos, intensidades o elevaciones. Este proceso tiene la característica de ser simple, pues únicamente se selecciona el grupo de puntos sin clasificar con el icono respectivo, a continuación, en la barra de herramientas, se pica el icono que simboliza el

grupo de puntos al que pertenecía y automáticamente el software realiza la conversión, según se detalla en las siguientes figuras.

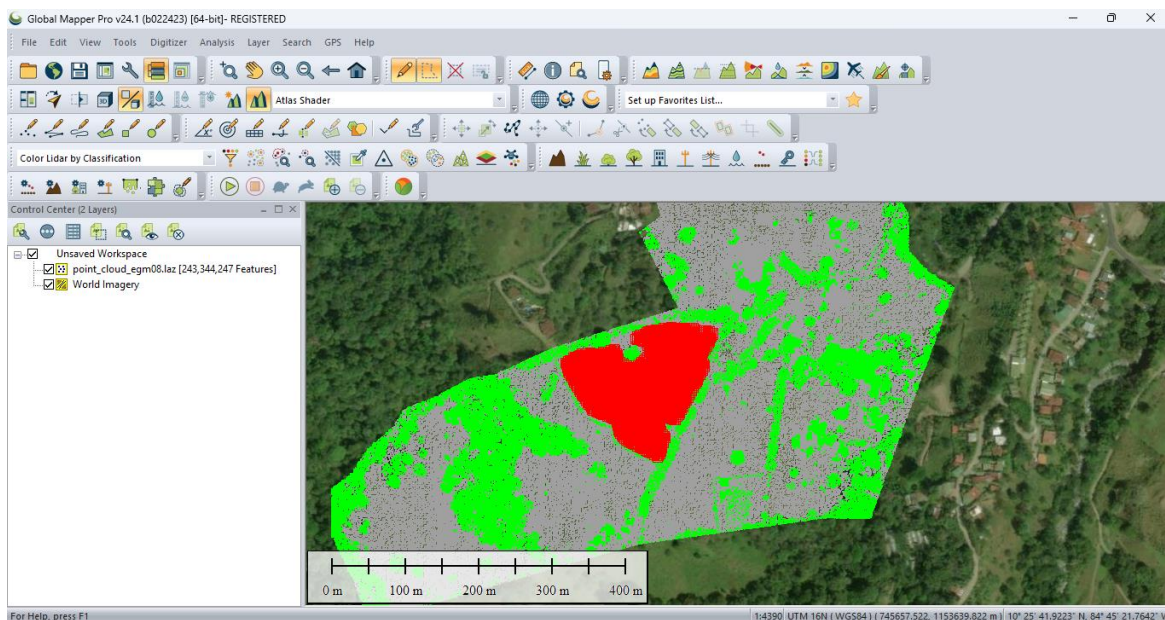


Figura No. 3. 5 Clasificación manual de la nube puntos LAS

Fuente: Elaboración propia

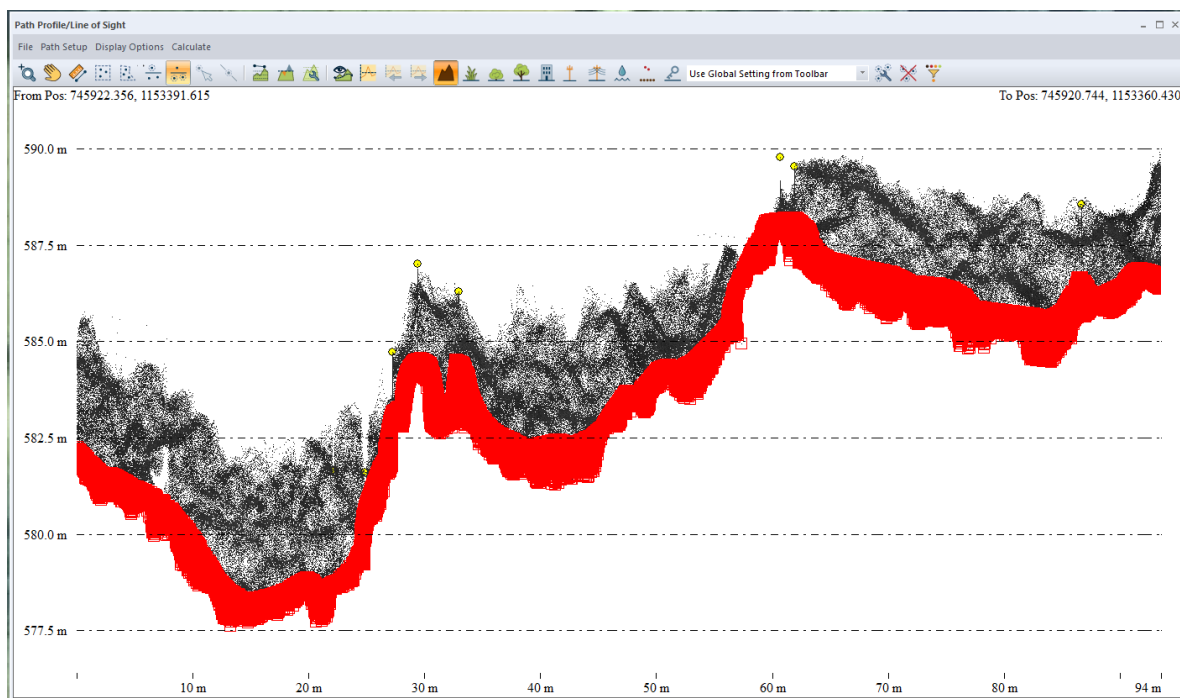


Figura No. 3. 6 Herramienta path profile para clasificación manual de puntos LAS

Fuente: Elaboración propia

Una vez terminada la edición, la nube de puntos (ahora clasificada) se guardó y actualizó automáticamente en la ubicación del disco local donde se almacenó. Como productos de salida, se generaron archivos en formato vectorial y ráster. Con las herramientas del software,

también se efectuó un filtrado a la clasificación realizada, para contar con un archivo que permitiera solo visualizar los datos del suelo, este se exportó en formato shapefile (SHP). Asimismo, en el software se generó y exportó un DTM en formato TIFF (*Tagged Image File Format*, por sus siglas en inglés), a partir de las opciones del menú *Analysis* y la opción de *Grid Creation*. Este proceso es automático, por lo que requirió de un tiempo menor a una hora para completarse, y se realizó con el objetivo de poder generar el MDE y mapas en SIG.

3.3.2. Cámara térmica M2ED

Una vez finalizado el vuelo, el piloto certificado de la Escuela de Geografía de la UCR, efectuó la descarga de los datos crudos del equipo y remitió la información vía correo electrónico.

Las imágenes obtenidas con este sensor fueron procesadas en el software Pix4D Mapper, versión pro. Con este plan, respecto a la parte térmica, se procesan imágenes aéreas con ángulos de nadir, oblicuo o terrestre. El software es capaz de procesar datos en formato JPG, JPEG y TIFF.

Para obtener una reconstrucción óptima de la escena, el desarrollador del software recomienda ciertas características previas al procesamiento, entre ellas que, la resolución mínima del sensor sea de 640x480, y que los datos sean recolectados mediante lentes con distancias focales de a lo sumo 9mm. En el mercado, existen sensores más compatibles que otros, causando que el software genere valores de temperatura absoluta o relativa. Por lo que, para obtener una temperatura absoluta, el desarrollador del software sugiere utilizar cámaras calibradas radiométricamente. El uso de este tipo de cámaras permite capturar la temperatura absoluta en cada píxel de una imagen, guardando las imágenes en formato RJPEG (JPEG radiométrico), la cual es una imagen JPG con datos de temperatura incrustados en cada píxel. En Pix4D Mapper, se pueden obtener resultados y salidas 2D o 3D de imágenes térmicas, entre ellas ortomosaicos térmicos, mapas térmicos y nubes de puntos clasificadas.

Cada vuelo realizado se procesó de forma individual, cargando y procesando los grupos de imágenes obtenidos, según se observa en la figura a continuación.

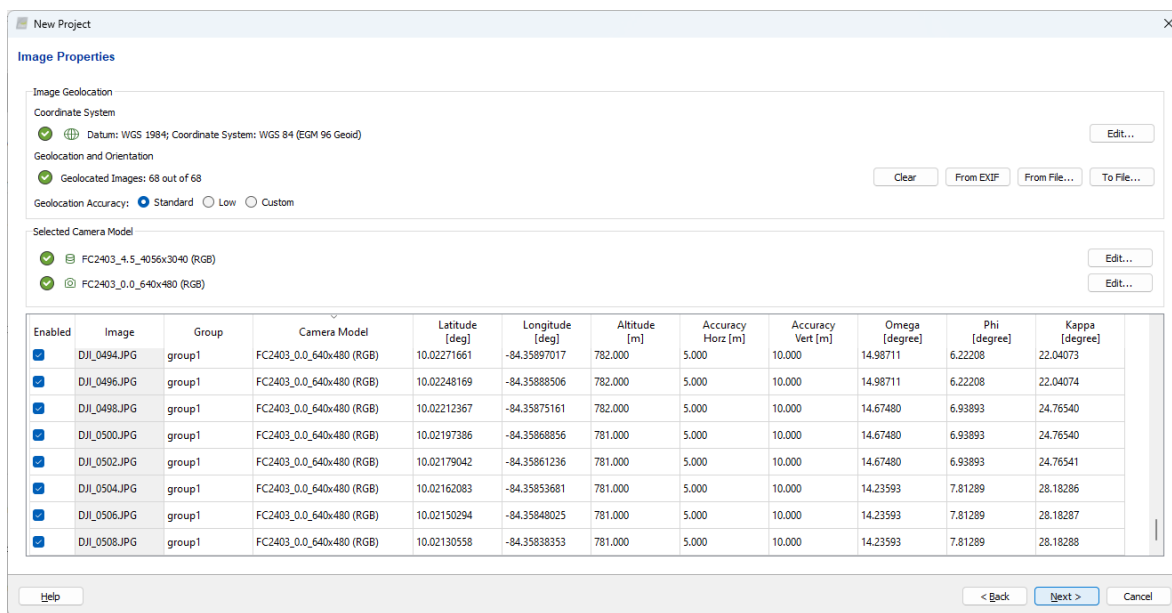


Figura No. 3. 7 Visualización de imágenes térmicas cargadas en Pix4D Mapper

Fuente: Elaboración propia

Los siguientes pasos efectuados en la interfaz del software estuvieron compuestos por la comprobación del sistema de referencia de coordenadas en que se encuentran las imágenes y la configuración del modelo de cámara, razón por la cual se realizó la comprobación de los parámetros de la orientación interna y externa de la cámara modelo FC2403_0_0_640x480.

A continuación, se seleccionó el tipo de procesamiento a realizar en cada vuelo, siendo para este caso en particular el procesamiento avanzado de cámara termal, según se muestra en la siguiente figura.

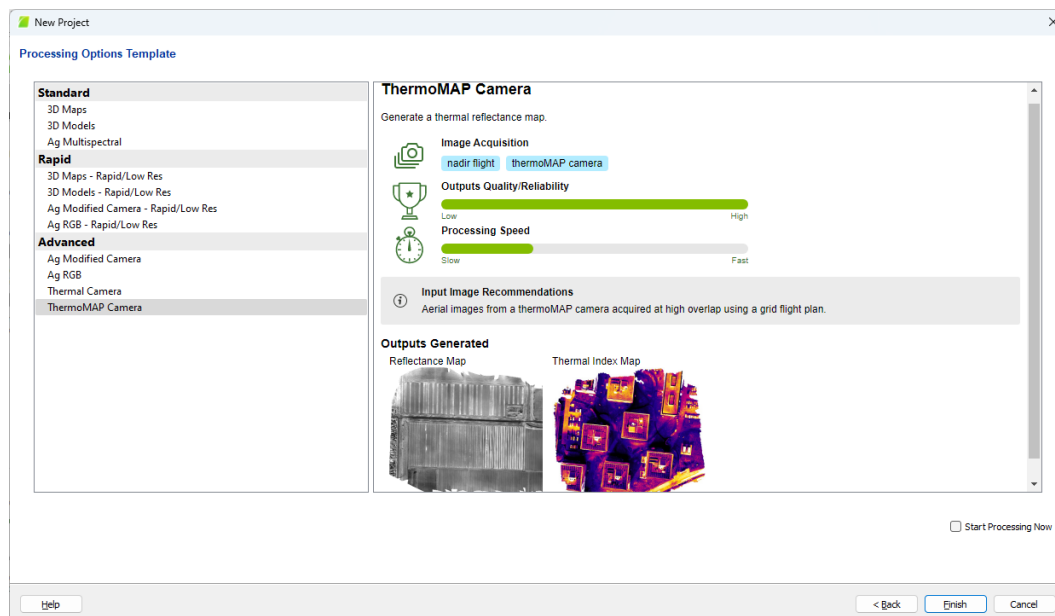


Figura No. 3. 8 Visualización de tipo de procesamiento termal realizado en Pix4D Mapper

Fuente: Elaboración propia

Con el paso anterior, el set de datos de interés quedó debidamente organizado para iniciar el procesamiento de salida.

También, se configuraron los productos de salida a obtener, compuestos por el procesamiento inicial, las nubes de puntos y DSM, ortomosaico e índice termal (Figura No. 3. 9). El procesamiento inicial da un reporte en formato PDF (*Portable Document Format*, por sus siglas en inglés), con un resumen de datos, detalles de calibración, parámetros de la cámara, resultados del ajuste realizado, datos de georreferenciación obtenida, procesamiento del DSM, orto mosaico e índice termal. Las nubes de puntos dan como producto de salida una representación 3D de la escena, sin embargo, este producto no ofrece aplicaciones en la temática termal. Por otro lado, el DSM, ortomosaico e índice termal, generaron archivos ráster en formato TIFF con valores en cada pixel de la escena.

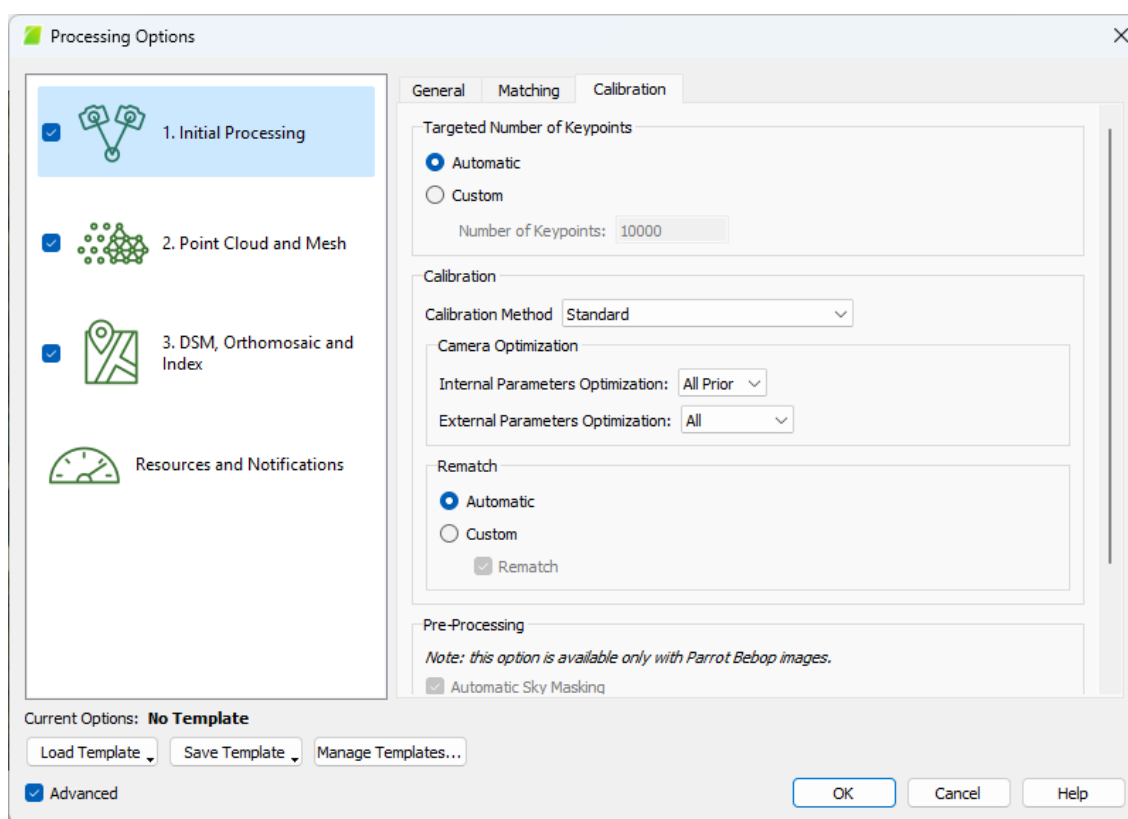


Figura No. 3. 9 Configuración de parámetros para los productos de salida en Pix4D Mapper
Fuente: Elaboración propia

Con la figura anterior, se puede constatar que el procesamiento es automático y estuvo compuesto por tres partes: el procesamiento inicial, el procesamiento de la nube de puntos y malla de triángulos, por último, el procesamiento de los archivos de salida. El procesamiento se efectuó de forma parcial en cada vuelo, esto a efectos de verificar y realizar mejoras en cada subproceso. Por ejemplo, se implementaron “*tie points*” en el procesamiento inicial, se mejoró la textura en el procesamiento de la nube de puntos y malla de triángulos, según se puede observar en las siguientes figuras.

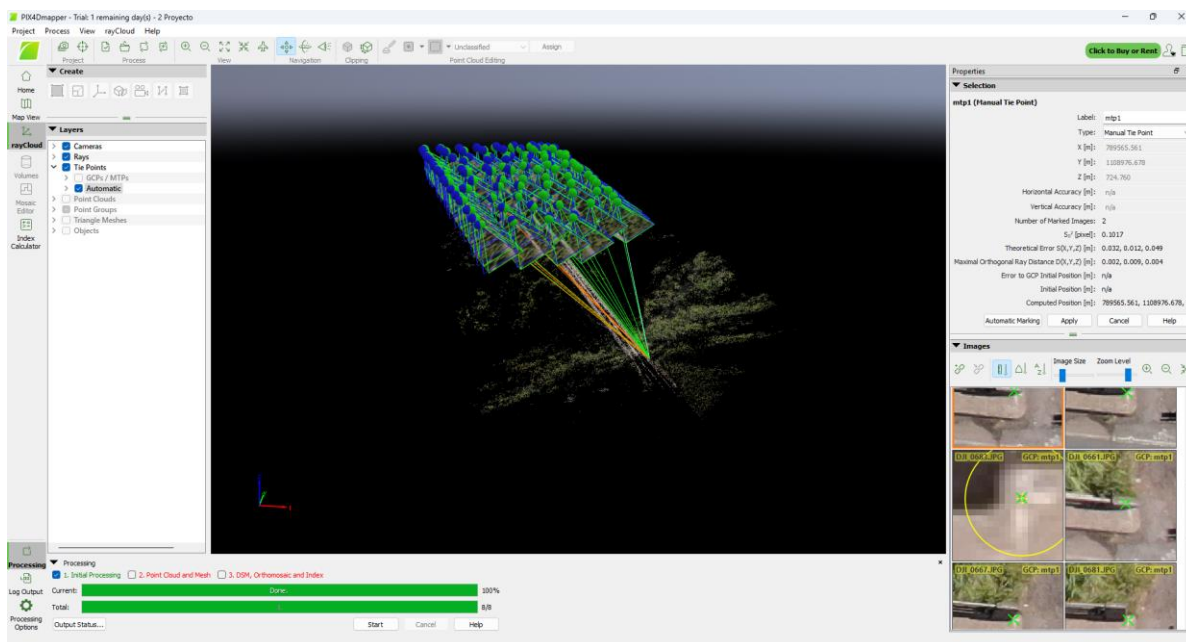


Figura No. 3. 10 Implementación de “tie points” en Pix4D Mapper

Fuente: Elaboración propia

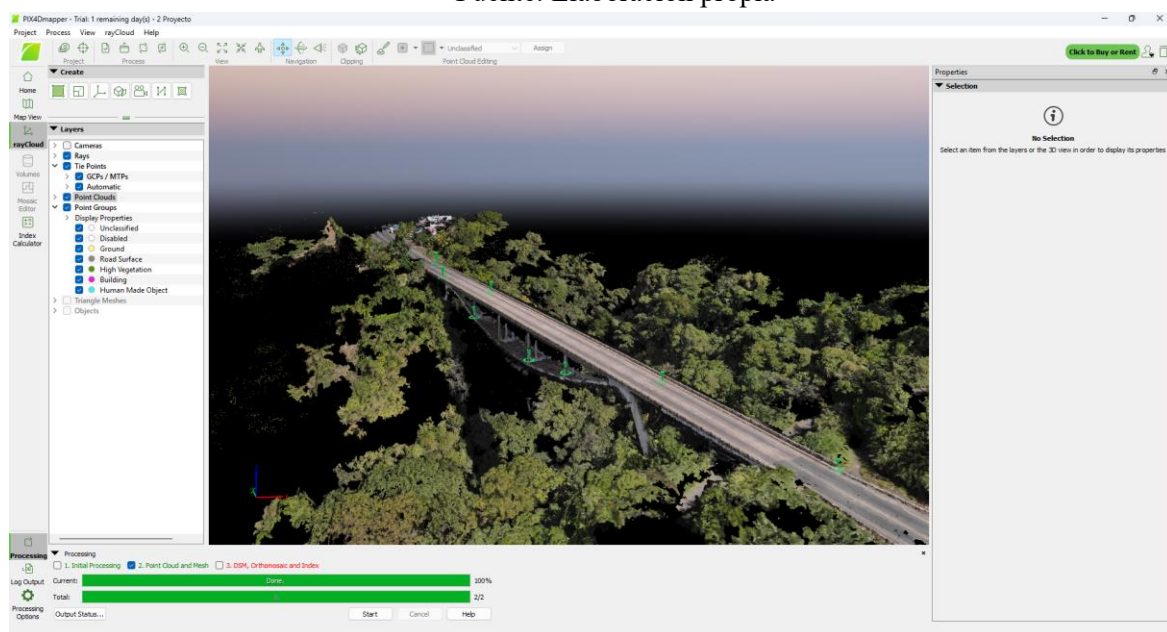


Figura No. 3. 11 Ejecución del flujo de trabajo para salida de la información en Pix4D Mapper

Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el procesamiento, en el menú *Index Calculator* de la barra de herramientas del software, se debió visualizar el mapa de reflectancia y el mapa de temperatura, los cuales son los productos de mayor relevancia para la presente investigación, (ver siguiente figura).

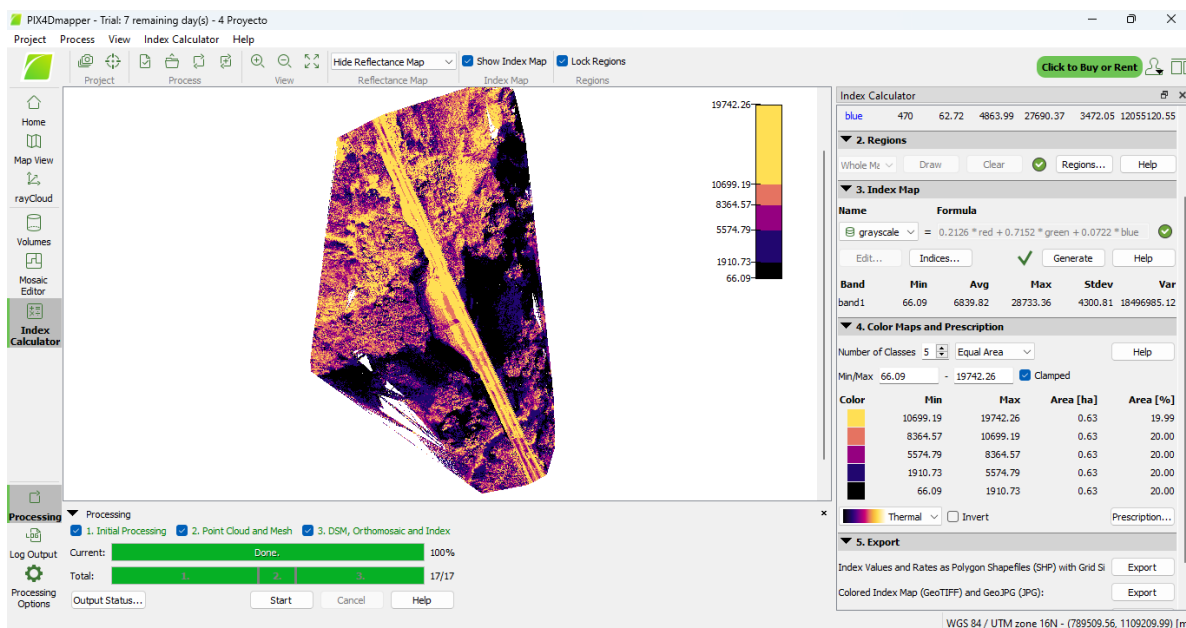


Figura No. 3. 12 Ejemplo de salida del flujo de trabajo en Pix4D Mapper

Fuente: Elaboración propia

Los resultados se almacenan automáticamente en formato TIFF, en el directorio donde se creó el proyecto. La imagen resultante está georreferenciada y puede trabajarse desde cualquier software SIG.

3.3.3. Cámara térmica Flir

Los datos recolectados en campo se almacenaron en la memoria del teléfono inteligente, y las imágenes se importaron desde el dispositivo hacia la computadora para iniciar el procesamiento. En el disco local de la computadora, se confeccionó una carpeta raíz donde se alojó la información cruda y procesada.

Las imágenes obtenidas con este sensor fueron procesadas con el software FLIR Thermal Studio, versión de iniciación. Con este plan, se tienen funciones para ver y editar imágenes y videos radiométricos, efectuar funciones métricas en las imágenes a partir de puntos, polígonos, elipses o líneas, realizar mediciones de temperatura en los píxeles de las imágenes y generar informes de resultados.

Al abrir el software, se despliega una pantalla que permite ubicar el directorio donde se encuentran las imágenes, por lo cual se seleccionó y cargó una imagen a la vez, según se observa a continuación.

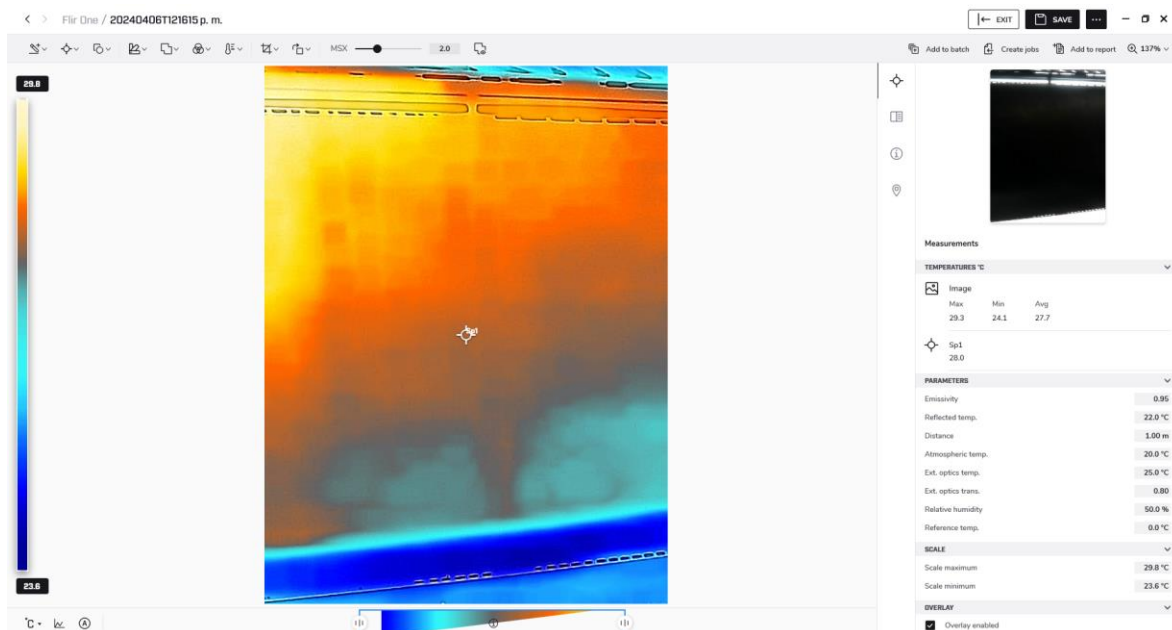


Figura No. 3. 13 Visualización de imágenes en FLIR Thermal Studio

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior, en la margen izquierda, se tiene el rango de valores máximos y mínimos de temperatura obtenidos. En la parte central, se visualiza la imagen térmica realizada. En la margen derecha, se muestra la imagen RGB simultáneamente generada con la cámara del teléfono inteligente, datos de temperatura máxima, mínima y promedio. En esta margen también se indican parámetros como emisividad, temperatura reflejada, distancia, temperatura en la atmósfera, humedad relativa, geolocalización, entre otros.

En la parte superior de la Figura No. 3. 13, se observa la barra de herramientas de edición, donde se muestran iconos de herramientas para agregar etiquetas de temperatura en puntos, líneas o polígonos, modificar la paleta de colores de la imagen, modificar la visualización del histograma con los rangos de temperaturas, aumentar o disminuir el MSX, además de herramientas para generar reportes automáticos de las características en la imagen térmica y ediciones efectuadas. Por otra parte, en la zona inferior de la figura, se encuentran herramientas para generar un perfil de temperaturas o modificar las unidades de la temperatura entre grados Centígrados, Fahrenheit o Kelvin.

El procesamiento de los datos del sensor Flir One Gen 3, radicó en cargar una a una las imágenes tomadas, analizar los parámetros obtenidos que se muestran en la margen derecha, la imagen térmica central y el histograma de temperaturas en grados Centígrados. No obstante, se hizo énfasis en las imágenes donde el rango de temperaturas mostró un comportamiento diferente en la paleta de colores.

Las imágenes que tenían diferencias en la paleta de colores, fueron corroboradas, se resaltó y acotó las variaciones de temperatura obtenidas. Finalmente, se generó un reporte

automatizado como resultado de cada procesamiento de imágenes, para su posterior análisis a profundidad, según se detalla seguidamente.

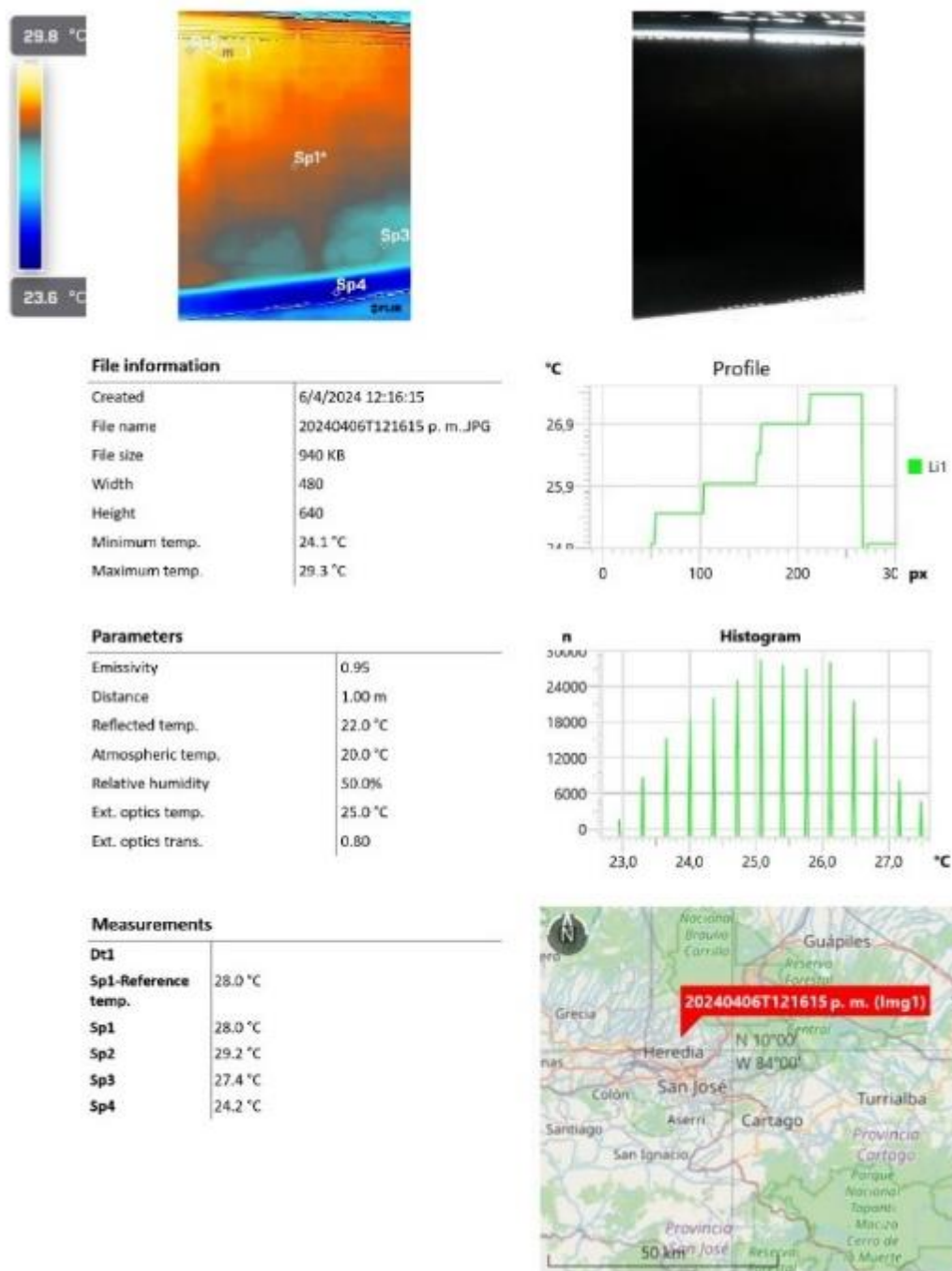


Figura No. 3. 14 Reporte térmico de FLIR Thermal Studio

Fuente: Elaboración propia

3.4. Adaptación de los datos a cada caso práctico de servicios de consultoría en ingeniería y arquitectura

3.4.1. Primera área de estudio

Se investigó digitalmente la tramitología constructiva requerida para que una obra comercial obtuviera planos constructivos sellados y contará con la aprobación del permiso de construcción, de acuerdo a la normativa del CFIA y de la municipalidad de San Ramón.

Así las cosas, se ingresó en los diferentes sitios web de instituciones, se investigó y analizó cada uno de los requisitos, y posteriormente, se tabularon secuencialmente los resultados que integran toda la tramitología, desde el paso inicial hasta el último requisito que otorga el permiso de construcción.

Seguidamente, el grupo de requisitos se clasificó por fases y se desglosaron de acuerdo a los que sí tenían reciprocidad con la teledetección y los que no, para inmediatamente profundizar la investigación de los aspectos más relevantes del trámite y su correspondencia con la temática LiDAR.

3.4.2. Segunda área de estudio

Se contó con una serie de documentación en formato PDF, de inspecciones oculares realizadas por el Programa de Ingeniería Estructural, de la Unidad de Puentes, del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la UCR, efectuadas el 11 de junio de 2021. Los datos fueron remitidos al Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) para su correspondiente análisis y este último, los facilitó como insumo en la presente investigación.

LANAMME-UCR subdividió el puente (que conforma parte de este estudio) en diez secciones, para cada una se confeccionó un documento PDF, con la información del análisis de resultados, en donde se agrupó en tres partes: un cuadro de daños y evaluación, un espacio observaciones y otro para fotografías.

Para la primera parte, conformó un cuadro con los tipos de daño y la evaluación del grado de daño, donde se enumeró quince aspectos:

1. Pavimento
2. Barandas de acero
3. Barandas de concreto
4. Junta de expansión
5. Losa
6. Viga principal de acero
7. Sistema de arriostramiento
8. Pintura

9. Viga principal de concreto
10. Viga diafragma de concreto
11. Apoyos
12. Pared cabezal y aletones
13. Bastión principal
14. Martillo (pila)
15. Cuerpo principal (pila)

En cada uno de los elementos citados, se enlistaron los daños y se asignó un valor de 0 a 5 de acuerdo al grado del daño. Siendo 0 cuando no aplica, 1 la calificación para ningún daño visible, 2 en pocos lugares, 3 en muchos lugares, 4 en menos de la mitad, 5 en la mayoría de las partes. Sin embargo, la escala de revisión nunca se aplicó. Actualmente las inspecciones en otros puentes se basan en una tabla de evaluación para cada daño. A continuación, se muestra el análisis de resultados original del puente Rafael Iglesias Castro.

INSPECCIÓN DE PUENTE										NÚMERO DE SUPERESTRUCTURA			3			Página 1 de 5						
NOMBRE DEL PUENTE	RAFAEL IGLESIAS (RÍO COLORADO)									LOCALIZACIÓN	PROVINCIA	ALAJUELA	ENCARGADO	ZONA 1-5 ALAJUELA NORTE			DÍA	MES	AÑO			
CONOCIDO COMO											CANTÓN	GRECIA	LATITUD NORTE	10.0°	1.0'	18.3"	FECHA DE DISEÑO		7	1968		
ESTADO PUENTE	HABILITADO										DISTRITO	PUENTE DE PIEDRA	LONGITUD OESTE	84.0°	21.0'	30.75"	FECHA DE CONSTRUCCIÓN		5	1972		
RUTA N°	1	RUTA	PRIMARIO	KILÓMETRO			34.38 km						FECHA DE REHABILITACION									
TIPO DE DAÑO Y EVALUACIÓN DEL GRADO DE DAÑO																						
1. PAVIMENTO	ITEM	1. ONDULACIÓN	2. ZURCOS	3. AGRIETAMIENTO	4. BACHES	5. SOBRECAPAS DE ASFALTO																
	EVALUACIÓN	0	0	0	0	0																
2. BARANDA (ACERO)	ITEM	1. DEFORMACIÓN	2. OXIDACIÓN	3. CORROSIÓN	4. FALTANTE																	
	EVALUACIÓN	1	1	1	1																	
3. BARANDA (CONCRETO)	ITEM	1. AGRIETAMIENTO	2. ACERO DE REFUERZO EXPUESTO	3. FALTANTE																		
	EVALUACIÓN	1	1	1																		
4. JUNTA DE EXPANSIÓN	ITEM	1. SONIDOS EXTRAÑOS	2. FILTRACION DE AGUAS	3. FALTANTE O DEFORMACIÓN	4. MOVIMIENTO VERTICAL	5. JUNTAS	6. ACERO DE															
	EVALUACIÓN	0	0	0	0	0	0															
5. LOSA	ITEM	1. GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN	2. GRIETAS EN DOS DIRECCIONES	3. DESCASCAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	6. EFLORENCIA	7. ZAGUJEROS														
	EVALUACIÓN	4	5	2	1	1	4	1														
6. VIGA PRINCIPAL DE ACERO	ITEM	1. OXIDACIÓN	2. CORROSIÓN	3. DEFORMACIÓN	4. PERDIDA DE PERNOS	5. GRIETAS EN SOLDADURA O PLACA																
	EVALUACIÓN	0	0	0	0	0																
7. SISTEMA DE ARRIOSTRAMIENTO	ITEM	1. OXIDACIÓN	2. CORROSIÓN	3. DEFORMACIÓN	4. ROTURA DE UNIONES	5. ROTURA DE ELEMENTOS																
	EVALUACIÓN	0	0	0	0	0																
8. PINTURA	ITEM	1. DECOLORACIÓN	2. AMPOLLAS	3. DESCASCAMIENTO																		
	EVALUACIÓN	0	0	0																		
9. VIGA PRINCIPAL DE CONCRETO	ITEM	1. GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN	2. GRIETAS EN DOS DIRECCIONES	3. DESCASCAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	6. EFLORENCIA															
	EVALUACIÓN	1	1	1	1	1	2															
10. VIGA DIAFRAGMA CONCRETO	ITEM	1. GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN	2. GRIETAS EN DOS DIRECCIONES	3. DESCASCAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	6. EFLORENCIA															
	EVALUACIÓN	1	1	3	1	1	2															
11. APOYOS	ITEM	1. ROTURA DE APOYOS	2. DEFORMACIÓN EXTRAÑA	3. INCLINACIÓN	4. DESPLAZAMIENTO																	
	EVALUACIÓN	0	0	0	0																	
12. PARED CABEZAL Y ALETONES (BASTIONES)	ITEM	1. GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN	2. GRIETAS EN DOS DIRECCIONES	3. DESCASCAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	6. EFLORENCIA	7. PROTECCIÓN DE TERRAPLEN														
	EVALUACIÓN	0	0	0	0	0	0	0														
13. CUERPO PRINCIPAL (BASTION)	ITEM	1. GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN	2. GRIETAS EN DOS DIRECCIONES	3. DESCASCAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	6. EFLORENCIA	7. PENDIENTE EN TALUDES	8. INCLINACIÓN	9. SOCACAVACIÓN												
	EVALUACIÓN	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
14. MARTILLO (PILA)	ITEM	1. GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN	2. GRIETAS EN DOS DIRECCIONES	3. DESCASCAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	6. EFLORENCIA															
	EVALUACIÓN	3	1	3	4	1	3															
15. CUERPO PRINCIPAL (PILA)	ITEM	1. GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN	2. GRIETAS EN DOS DIRECCIONES	3. DESCASCAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	6. EFLORENCIA	7. INCLINACIÓN	8. SOCACAVACIÓN													
	EVALUACIÓN	4	1	1	1	1	3	1	1													
EVALUACIÓN		GRADO DEL DAÑO			SOCACAVACIÓN																	
1	Ningún daño visible	No se observa socavación																				
2	En pocos lugares	No aplica																				
3	En muchos lugares	Se observa socavación pero no se extiende a la fundación																				
4	En menos de la mitad	No aplica																				
5	En la mayoría de las partes	La fundación aparece por la socavación																				
					FECHA INSPECCIÓN	NOMBRE INSPECTOR					FIRMA											
					11	6	2021	LUIS GUILLERMO VARGAS ALAS														

Figura No. 3. 15 Detalle de tipos de daño y la evaluación del grado de daño según la inspección.

Fuente: (LANAMME-UCR, 2021)

Entre los daños enlistados figuran, ondulaciones, zurcos, agrietamientos, baches, sobre capas de asfalto, deformaciones, oxidación, corrosión, faltantes, acero de refuerzo expuesto,

grietas en una o dos direcciones, roturas, descascaramientos, nidos de piedra, filtraciones de agua, eflorescencia, agujeros, ampollas en pintura, decoloración de pintura.

En cada documento PDF, LANAMME-UCR fijó un espacio de observaciones, en donde se amplió y brindó pormenores sobre los daños y su grado de calificación (Figura No. 3. 16).

INSPECCIÓN DE PUENTE				NÚMERO DE SUPERESTRUCTURA				3			Página 3 de 5			
NOMBRE DEL PUENTE	RAFAEL IGLESIAS (RÍO COLORADO)			LOCALIZACIÓN	PROVINCIA	ALAJUELA	ENCARGADO	ZONA 1-5 ALAJUELA NORTE			DÍA	MES	AÑO	
CONOCIDO COMO					CANTÓN	GRECIA	LATITUD NORTE	10.0°	1.0°	18.3°	FECHA DE DISEÑO		7	1968
ESTADO PUENTE	HABILITADO				DISTRITO	PUENTE DE PIEDRA	LONGITUD OESTE	84.0°	21.0°	30.75°	FECHA DE CONSTRUCCIÓN		5	1972
RUTA N°	1	RUTA	PRIMARIO	KILÓMETRO	34.38 km				FECHA DE REHABILITACION					
<p>PROVENIENTES DESDE LA LOSA, QUE SE HAN IDO ACUMULANDO EN LA SUPERFICIE DE LAS VIGAS. ESTA DEFICIENCIA SE CALIFICÓ COMO GRADO DE DAÑO 2 EN EFLORESCENCIA, YA QUE LAS MANCHAS NO PROVIENEN DIRECTAMENTE DE LAS VIGAS.</p> <p>3. VIGAS DIAFRAGMA DE CONCRETO REFORZADO - EN APROXIMADAMENTE UN 25 % DE LA LONGITUD TOTAL DE VIGAS DEL TRAMO N° 3 SE OBSERVARON EFLORESCENCIAS Y MANCHAS DE HUMEDAD, DEBIDO A FILTRACIONES DE AGUA PROVENIENTES DESDE LA LOSA, QUE SE HAN IDO ACUMULANDO EN LA SUPERFICIE DE LAS VIGAS. ESTA DEFICIENCIA SE CALIFICÓ COMO GRADO DE DAÑO 2 EN EFLORESCENCIA, YA QUE LAS MANCHAS NO PROVIENEN DIRECTAMENTE DE LAS VIGAS. - SE OBSERVÓ UN DESPRENDIMIENTO DE CONCRETO PUNTUAL EN LA UNIÓN DE LA VIGA DIAFRAGMA DEL EXTREMO, SOBRE LA PILA N.º 2 Y LA VIGA PRINCIPAL. SE ESTIMA UNA EXTENSIÓN DE UN 1 %, CON PROFUNDIDAD ESTIMADA MENOR QUE 25 MM Y DIMENSIÓN MÁXIMA ESTIMADA DE 150 MM. ESTA DEFICIENCIA SE CALIFICÓ COMO GRADO DE DAÑO 3 EN DESCASCARAMIENTO.</p> <p>4. APOYOS - LAS VIGAS PRINCIPALES DEL TRAMO N.º 3 ESTÁN UNIDAS DE FORMA RÍGIDA A LAS PILAS N.º 2 Y N.º 3, POR LO QUE NO SE EVALÚAN LOS APOYOS.</p> <p>***SUBESTRUCTURA **** - EN ESTE TRAMO SE EVALÚA ÚNICAMENTE LA PILA N.º 2 (PILA INCLINADA).</p> <p>1. VIGA CABEZAL (MARTILLO) DE LA PILA N.º 2 - EN APROXIMADAMENTE UN 5 % DEL ANCHO DE LA VIGA CABEZAL DE LA PILA N.º 2 SE OBSERVARON EFLORESCENCIAS Y FILTRACIONES DE AGUA. LAS CUALES SE MUESTRAN COMO PEQUEÑAS MANCHAS EN LA SUPERFICIE DE CONCRETO. ESTA DEFICIENCIA SE CALIFICÓ COMO GRADO DE DAÑO 2 EN EFLORESCENCIA, SIN EMBARGO, NO SE REFLEJA EN EL SAEP AL EXISTIR UNA DEFICIENCIA DEL MISMO TIPO, PERO CON MAYOR SEVERIDAD. - SE OBSERVÓ AGRIETAMIENTO PUNTUAL (EXTENSIÓN APROXIMADA DE 1 %) EN EL EXTREMO NOROESTE Y EL COSTADO AGUAS ABAJO DEL BLOQUE DE CABEZAL DE LA PILA N.º 2. LAS GRIETAS SE ESTIMA QUE TIENEN ANCHOS ENTRE 0,30 MM Y 1,0 MM. ADEMÁS, ALREDEDOR DE LAS GRIETAS SE OBSERVARON MANCHAS DE HUMEDAD DE POSIBLES FILTRACIONES O EFLORESCENCIAS. ESTA DEFICIENCIA SE CALIFICÓ COMO GRADO DE DAÑO 3 EN GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN Y GRADO DE DAÑO 3 EN EFLORESCENCIAS. - ADEMÁS, EN EL EXTREMO NOROESTE Y EL COSTADO AGUAS ARRIBA DEL BLOQUE DE CABEZAL DE LA PILA N.º 2, SE OBSERVARON DESPRENDIMIENTOS DE CONCRETO (CON PROFUNDIDAD ESTIMADA MENOR QUE 25 MM Y DIMENSIÓN MÁXIMA ESTIMADA MENOR QUE 150 MM), EN LOS CUALES, SE OBSERVA ACERO DE REFUERZO EXPUESTO Y OXIDADO. ESTAS DEFICIENCIAS TAMBIÉN SON PUNTUALES, CON EXTENSIÓN ESTIMADA DE UN 1 %, ALREDEDOR DE LOS DESPRENDIMIENTOS SE OBSERVARON MANCHAS DE HUMEDAD DE POSIBLES FILTRACIONES O EFLORESCENCIAS. ESTA DEFICIENCIA SE CALIFICÓ COMO GRADO DE DAÑO 3 EN DESCASCARAMIENTO, GRADO DE DAÑO 4 EN ACERO DE REFUERZO EXPUESTO Y GRADO DE DAÑO 3 EN EFLORESCENCIAS.</p> <p>3. CUERPO DE LA PILA N.º 2 - EN LA VIGA DE UNIÓN DE LAS COLUMNAS DE LA PILA INCLINADA N.º 2 SE OBSERVÓ AGRIETAMIENTO EN UNA DIRECCIÓN CON PATRÓN DE GRIETAS POR CORTANTE. EL ANCHO DE GRIETA FUE DE APROXIMADAMENTE ENTRE 0,30 MM Y 1,00 MM. LA EXTENSIÓN DE ESTE AGRIETAMIENTO SE ESTIMÓ EN UN 5 % DE LA SUMA DE LAS ALTURAS DE LAS COLUMNAS. EN EL COSTADO NOROESTE DE LA PILA SE OBSERVÓ EFLORESCENCIA A LO LARGO DE LAS GRIETAS. ESTA DEFICIENCIA SE CALIFICÓ COMO GRADO DE DAÑO 4 EN GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN Y GRADO DE DAÑO 3 EN EFLORESCENCIA.</p>														

Figura No. 3. 16 Detalle observaciones para los tipos de daño según la inspección.

Fuente: (LANAMME-UCR, 2021)

Para la tercera parte de las fichas, LANAMME-UCR estableció al final de cada documento PDF un espacio de fotografías y esquema de deficiencias, en donde, de una manera más gráfica, se detalló nuevamente sobre los daños de mayor relevancia, según se muestra en la siguiente figura.

INSPECCIÓN DE PUENTE										NÚMERO DE SUPERESTRUCTURA			3			Página 4 de 5		
NOMBRE DEL PUENTE		RAFAEL IGLESIAS (RÍO COLORADO)			LOCALIZACIÓN	PROVINCIA	ALAJUELA	ENCARGADO	ZONA 1-5 ALAJUELA NORTE			DÍA	MES	AÑO				
CONOCIDO COMO						CANTÓN	GRECIA	LATITUD NORTE	10.0°	1.0'	18.3"	FECHA DE DISEÑO						
ESTADO PUENTE		HABILITADO				DISTRITO	PUENTE DE PIEDRA	LONGITUD OESTE	84.0°	21.0'	30.75"	FECHA DE CONSTRUCCIÓN						
RUTA N°	1	RUTA	PRIMARIO	KILÓMETRO	34.38 km			FECHA DE REHABILITACIÓN										
FOTOGRAFÍAS																		
No.	14	UBICACIÓN	TABLERO DE CONCRETO (RAMO N° 3)			No.	15	UBICACIÓN	SUPERESTRUCTURA (RAMO N° 3)			No.	16	UBICACIÓN	SUPERESTRUCTURA (RAMO N° 3)			
																		
NOTA: ADEPTAMIENTO EN UNIA Y DOS DIRECCIONES DEL TABLERO DEL TRAMO N° 3. DÍA: 11, MES: 6, AÑO: 2021			NOTA: MANCHAS DE HUMEDAD Y EFLORESCENCIAS ACUMULADAS EN VIGAS PRINCIPALES Y VIGAS DIAPHRAMA DEL TRAMO N° 3. DÍA: 11, MES: 6, AÑO: 2021			NOTA: MANCHAS DE HUMEDAD, EFLORESCENCIAS ACUMULADAS Y DESPRENDIMIENTO DE CONCRETO PUNTUAL EN VIGAS PRINCIPALES Y VIGAS DIAPHRAMA DEL TRAMO N° 3. DÍA: 11, MES: 6, AÑO: 2021												
No.	17	UBICACIÓN	VIGA CABEZAL PILA N° 2			No.	18	UBICACIÓN	CUERPO PILA N° 2			No.	42	UBICACIÓN	ESQUEMAS DE DEFICIENCIAS 1 4			
																		
NOTA: MANCHAS DE HUMEDAD, EFLORESCENCIAS ACUMULADAS Y ACERO EXPUESTO EN VIGA CABEZAL DE LA PILA N° 2. DÍA: 11, MES: 6, AÑO: 2021			NOTA: ADEPTAMIENTO EN UNIA Y DOS DIRECCIONES DEL TABLERO DEL TRAMO N° 3. DÍA: 11, MES: 6, AÑO: 2021			NOTA: ESQUEMAS DE DEFICIENCIAS. DÍA: 21, MES: 9, AÑO: 2021												

Figura No. 3. 17 Detalle fotografías y esquemas para los tipos de daño según la inspección.
 Fuente: (LANAMME-UCR, 2021)

Con base en las subdivisiones (diez secciones) establecidas para la inspección del puente (Figura No. 3. 18), en la presente investigación se determinaron los tipos de daño de mayor relevancia por sección, y se compararon con los resultados de las observaciones térmicas de campo, a efectos de analizar el grado de reciprocidad entre metodologías.

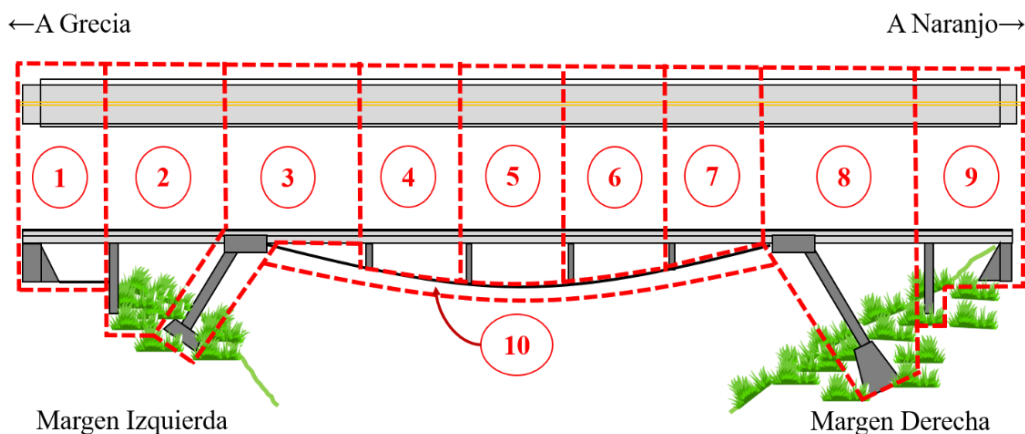


Figura No. 3. 18 Subdivisión por secciones establecidas para la inspección del puente
 Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4: Resultados

4.1. Primera área de estudio

Para analizar la utilidad de los datos LiDAR, se centra la atención en un ejemplo de implementación de un diseño de una obra, específicamente el flujo de permisos requerido para su aprobación en el campo de los servicios de consultoría en arquitectura. La introducción de los datos LiDAR ilustra el alcance de su contribución, al proporcionar información técnica que brinde apoyo en las decisiones a tomar para el desarrollo del trabajo.

A continuación, se muestra la nube de puntos LAS clasificada producto del procesamiento en el software Global Mapper. Bajo los estándares de las ASPRS se alcanzó un 6.15 % de datos sin clasificar, la nube de puntos está compuesta por las siguientes categorías de clasificación (Figura No. 4. 1).

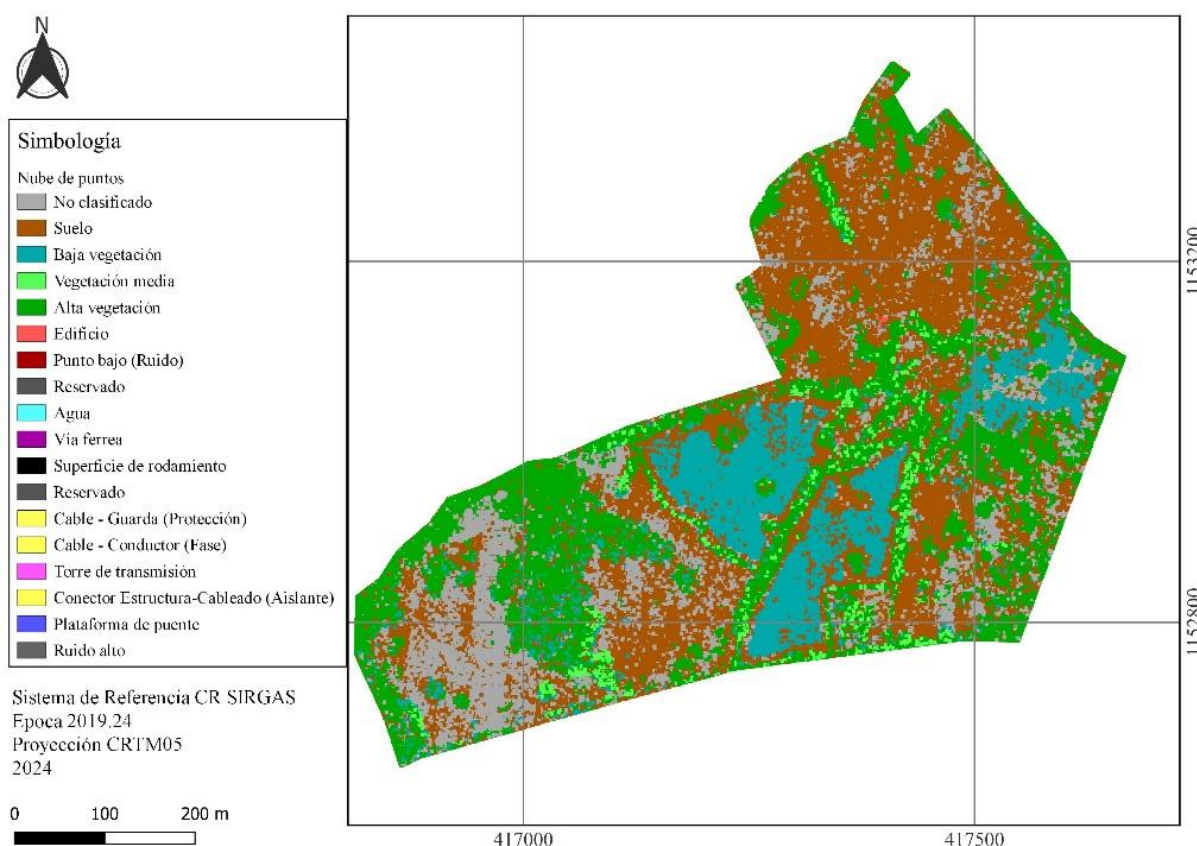


Figura No. 4. 1 Nube de puntos LAS clasificada

Fuente: Elaboración propia

En el software Global Mapper se efectuó un filtrado de la categoría ASPRS del suelo a partir de la nube de puntos clasificada, esta información se exportó a través de un DTM en formato TIFF. Posteriormente, en un software SIG se depuró el insumo y se obtuvo mediante una interpolación TIN el MDE del área de estudio (Figura No. 4. 2).

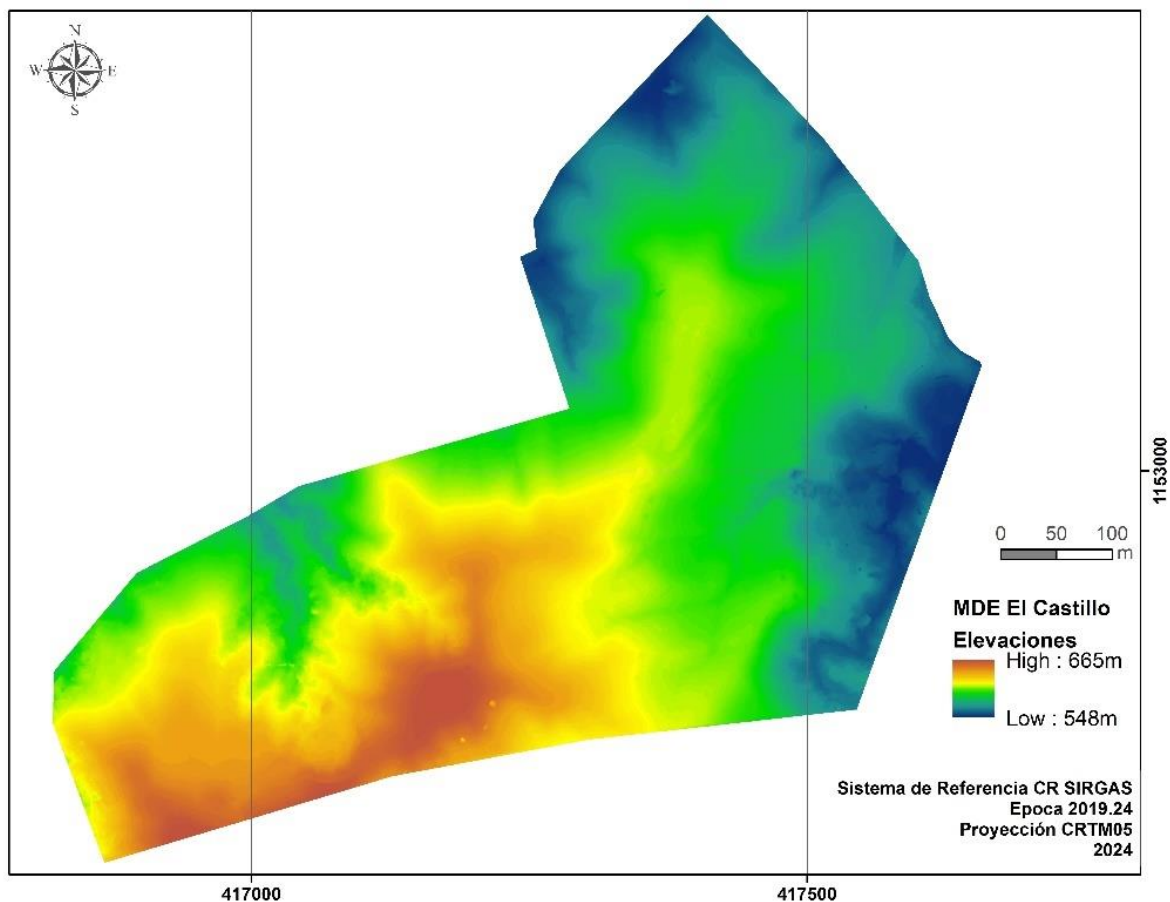


Figura No. 4. 2 MDE confeccionado

Fuente: Elaboración propia

Respecto al MDE confeccionado, la elevación más baja se encuentra en 548 m, la más alta es de 665 m y la elevación promedio es de 602 m. El tamaño de celda obtenido fue de 0.16 m, el valor de elevación en cada celda fue calculado utilizando el valor de la celda más cercana del ráster de entrada (DTM). La asignación del vecino más cercano no cambia ninguno de los valores de las celdas de la capa de entrada; por esta razón, a menudo se utiliza para volver a muestrear datos categóricos o enteros como las imágenes producidas con sensores remotos.

Para poder verificar la aplicabilidad de los datos LiDAR a partir de la creación del MDE, se tomó como ejemplo un servicio de consultoría en arquitectura, enfocándose en la tramitología necesaria para la obtención del permiso de construcción de una obra comercial.

Por consiguiente, en el Cuadro No. 4. 1 se detalla el conjunto de requisitos que toda obra comercial nueva debe cumplir para obtener el permiso de construcción en el cantón de San Ramón. Seguidamente se enfatiza y demuestra mediante mapas SIG, los requisitos donde los resultados del procesamiento de datos LiDAR pueden utilizarse como fuente de información alternativa para obtener la aprobación correspondiente.

Cuadro No. 4. 1 Resumen de requisitos para obtener permiso de construcción para obra comercial en San Ramón

Fase		Institución donde se tramita	Documentación a tramitar		Aplicabilidad de insumos LiDAR
I	Trámite de estudios básicos	Municipalidad	1	Declaración de bienes inmuebles	No
			2	Visado del plano de catastro	No
			3	Certificado de uso de suelo	No
			4	Certificado de recolección de desechos sólidos	No
			5	Disponibilidad de agua potable	No
			6	Autorización de desfogue Pluvial	Sí
		Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)	7	Solicitud de dictamen sobre cuerpos de agua	No
		Comisión Nacional de Emergencias (CNE)	8	Riesgos y amenazas naturales	Si
		Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL)	9	Disponibilidad de servicio eléctrico	No
		Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)	10	Certificado de no afectación líneas de alta tensión	No
		Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)	11	Dictamen de estudio hidrogeológico	Si
		Ministerio de Salud	12	Visto bueno para ubicación de planta de tratamiento	Sí
		Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA)	13	Viabilidad ambiental	Si
II	Trámite de anteproyecto de diseño	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA)	14	Ingreso de planos constructivos, estudio de diseño pluvial y memorias de cálculo de consumo agua potable y diseño sanitario, planos constructivos de obras conexas, por ejemplo, tanque de retardo al Administrador de Proyectos de Construcción (APC)	Si
			15	Pagos de timbres y derechos	No
			16	Revisión y aprobación de Ingeniería de Bomberos	Si

Fase		Institución donde se tramita	Documentación a tramitar		Aplicabilidad de insumos LiDAR	
				documentación del APC por parte de otras instituciones	Acueductos y Alcantarillados (AYA) Ministerio de Salud	
				Municipalidad	17	Revisión y aprobación de documentación del APC
				18	Pagos de timbres y permiso municipal	No
		Instituto Nacional de Seguros (INS)	19	Póliza	No	
III	Trámite de diseño definitivo	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA)	20	Ingreso de planos constructivos, estudio de diseño pluvial y memorias de cálculo de consumo agua potable y diseño sanitario, planos constructivos de obras conexas, por ejemplo, tanque de retardo al Administrador de Proyectos de Construcción (APC)	Si	
			21	Pagos de timbres y derechos	No	
			22	Revisión y aprobación de documentación del APC por parte de otras instituciones	Ingeniería de Bomberos Acueductos y Alcantarillados (AYA) Ministerio de Salud	Sí
		Municipalidad		23	Revisión y aprobación de documentación del APC	Si
				24	Pagos de timbres y permiso municipal	No
		Instituto Nacional de Seguros (INS)	25	Póliza	No	

Fuente: Elaboración propia

4.1.1. Fase I, trámite de estudios básicos

Se identificó la aplicabilidad de los datos LiDAR en los ítems Nos. 6, 8, 11, 12 y 13 (Cuadro No. 4. 1). Los cuales se desarrollan a continuación:

4.1.1.1. Autorización de desfogue pluvial

Se efectúa cuando las áreas impermeables en las obras de los proyectos (techos, parqueos, calles, otros) sobrepasan el área mínima, por ejemplo, 400 m² o en movimientos de tierra a partir de determinado volumen mínimo, por ejemplo, 200 m³. Las cantidades mínimas anteriores pueden variar entre municipalidades, de acuerdo a su reglamentación vigente.

Para obtener la aprobación se debe presentar: un plano de perfil topográfico del sitio de desfogue. Copia del plano catastro de la propiedad. Diseño en planta de los elementos a desfogar (cubiertas de las estructuras, superficies de concreto, asfalto, en adoquines u otro elemento impermeable). Estudio hidrológico de la cuenca que conforma el cauce al cual se desfogará. Diseño de un sistema de alivio o retención de aguas. Presentación del número de proyecto de planos constructivos sellados por el CFIA (solo si es solicitado por la municipalidad).

Para el caso de desfogues en Rutas Nacionales, se solicita aportar visto bueno del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) donde autorice el rompimiento de la vía. Asimismo, en los casos de cauces que no estén inscritos como públicos en los registros municipales, se solicita certificación del MINAE.

Por otro lado, también es requisito posterior a la aprobación, la presentación de un depósito de garantía por las obras a realizar, estimado en función del valor de cada obra. Los requisitos anteriores pueden variar, de acuerdo a la reglamentación vigente según casos especiales de zonificación.

4.1.1.1.1. Análisis de uso de la teledetección

Con la información del MDE es posible:

1. Extraer curvas de nivel del terreno para efectuar el diseño en planta de los elementos a desfogar, el diseño de los sistemas de alivio o retención de aguas y los planos constructivos.
2. Definir la dirección del flujo y el flujo acumulativo del terreno, para describir el comportamiento de la hidrología y las subcuencas existentes en el proyecto.
3. Generar perfiles topográficos de los sitios de drenaje de las aguas pluviales del proyecto a través de un SIG.
4. Estudiar el relieve de la cuenca hidrológica donde se ubica el proyecto.

En la Figura No. 4. 3 se muestran las once subcuencas y los ocho cursos naturales de agua (intermitentes) identificados en el área de estudio. Las subcuencas C5, C6 y C7 son cuencas

tributarias en las que el flujo acumulativo se forma fuera del área de proyecto. Las subcuencas C1, C2, C3 y C11 cuentan con flujos acumulativos formados dentro del área de proyecto, no obstante, desfogan en los sistemas de drenaje de la vía pública. Las subcuencas C9 y C10 presentan flujos acumulativos formados dentro del área de proyecto, el flujo es conducido hasta la Quebrada Tigra. La subcuenca C4 cuenta con un flujo acumulativo intermitente que conduce las aguas hasta una quebrada sin nombre.

Por consiguiente, el flujo acumulativo de la subcuenca C4 es la ubicación más óptima para solicitar y aprobar la autorización de desfogue pluvial. Debido a que el flujo acumulativo se origina en la propiedad, está conectado directamente con la quebrada sin nombre (que limita la propiedad al este) y se descargaría el agua en el Lago Arenal.

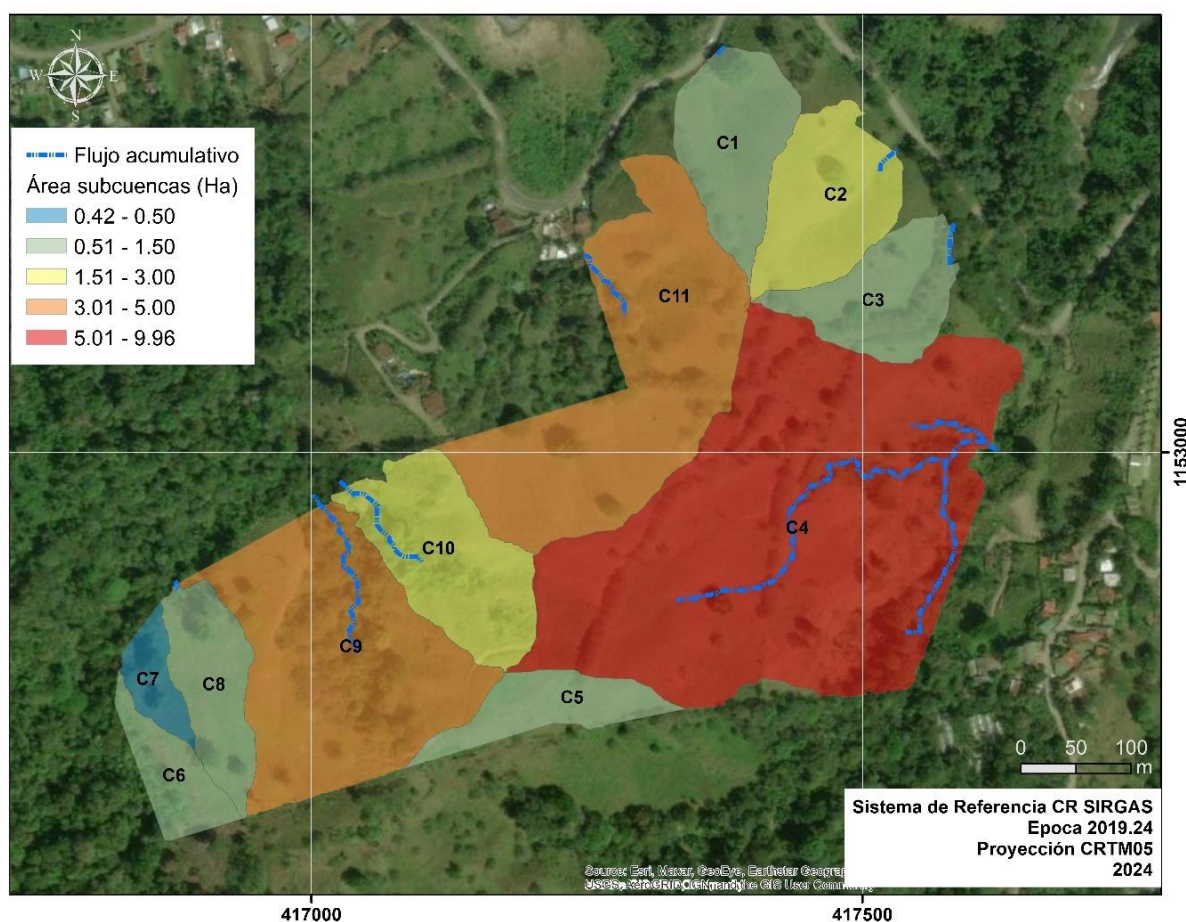


Figura No. 4. 3 Subcuencas y flujo acumulativo en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2. Riesgos y amenazas naturales

La CNE ha elaborado mapas de amenazas preliminares del país, en su mayoría con fuentes a escala 1:50,000. Los mapas se consideran como una aproximación del inventario de fuentes de amenazas del territorio, debido a la escala y a la ausencia de información base con la que se confeccionaron.

La CNE indicó que la información debe utilizarse como una orientación general de referencia sobre el tema y en ningún momento, aplicarse como sustituto de informes y mapas técnicos especializados realizados a menor escala y conforme a las metodologías establecidas para identificación y cartografiado de amenazas (CNE, 2024).

En San Ramón, los mapas de amenazas hidrometeorológicas han señalado que los ríos y quebradas son puntos focales de amenazas y que han disminuido el periodo de recurrencia de inundaciones, no se señaló a El Castillo entre los barrios o zonas donde existe riesgo por inundaciones o flujos de lodo, el proyecto de investigación está rodeado por las quebradas Tigre y sin nombre.

Para las amenazas geológicas se indicó que a unos 30 km al noreste del cantón y muy cerca del distrito Peñas Blancas, existe fallamiento, que en varias ocasiones han sido responsable de actividad importante. La amenaza volcánica se enfatizó en el volcán Poás (sin hacerse mención al volcán Arenal) indicándose que, en caso de una erupción volcánica, los efectos más importantes serían producto de la caída de ceniza y emanación de gases.

Sobre la inestabilidad de suelos (deslizamientos) se indicó que, las características topográficas y geológicas propias del cantón hacen que sea vulnerable a esta clase de fenómenos. Hacia el norte del cantón, existen fuertes pendientes en terrenos compuestos por la acumulación de productos volcánicos. En esta región los deslizamientos pueden ser disparados tanto por sismos, como por las lluvias. Los sectores más vulnerables son aquellos lugares cercanos a los cauces de los principales ríos (CNE, 2024).

4.1.1.2.1. Análisis de uso de la teledetección

Se identificó que el riesgo por amenazas naturales es reducido, por tal motivo no debería existir dificultad para obtener un impedimento en el visto bueno para el permiso de construcción. Sin embargo, la amenaza por deslizamientos es la más representativa, con los datos del terreno, se calculó que la pendiente promedio es de 22° (tonos en color crema de la Figura No. 4. 4). Por tanto, en caso de desarrollarse un proyecto constructivo se debería estimar el índice de vulnerabilidad. En el Decreto Ejecutivo No. 32967, se establece que la categoría de pendiente a asociar para este caso es la ondulada.

Cuando se estima que la pendiente es ondulada, existe cierto grado de inestabilidad que también debe considerar las áreas bajas inmediatamente adyacentes a las laderas, en la

medida de que pueden convertirse en receptoras de deslizamientos, producto de los diferentes tipos de movimientos gravitacionales que las masas pueden experimentar (CNE, 2024).

Con la información del MDE es posible:

1. Generar un mapa de pendientes del terreno y combinar los resultados con otras fuentes de información, para estudiar el factor de estabilidad de la ladera. Por ejemplo, con: espesores de suelos y formaciones superficiales (litopetrofísica). Con la precipitación promedio para los meses más lluviosos de la zona, vinculando la intensidad de lluvias como factor detonador de procesos de inestabilidad de ladera. Con factores de sismicidad y presencia de fallas geológicas activas. Con procesos de erosión y sedimentación. Con la dirección de los taludes respecto a la dirección dominante de las lineaciones.

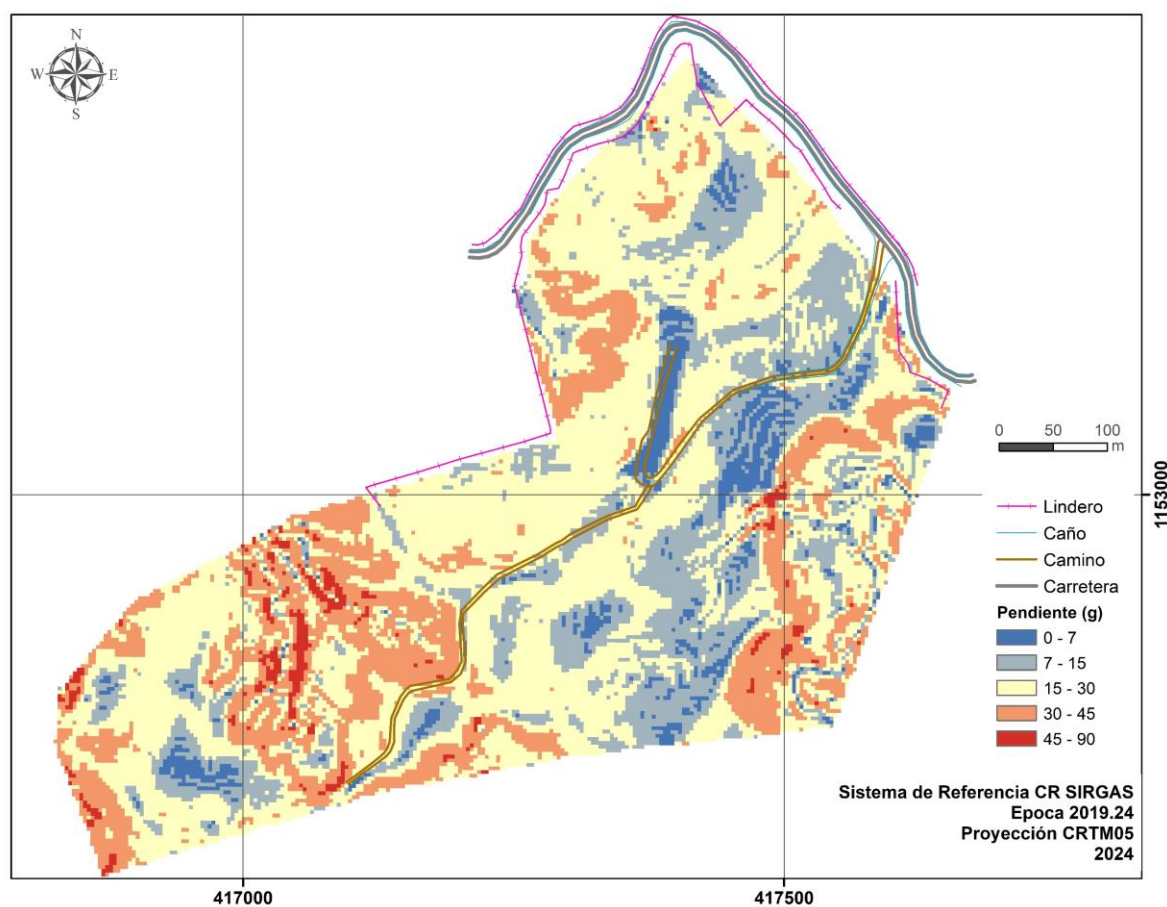


Figura No. 4. 4 Pendiente del terreno en grados

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.3. Dictamen de estudio hidrogeológico

Consiste en una solicitud de revisión y análisis de estudios hidrogeológicos en el sitio donde se propone desarrollar el proyecto. Previo análisis y revisión por parte del SENARA, se emite un criterio técnico sobre las condiciones hidrogeológicas. El objetivo principal es recopilar información que describa la composición y estructura superficial e interna del suelo. Además, información que identifique la existencia de aguas subterráneas, su circulación, interacción con el suelo, estado y captación. En el estudio hidrogeológico también se debe recopilar información climática existente, del proyecto y área circundante.

Para obtenerlo se debe presentar un documento que cumpla con los términos de referencia de la institución (SENARA, 2023), debiendo determinar principalmente el modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos, la vulnerabilidad, la caracterización de las cuencas hidrográficas existentes, cálculo de la recarga y balance hídrico (SENARA, 2024).

4.1.1.3.1. Análisis de uso de la teledetección

Con la información del MDE es posible:

1. Extraer información del terreno, como edificaciones, linderos, curvas de nivel, entre otros, para georreferenciar y representar el proyecto respecto al acuífero o cuenca hidrográfica en estudio, a través de mapas ilustrativos.

En el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), se encuentra el nodo de infraestructura de datos espaciales de SENARA, con base en la capa WFS (*Web Feature Server*, por sus siglas en inglés) del nodo, se ubicó el acuífero Fortuna. En la tabla de atributos se clasifica la vulnerabilidad (alta, media y baja) del acuífero conforme la metodología GOD (*G-Ground water occurrence*, *O- Overall aquifer class*, *D- Depth to groundwater*, por sus siglas en inglés) (Figura No. 4. 5).

En términos generales, GOD considera tres factores para asignar un índice de vulnerabilidad: el grado de confinamiento hidráulico, el tipo de material de cobertura del acuífero u ocurrencia del sustrato y la profundidad al nivel estático. A cada uno de esos factores se asigna un sub índice y el índice total de vulnerabilidad resulta del producto de esos subíndices. Con base en ese índice resultante se asigna una categoría de vulnerabilidad.

Cabe mencionar que, se identificó que el área de estudio (proyecto) se encuentra fuera del polígono del acuífero Fortuna, sin embargo, se estableció una zona de amortiguamiento (*buffer*) de un kilómetro, lo que permite extrapolar y superponer parcialmente la categoría de vulnerabilidad “Media”, con base en el proyecto. Pero, al tratarse de un *buffer*, se puede catalogar la vulnerabilidad como “Baja” para no afectar la validación del dictamen.

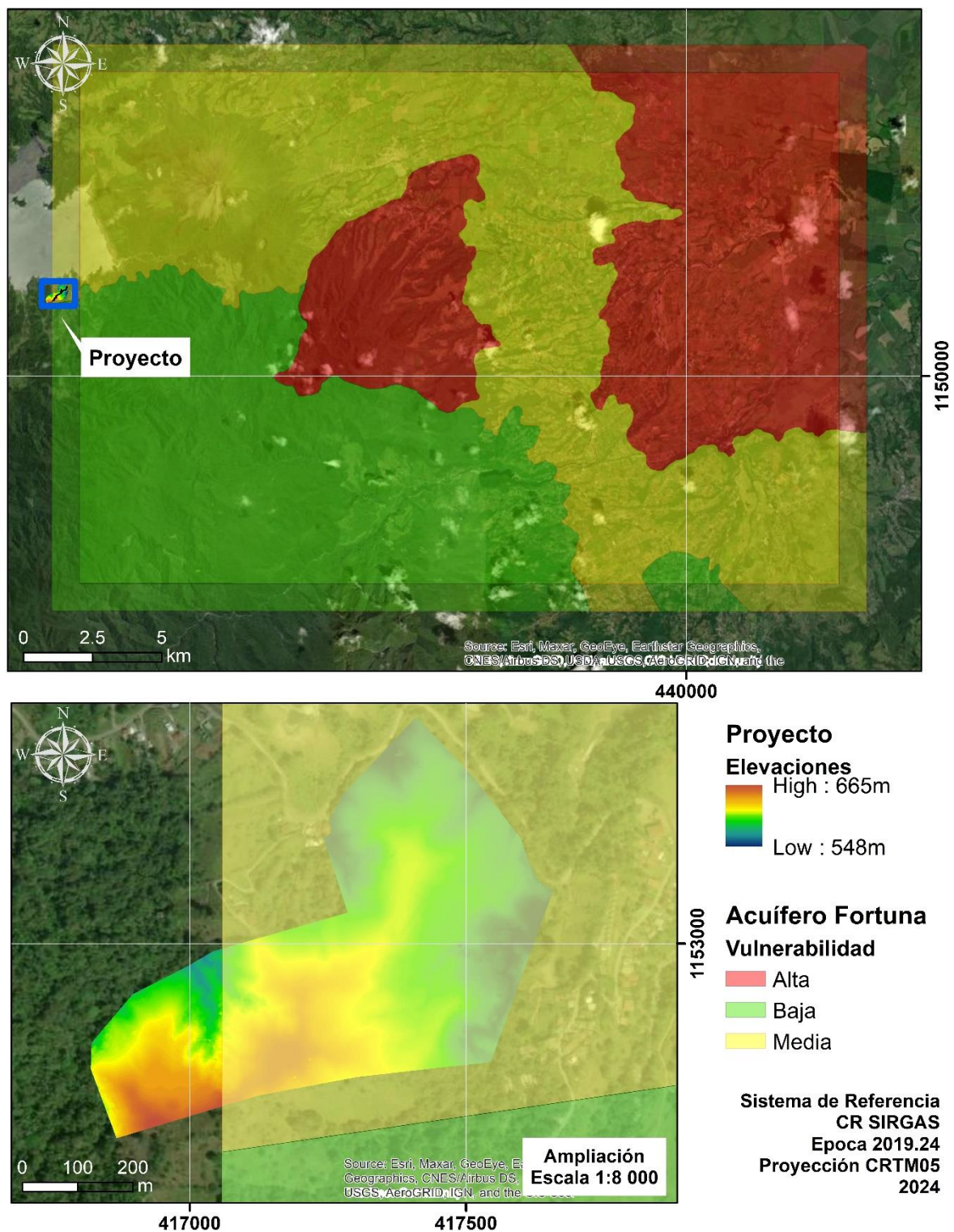


Figura No. 4.5 Vulnerabilidad del acuífero Fortuna
 Fuente: Elaboración propia

4.1.1.4. Visto bueno de ubicación para plantas de tratamientos o sistema de tratamiento de aguas residuales

El trámite consta de presentar un documento de justificación, con el nombre del proyecto, propietario, localización según provincia, cantón y distrito, dirección exacta de la propiedad, breve descripción del proyecto global, acotando la necesidad del sistema de tratamiento (por ejemplo, para uso industrial u otro). Asimismo, se debe describir el tipo de procesos y equipos del sistema de tratamiento propuesto, y la disposición final para las aguas residuales tratadas (Ministerio de Salud, 2024).

Por otro lado, se debe aportar el plano de conjunto del proyecto global, dentro del cual se ubicará el sistema de tratamiento, mostrando sus dimensiones, acotando los retiros a guardar entre el sistema de tratamiento, los linderos de la propiedad y las edificaciones existentes o proyectadas en la misma propiedad. También se debe indicar el cabezal de desfogue o conexión al alcantarillado (si lo hubiera) y la dirección del flujo de los cuerpos de agua que atraviesen o colinden con la propiedad. En el plano de conjunto, se deben ubicar los pozos de abastecimiento de agua existentes o proyectados, dentro de la misma propiedad del proyecto y los pozos de abastecimiento de agua existentes en las propiedades colindantes, en un radio de 100 m de la planta de tratamiento (Ministerio de Salud, 2024).

4.1.1.4.1. Análisis de uso de la teledetección

Con la información del MDE es posible:

1. Los planos de conjunto, por lo general se conforman a partir de la sobreposición de los diseños en la información de topografía, la información del terreno se puede extraer a través de curvas de nivel. Con los datos LAS clasificados, se podría dibujar y detallar los caminos, linderos e infraestructura existente para complementar los acotes de retiros a guardar.

En la siguiente figura se detallan las características existentes en el área de estudio. La cobertura predominante es la de pastos, las construcciones colindantes están alejadas, por consiguiente, se asume que no existen obstáculos naturales importantes que impidan el visto bueno de ubicación de una planta de tratamiento.

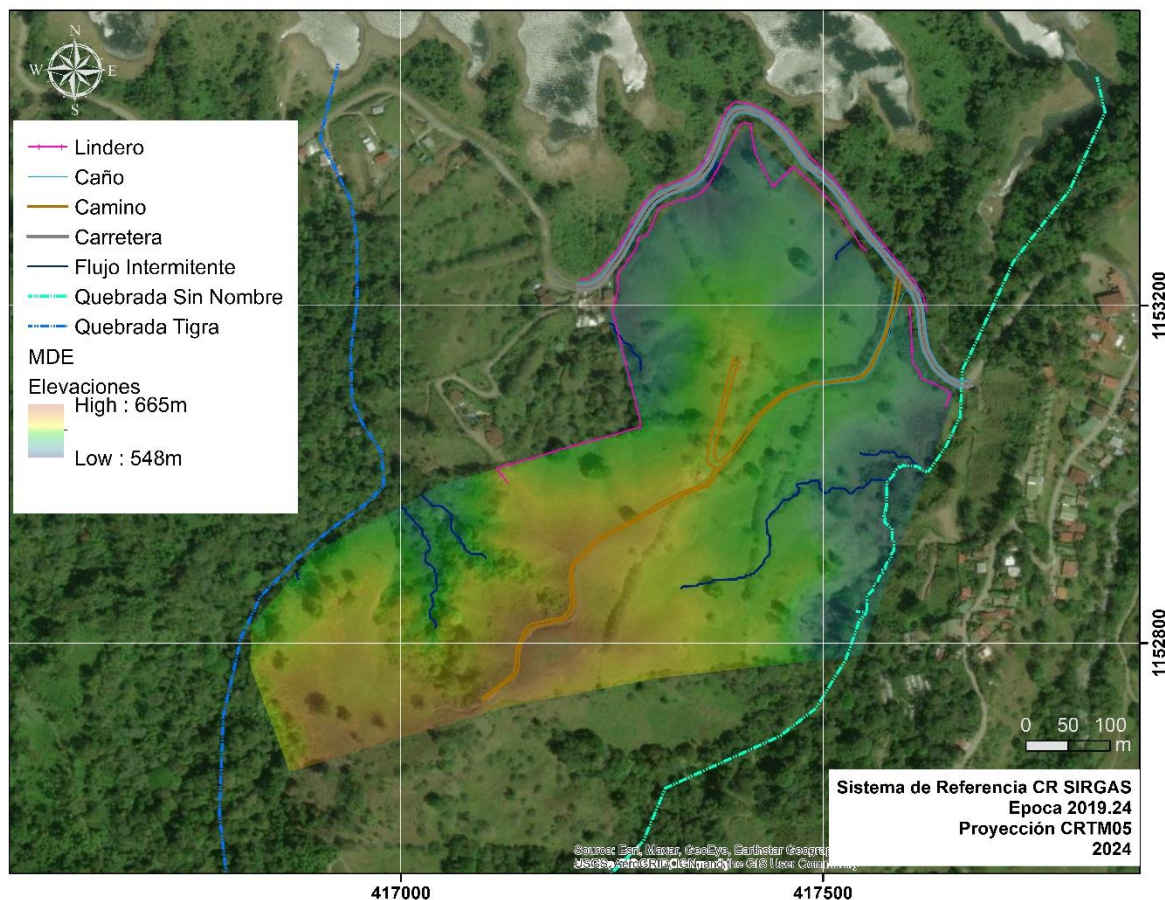


Figura No. 4. 6 Características existentes en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.5. Viabilidad ambiental

Existen cinco diferentes categorías de evaluación para la viabilidad ambiental, D1, D4, D5, D6 y POTS, que se clasifican en función de las especificaciones de cada actividad, obra o proyecto, según se define en el Decreto Ejecutivo No. 43898 (SETENA, 2024).

El área de estudio se encuentra en la categoría D1, al involucrarse la construcción de una edificación nueva de tipo comercial. El formulario D1 se tramita para las actividades de obras y proyectos de bajo, moderado y alto impacto ambiental, en donde el área es igual o superior a 1000 m², en movimientos de tierra iguales o superiores a 1000 m³, cuando los proyectos no se encuentran en cuadrantes urbanos o cuando la significancia de impacto ambiental (SIA) es igual o superior a 330 (SETENA, 2024).

El SIA, es un valor ponderado a partir de cinco variables: impacto aire-tierra (incluye emisiones, ruidos, vibraciones, aguas de escorrentía superficial, aguas residuales), impacto suelo (incluye residuos sólidos y peligrosos), biotopos (incluye la flora y fauna), impacto humano (considera la generación de empleo, movilización de personas, paisaje, patrimonio), otros riesgos (considera los combustibles fósiles y agroquímicos) (SETENA, 2024).

Para solicitar la viabilidad ambiental, se requiere:

- Aportar datos generales, a saber: nombre del proyecto, ubicación del proyecto por provincia, cantón y distrito. Información personal del propietario del proyecto, del representante ante SETENA y del consultor ambiental.
- Realizar una caracterización del área del proyecto, incluyendo: el código de proyecto según las clasificaciones existentes, una descripción del proyecto, e indicar si el uso del suelo es conforme con el proyecto. También se debe mencionar las áreas de la propiedad y del proyecto en metros cuadrados. Presentar información sobre el espacio geográfico donde se realizará el proyecto.
- Presentar el plano general de la actividad, obra o proyecto a desarrollar, conteniendo el conjunto de todos los componentes de infraestructura, con sus respectivos nombres y áreas de desarrollo.
- Presentar una certificación del monto de inversión.
- Tener disponibilidad de servicios básicos y manejo para la generación de residuos del proyecto.
- Tener plano catastro e informe registral de la propiedad.
- Adjuntar información geoespacial en formato SHP, tipo polígono para el plano catastro, y tipo puntos, líneas y polígono, para el área de proyecto.
- Confeccionar la matriz SIA y evaluación ambiental conforme los cuestionarios de la Plataforma Digital de SETENA.
- Presentar un estudio geotécnico de la capacidad soportante o de cimentación para la obra civil. En su defecto, una justificación técnica de la no presentación del estudio.
- Presentar un estudio de hidrología básica del cauce de agua de la microcuenca en que se localiza el área de proyecto. En su defecto, una justificación técnica de la no presentación del estudio.
- Presentar un estudio de hidrogeología. En su defecto, una justificación técnica de la no presentación del estudio.
- Identificar las amenazas naturales, sea mediante trabajo de campo o fuentes de consultas, la información se incluye en formato de tabla.
- Presentar un estudio arqueológico rápido. En su defecto, una justificación técnica de la no presentación del estudio.
- Presentar un estudio biológico. En su defecto, una justificación técnica de la no presentación del estudio.
- Comprobante del pago del trámite.

4.1.1.5.1. Análisis de uso de la teledetección

En general, obtener la viabilidad ambiental implica un conjunto de requisitos que reúnen insumos de diferentes áreas técnicas, no obstante, en aquellos correlacionados a la temática LiDAR no se identifican consecuencias relevantes, por tanto, se considera que es posible obtener la validación del trámite.

La ubicación del proyecto y el plano general de la actividad, deben sustentarse en la topografía del terreno. La Figura No. 4. 6 muestra que es posible extraer contornos de un MDE y mapear carreteras, árboles e infraestructura existente utilizando datos LAS clasificados.

La viabilidad ambiental contempla la presentación de estudios de hidrología e hidrogeología, esta información ya fue analizada en los ítems *4.1.1.1. Autorización de desfogue pluvial* y *4.1.1.3. Dictamen de estudio hidrogeológico*, donde se determinó que, la subcuenca C4 es la más óptima para el desarrollo comercial (Figura No. 4. 3) y que conforme la metodología GOD, la vulnerabilidad del acuífero Fortuna era baja (Figura No. 4. 5).

El número de amenazas naturales identificadas se evaluó en el punto *4.1.1.2. Riesgos y amenazas naturales*, siendo la amenaza por deslizamientos la más representativa según la documentación de la CNE. Sin embargo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** existen varias regiones de poca pendiente (colores café) que son aptos para el desarrollo, pero, la escogencia del sitio debe ocurrir simultáneamente con los resultados del estudio geotécnico (que forma parte de la tramitología de la viabilidad ambiental).

En el SNIT se encuentra el nodo de infraestructura de datos espaciales del Centro Nacional de Información Geoambiental (CENIGA). Con base en la capa WFS de zonas de vida de Holdridge y la clasificación de vulnerabilidad climática del Decreto Ejecutivo No. 32967 se determinó que el proyecto está en medio del índice bajo y moderado. Por otro lado, con base en las capas WFS de áreas silvestres protegidas, de conservación y patrimonio natural del Estado, se determinó que el proyecto no afecta directamente a estas áreas (Figura No. 4. 7).

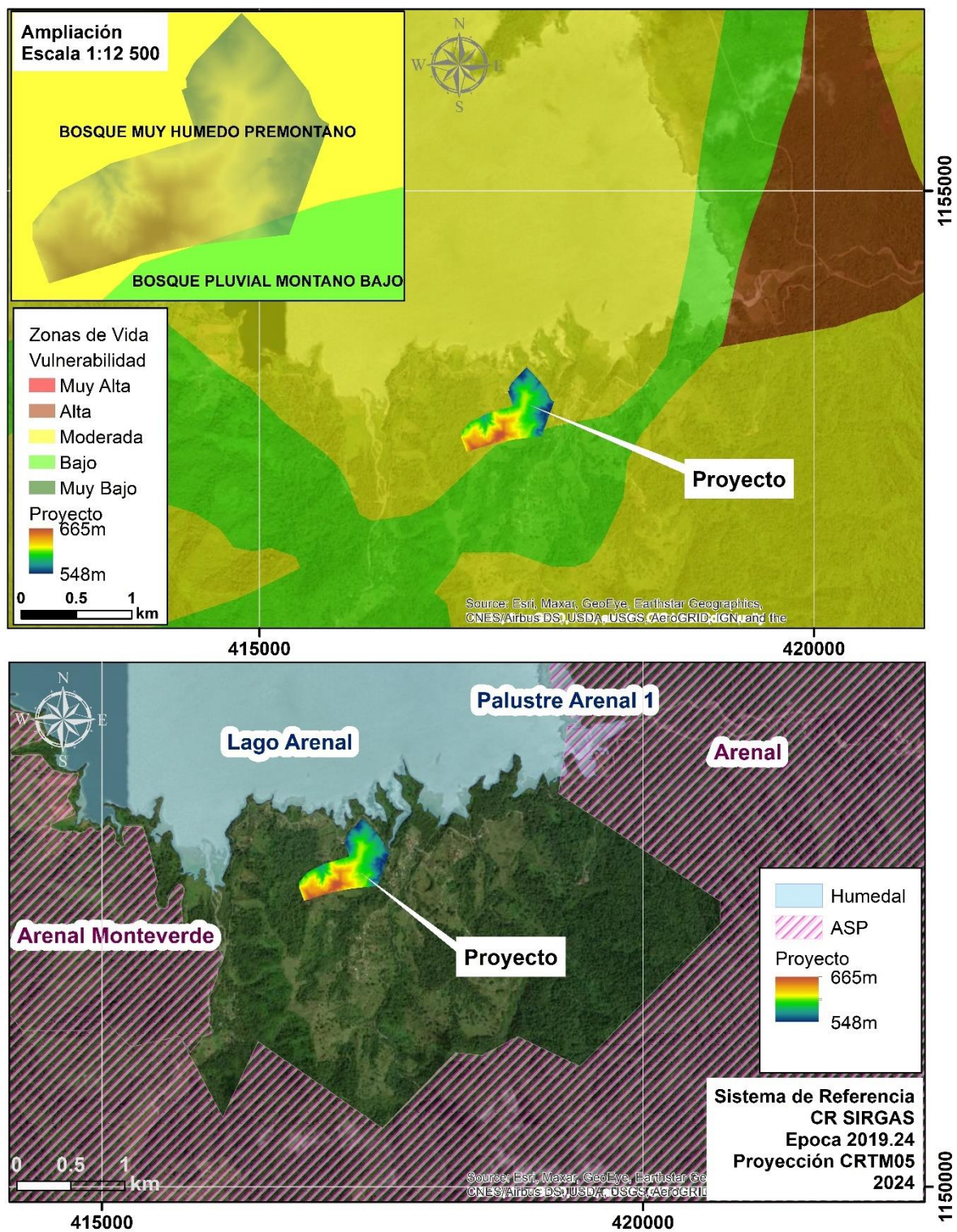


Figura No. 4. 7 Zonas de vida y áreas silvestres protegidas en el área de proyecto
 Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Fases II y III, trámite de anteproyecto y diseño definitivo

Se identificó aplicabilidad de los datos LiDAR en los ítems Nos. 14, 16, 17, 20, 22 y 23 (Cuadro No. 4. 1). Los cuales se desarrollan a continuación:

La documentación a adjuntar e ítems de las fases II y III se relacionan con la secuencia del proceso constructivo; los estudios técnicos (realizados en la fase I) y los planos finales deben ser presentados a las diferentes instituciones involucradas del Cuadro No. 4. 1, para su verificación y aprobación.

El diseño propuesto se presenta de forma preliminar en la fase II y definitiva en la fase III. En estas etapas la utilización de los insumos LiDAR se limita a lo requerido en el área de proyecto, por ejemplo, contornos de elevaciones y detalles topográficos en un área de 1000 m², a diferencia de la fase I, donde se involucran más variables y mayores extensiones de análisis.

En estas dos últimas fases se planifica la forma final del edificio con todos los detalles que componen la obra. La diferencia entre las dos fases radica en que, el diseño arquitectónico de la segunda fase se va consumando con base en los resultados del diseño esquemático y la revisión de instituciones. En cambio, en la fase III ese diseño ya se formalizó y únicamente son objeto de revisión pormenores técnicos, incluyendo especificaciones de detalles de construcción, materiales y costos.

4.1.2.1. Análisis de uso de la teledetección

En el punto *4.1.1. Fase I, trámite de estudios básicos* se ejemplifica cómo los datos del MDE e información de los puntos LAS clasificados se pueden adaptar para el investigar el alcance de los impactos del proyecto en diferentes variables como, hidrología, hidrogeología, amenazas naturales, geotecnia, antropología o biología. Asimismo, cualquier estudio técnico puede utilizar este insumo para generar información geoespacial que complemente su análisis, por ejemplo, mapas que combinan diferentes fuentes.

En la Figura No. 4. 6 y Figura No. 4. 8, se muestra que es posible extraer contornos de un MDE y mapear todos los detalles existentes utilizando los datos LAS clasificados. Con esta información se elaboran los planos topográficos que sirven de base para confeccionar los planos constructivos.

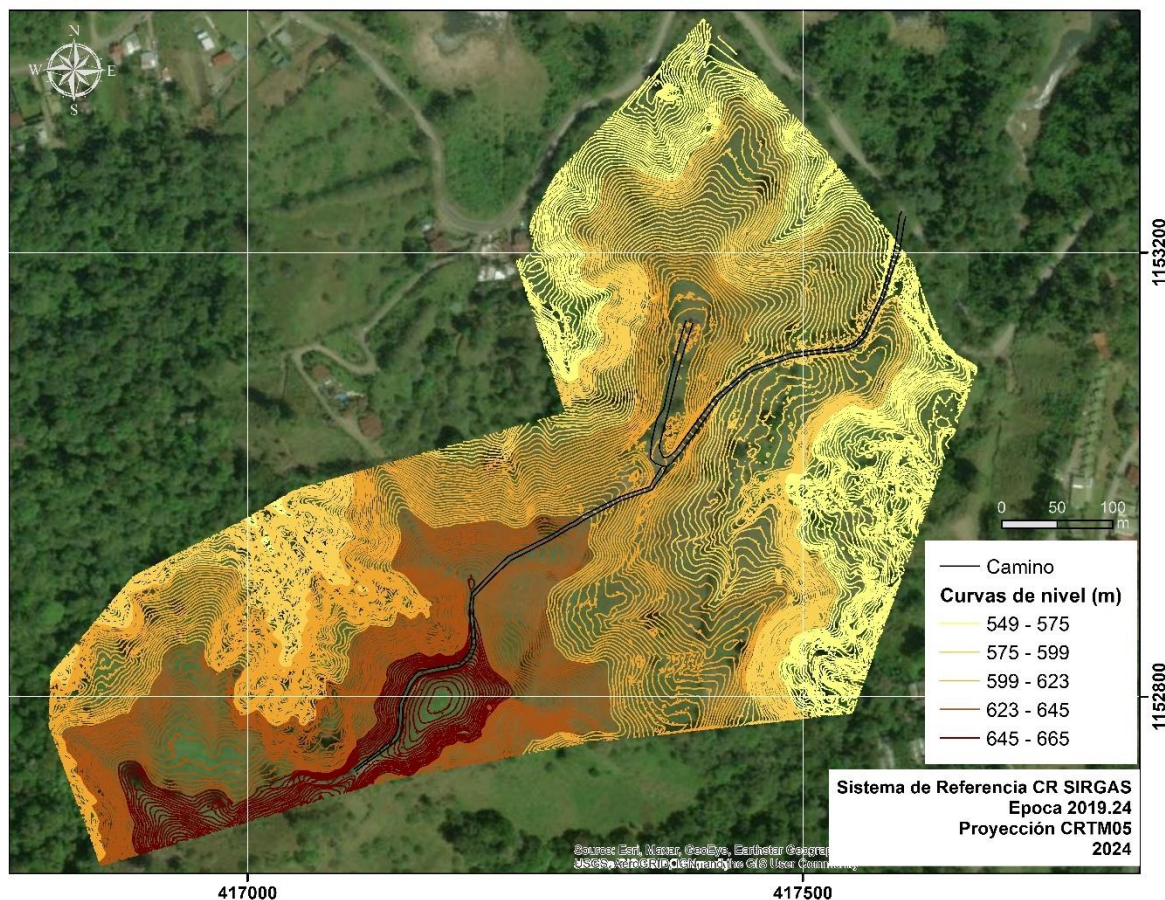


Figura No. 4. 8 Curvas de nivel del área de proyecto

Fuente: Elaboración propia

4.2. Segunda área de estudio

Para analizar la utilidad de las bandas multiespectrales, especialmente las de imágenes térmicas, se tomó como ejemplo el enfoque de las inspecciones de obra en los servicios de consultoría en ingeniería. Esta actividad tiene como objetivo monitorear obras a través del tiempo mediante la generación de datos que indiquen o demuestren la necesidad de intervenir una obra para remodelar, rehabilitar o reconstruir. La introducción de las imágenes térmicas en el campo, ilustra el alcance de su contribución en la contabilización de daños estructurales y al desarrollo de procesos de inspección más innovadores.

4.2.1. Cámara térmica M2ED

El software Pix4D Mapper solo permitió generar productos de salida en los vuelos Nos. 1 y 2 (Figura No. 3. 2). En ambos casos, el procesamiento automático sí generó los mapas de reflectancia, sin embargo, no se produjeron los mapas de temperatura (Figura No. 4. 9, Figura No. 4. 10 y Figura No. 4. 11).

La reflectancia está relacionada con la fracción de radiación solar incidente reflejada en una superficie o un cuerpo, las características de los objetos intervienen directa o indirectamente en la repartición y distribución de la luz dependiendo de su textura y su color.

Los mapas generados, almacenaron la cantidad de iluminación conforme la suma de todas las fuentes de luz de la escena. Sin embargo, dada la lejanía con que fueron tomadas las imágenes (alturas mayores a 60 m) y la poca variabilidad de la paleta de colores resultante, no se pudieron evidenciar los daños señalados en los tramos del puente, particularmente en la losa y barandas, según se muestra a continuación.

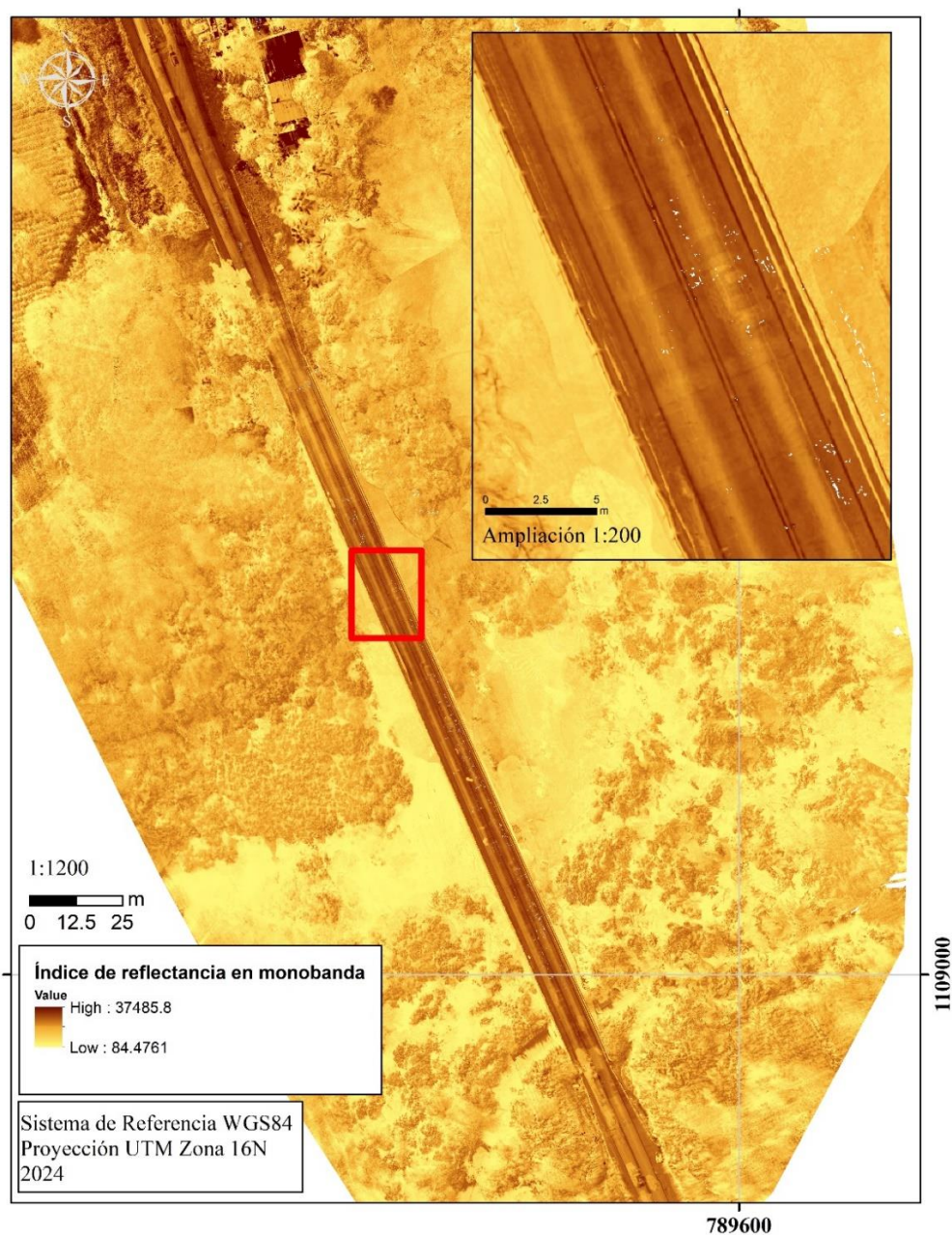


Figura No. 4.9 Mapa de reflectancia del vuelo No. 2
Fuente: Elaboración propia

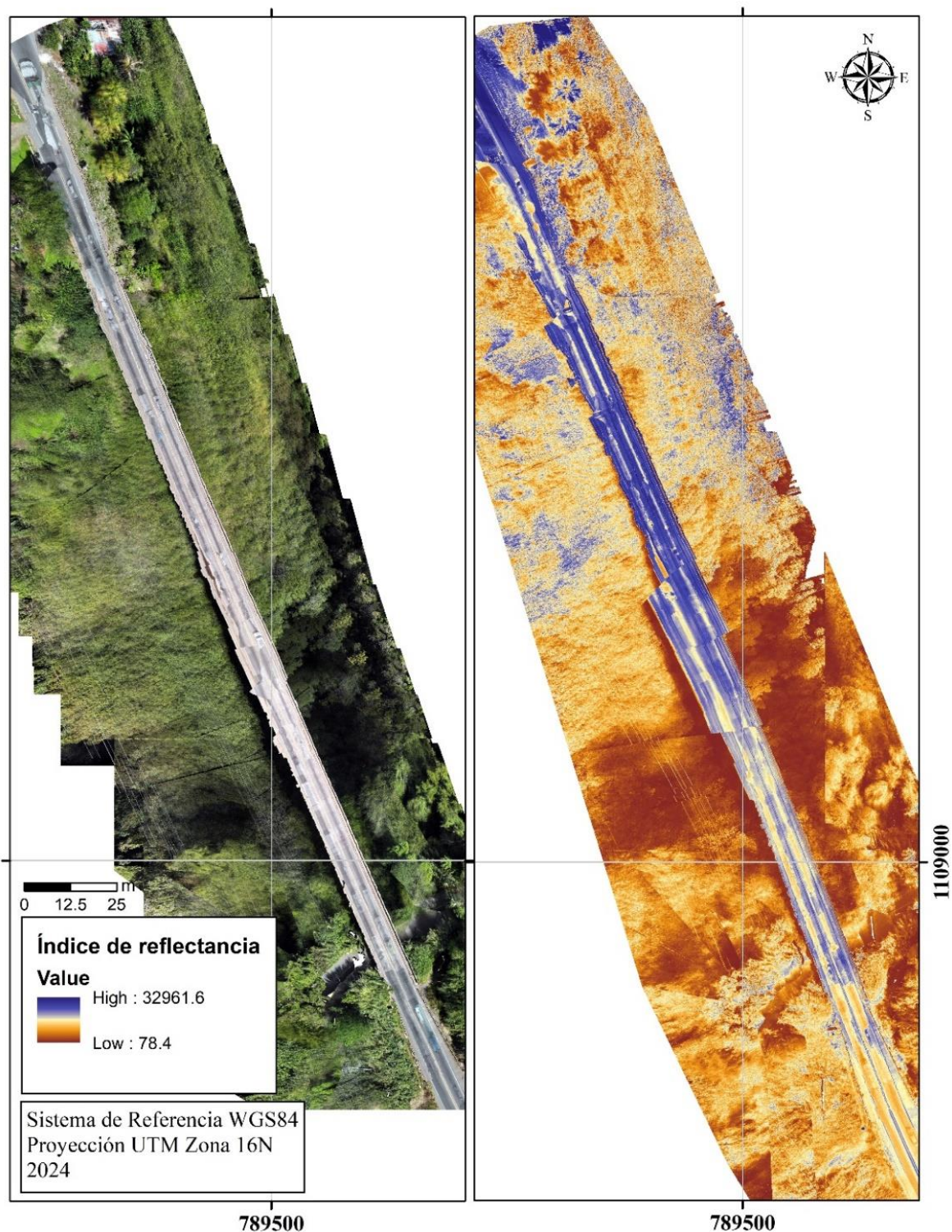


Figura No. 4. 10 Ortofotografía y mapa de reflectancia del vuelo No. 1
Fuente: Elaboración propia

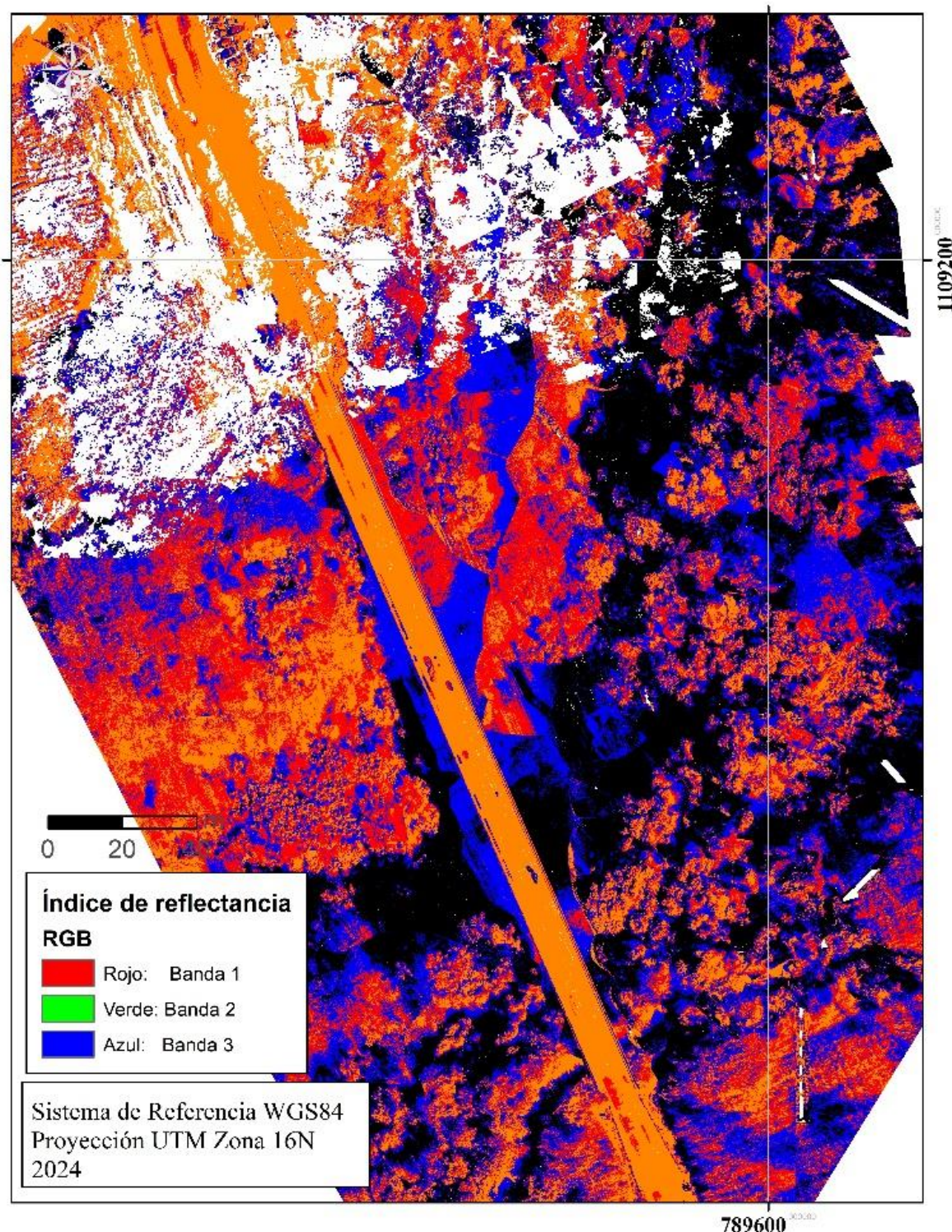


Figura No. 4. 11 Ampliación de mapa de reflectancia del vuelo No. 2
Fuente: Elaboración propia

El sensor térmico del dron utilizado, cuenta con una corrección radiométrica en formato EXIF (*Exchangeable Image File Format*, por sus siglas en inglés), siendo diferente al

formato RJPEG comúnmente usado en imágenes térmicas. Al utilizarse los datos crudos del modelo DJI Mavic 2 Enterprise Dual en el software de procesamiento Pix4D Mapper, no se interpretaron correctamente los metadatos, impidiendo que el algoritmo basado en SKD (*Software Development Kit*, por sus siglas en inglés) de FLIR consiguiera identificar el formato como resultado, por lo que el software procesó las imágenes en RGB, en lugar de imágenes térmicas, repercutiendo en que el valor de temperatura de un objeto no se asignó a un píxel en particular en el mapa resultante (Pix4D, 2024). Se utilizó el software Atygeo Thermal para intentar convertir las imágenes al formato TIFF radiométrico y luego procesarlas en Pix4D Mapper, pero la conversión no tuvo éxito porque el software no reconoció el modelo de cámara del dron.

El procesamiento de los vuelos Nos. 3 y 4 no generó ningún tipo de resultado, siendo evidente en el reporte PDF del procesamiento, donde se indicó que el número de imágenes superpuestas calculadas para cada píxel del ortomosaico, era bajo por lo que los resultados serían incorrectos. La incertidumbre absoluta en el desplazamiento entre las posiciones de la imagen inicial y calculada era alta, como resultado del ajuste del bloque. También se indicó que las posiciones de las imágenes calculadas requerían de más puntos de enlace manual o imágenes adicionales.

4.2.2. Cámara térmica Flir

Debido a la inaccesibilidad de elementos estructurales y a las condiciones de poca seguridad, únicamente se generaron resultados en los tramos Nos. 1, 2, 3, 8 y 9 (Figura No. 3. 18).

4.2.2.1. Sección No. 1

Los daños evaluados se encuentran en las juntas de expansión, la losa, la viga principal de concreto y los apoyos. Cada uno detallado a continuación:

Cuadro No. 4. 2 Principales daños en juntas de expansión de la sección No. 1

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
4	Junta de expansión	Ítem	Filtración de aguas	Faltante o deformación	Juntas obstruidas
		Evaluación	4	5	5

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 2 se investigó el daño por obstrucción. La inspección señaló que, la junta de expansión se encontraba cubierta de sobrecapas de asfalto. Esta deficiencia se calificó con grado de daño 5 (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro del daño, a efectos de corroborar si era posible delimitar segmentos de la junta expuesta. Tras el procesamiento, se identificó un objeto circular metálico en color cian, rodeado de asfalto en tonos naranjas y amarillos. En la paleta

Cuadro No. 4.3 Principales daños en losa de la sección No. 1

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño				
5	Losa	Ítem	Grietas en una dirección	Grietas en dos direcciones	Descascaramiento	Eflorescencia
		Evaluación	4	5	3	4

Fuente: Elaboración propia

Los tipos de daños por grietas en una y dos direcciones, descascaramientos y eflorescencia fueron evaluados en los tramos Nos. 2, 3 y 8.

Cuadro No. 4.4 Principales daños en viga principal de concreto de la sección No. 1

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
9	Viga principal de concreto	Ítem	Grietas en una dirección	Descascaramiento	Acero de refuerzo
		Evaluación	3	4	4

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4.4 se investigó el daño del descascaramiento. La inspección señaló que, en aproximadamente un 2 % de la longitud total de vigas de la sección No. 1, hay desprendimientos de concreto con profundidad estimada mayor a 25 mm y un diámetro estimado mayor que 150 mm. Estos desprendimientos se observaron especialmente en el centro de las vigas principales sobre la Ruta Nacional No. 716 y se deben a impactos de vehículos altos. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 4 en descascaramiento (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro del daño, para identificar características de un material que sufre desprendimientos. Tras el procesamiento, el borde de la viga adquirió color naranja, en comparación con el resto de la viga que se mantuvo en color cian. En la paleta de colores, el cian se encontró a 34.4 °C y el naranja a 36 °C. La magnitud de la diferencia en temperatura fue inferior a 2 °C. El cambio únicamente permitió delimitar la huella del material desprendido en la viga, sin poder determinar las grietas o fisuras. Cabe mencionar que, la temperatura ambiente fue de 34 °C y se utilizó una emisividad del concreto de 0.90. Se asumen diferencias en las propiedades del concreto expuesto (por los impactos vehiculares) y el concreto externo, ocasionando que la emisividad probablemente se modifique por variaciones en las propiedades del material (Figura No. 4.13).

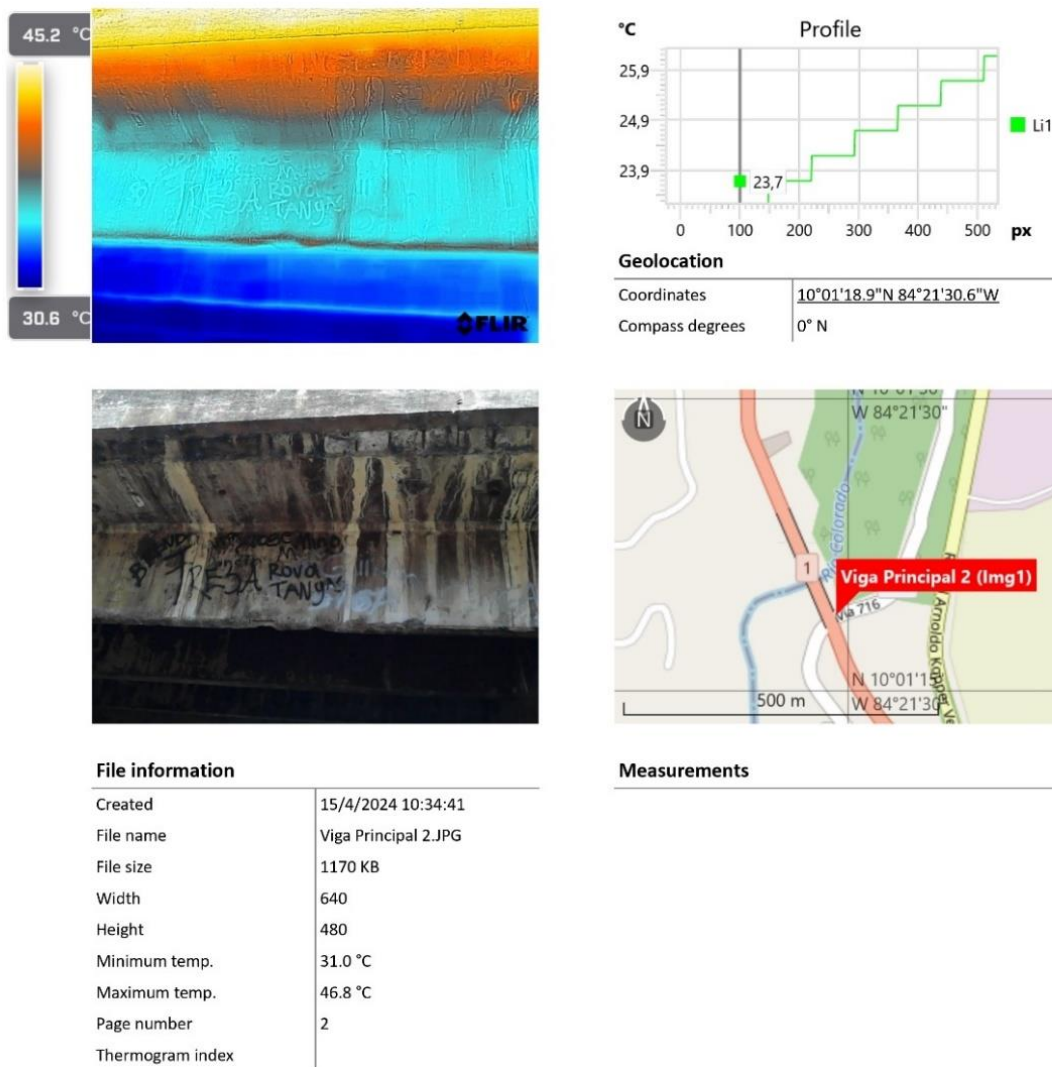


Figura No. 4. 13 Reporte térmico del descascaramiento de vigas en la sección No. 1
Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 5 Principales daños en losa de la sección No. 1

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño		
11	Apoyos	Ítem	Deformación extraña	Desplazamiento
		Evaluación	5	5

Fuente: Elaboración propia

Los tipos de daños de deformación extraña y desplazamiento fueron evaluados en el tramo No. 9.

4.2.2.2. Sección No. 2

Los daños evaluados se encuentran en las barandas (de acero), la losa y el cuerpo principal de la pila. Cada uno detallado a continuación:

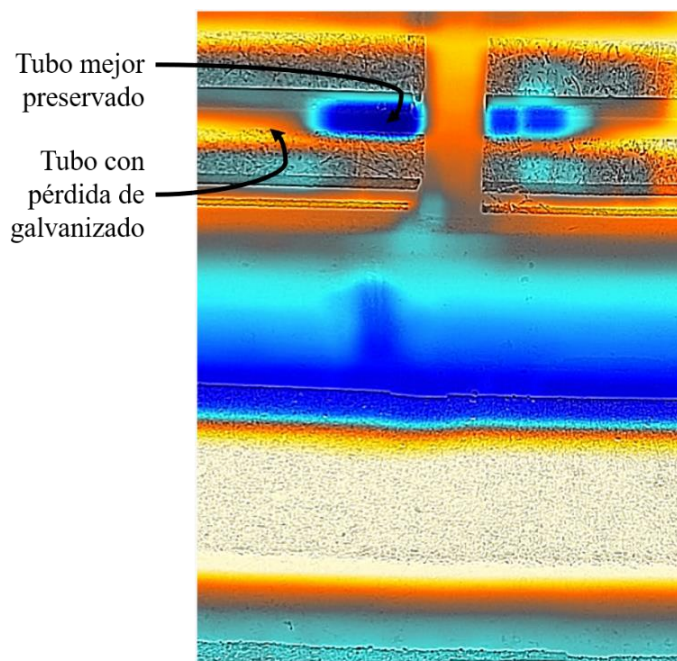
Cuadro No. 4. 6 Principales daños en las barandas de la sección No. 2

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño		
3	Baranda (Acero)	Ítem	Deformación	Faltante
		Evaluación	4	4

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 6 se investigó el daño por deformación de las barandas, dando como resultado que las barandas corresponden a los sistemas de contención vehicular, aproximadamente un 15 % contiene elementos deformados, severamente desalineados o fracturados. La deformación se observó entre 100 mm y 200 mm aproximadamente. Esta deficiencia se calificó con grado de daño 4 en deformación de baranda de acero, (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro de las barandas, a efectos de corroborar si era posible identificar daños sin detectar a simple vista. Tras el procesamiento en algunos casos los bordes adquirieron un color azul oscuro, en comparación con el resto de la baranda que se mantuvo en colores naranja y amarillo. En la paleta de colores, el azul oscuro se encontró entre 30.8 °C y 37 °C, el naranja a 51.8 °C. Para este caso, la magnitud de la diferencia de temperatura fue de hasta 21 °C. Los colores en azul son coincidentes con sitios donde el tubo de acero está más preservado, en las zonas en naranja y amarillo, se identificó pérdida del galvanizado. Cabe mencionar que, se utilizó una emisividad de 0.80 al ser acero. Debido a la amplitud de la anomalía, la espectroscopia infrarroja obtenida con el sensor, permitió detectar cualitativamente pérdida de propiedades del material, las superficies oxidadas tienen valores de emisividad cercano a 0.95 (Figura No. 4. 14 y Figura No. 4. 15).

**Figura No. 4. 14 Ampliación de daños en barandas de acero**

Fuente: Elaboración propia

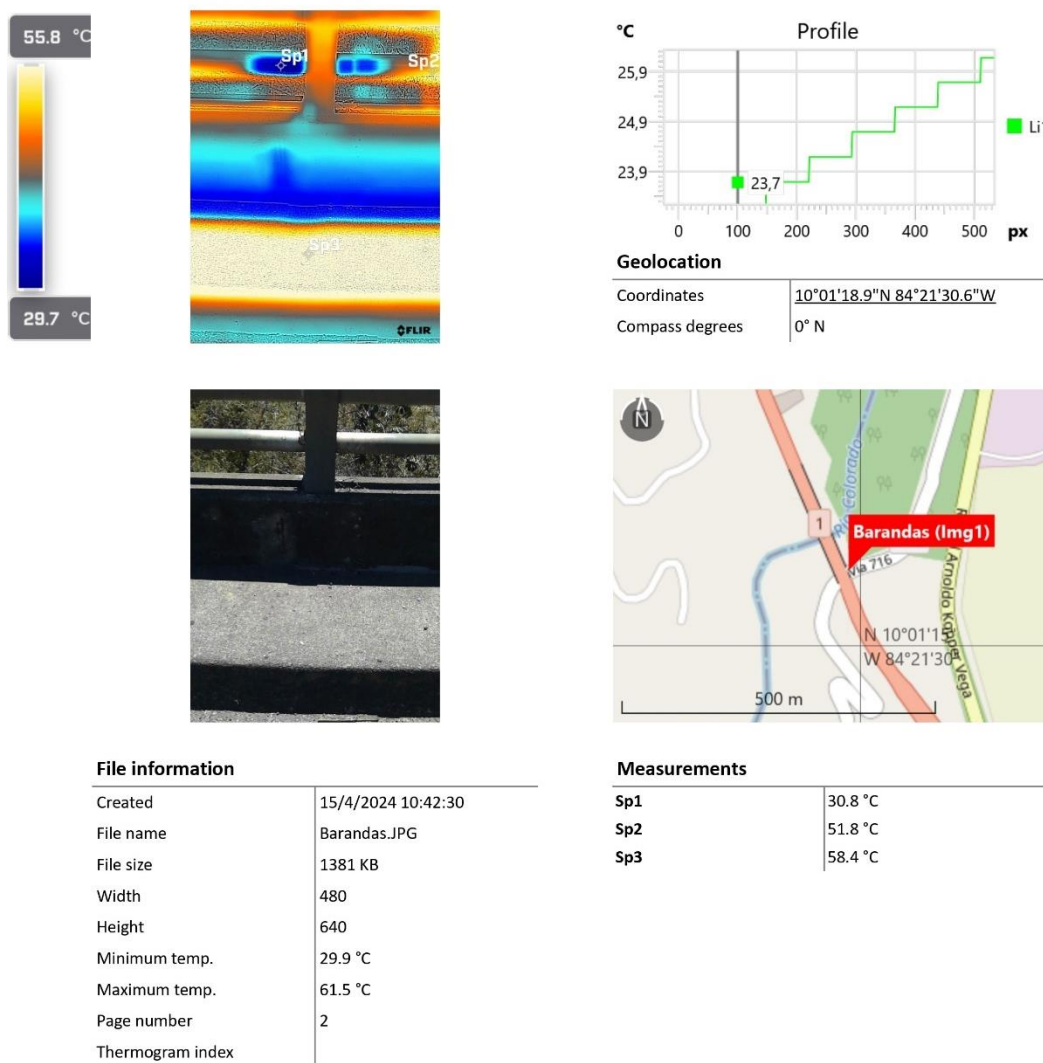


Figura No. 4. 15 Reporte térmico de deformación de barandas en la sección No. 2

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 7 Principales daños en la losa de la sección No. 2

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
5	Losa	Ítem	Grietas en una dirección	Grietas en dos direcciones	Eflorescencia
		Evaluación	4	5	4

Fuente: Elaboración propia

Para la losa descrita en el cuadro anterior, se investigaron las grietas en una dirección. La inspección señaló que, en aproximadamente un 10 % de la superficie superior del tablero hay grietas con un ancho estimado mayor a 1.0 mm espaciadas aproximadamente entre 0.30 m y 0.9 m. Estas grietas se extienden a todo lo largo del tablero y coinciden aproximadamente con la ubicación de los bordes de las alas superiores de las vigas principales tipo T de la

superestructura. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 4 en grietas en una dirección, (LANAMME-UCR, 2021).

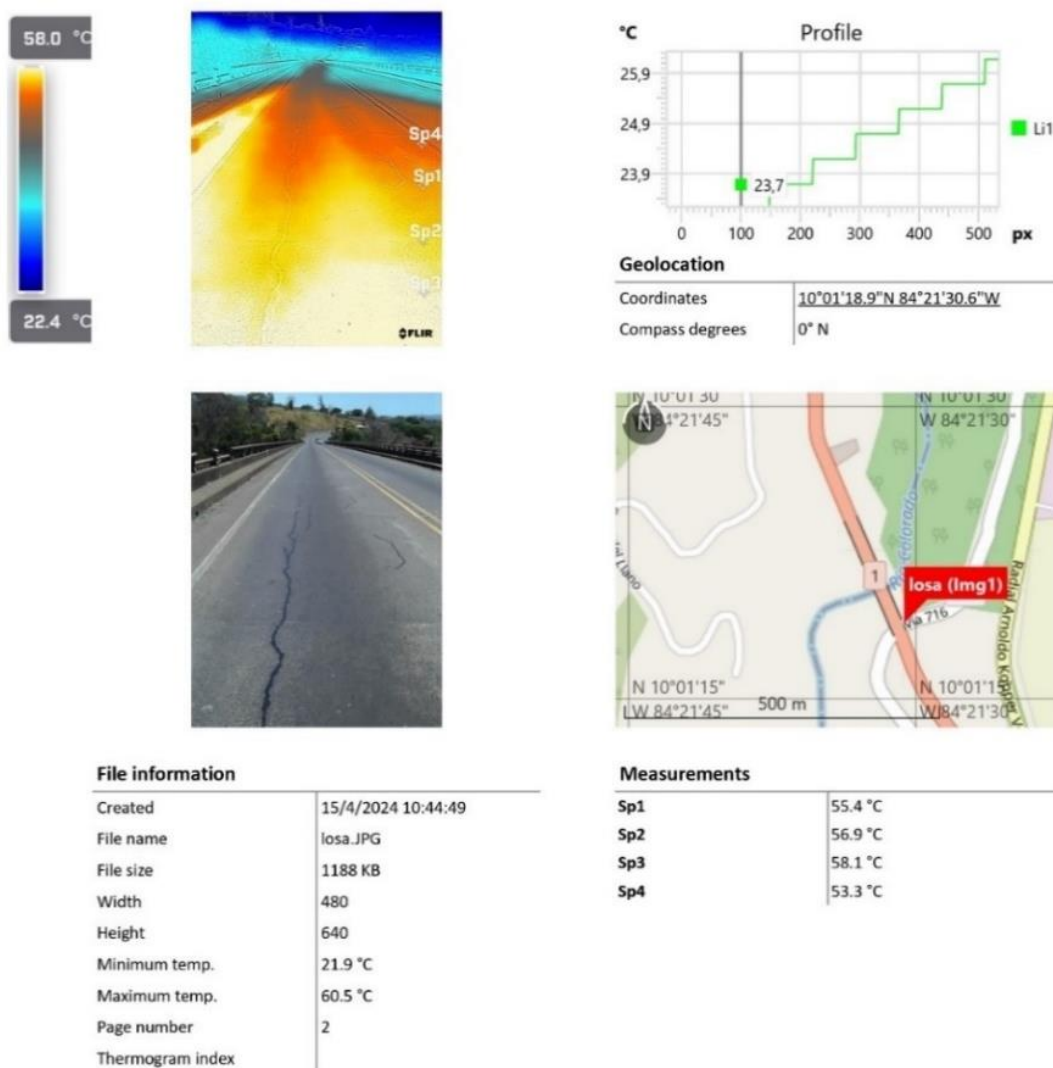


Figura No. 4. 16 Reporte térmico de grietas en una dirección de la losa en la sección No. 2
Fuente: Elaboración propia

Con el sensor térmico se tomó registro para identificar las grietas en el asfalto. Tras el procesamiento, el MSX que posee el sensor permitió delimitar mejor las grietas. El campo de visión de la Flir One es de 50°, por tal motivo al realizar una toma abierta, la paleta de colores debería tomar un patrón lineal o arqueado conforme se aleja, sin embargo, tomó un patrón en forma de “W”, se presume que fue producto de cambios en la emisividad del asfalto deteriorado alrededor de las grietas. En el reporte anterior y en la siguiente figura se consideró una emisividad de 0.90.

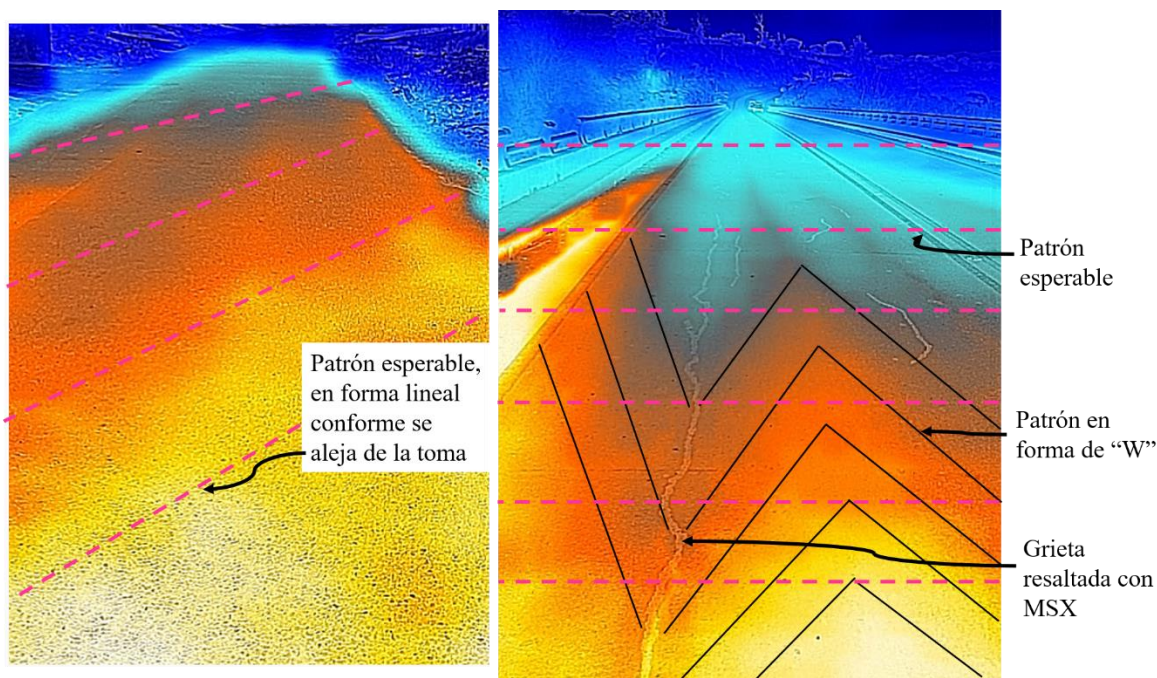


Figura No. 4.17 Patrón térmico del asfalto en las grietas de una dirección

La imagen derecha muestra asfalto del puente, a su vez la imagen izquierda muestra asfalto mejor conservado de otra ubicación de ejemplo.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4.8 Principales daños en el cuerpo de la pila de la sección No. 2

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
15	Cuerpo principal (pila)	Ítem	Grietas en una dirección	Descascaramiento	Acero de refuerzo
		Evaluación	4	3	4

Fuente: Elaboración propia

Para el cuerpo principal de la pila (Cuadro No. 4.8) se investigó el acero de refuerzo expuesto. Dando como resultado que, en aproximadamente un 5 % de la altura total de las columnas de la pila No. 1 se observó un desprendimiento con una profundidad estimada mayor a 25 mm y una dimensión aproximadamente mayor que 150 mm, ubicado en la viga de unión entre las columnas. Esta deficiencia se calificó en la inspección como grado de daño 3 en descascaramiento. En el desprendimiento, se observó también acero de refuerzo expuesto sin pérdida de sección medible en la viga de unión entre columnas. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 4 en acero de refuerzo expuesto (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro del daño, a efectos de corroborar si era posible identificar características del material expuesto. Tras el procesamiento, alrededor del borde del desprendimiento, se adquirió color naranja más intenso, en comparación con el resto de la viga en color cian. En la paleta de colores, el cian se encontró a 31.6 °C y el naranja a 32.9 °C. Para este caso, la magnitud de la diferencia de temperatura fue de 1.3 °C. El cambio

permitió delimitar la huella del material desprendido en la viga, además, en un tono naranja menos encendido y con valores de temperatura de 32.3 °C, se visualizó un polígono sobre el acero expuesto, que se presume, representa una sección de concreto que ha perdido propiedades y su emisividad cambió, posiblemente llegue a desprenderse. Cabe mencionar que, para obtener la sensibilidad térmica de 1.3 °C, se tomó en consideración, la temperatura ambiente, registrada ese día en 34 °C, las imágenes se tomaron a una distancia inferior a 2 m y se utilizó una emisividad teórica del concreto de 0.90 (Figura No. 4. 18 y Figura No. 4. 19).

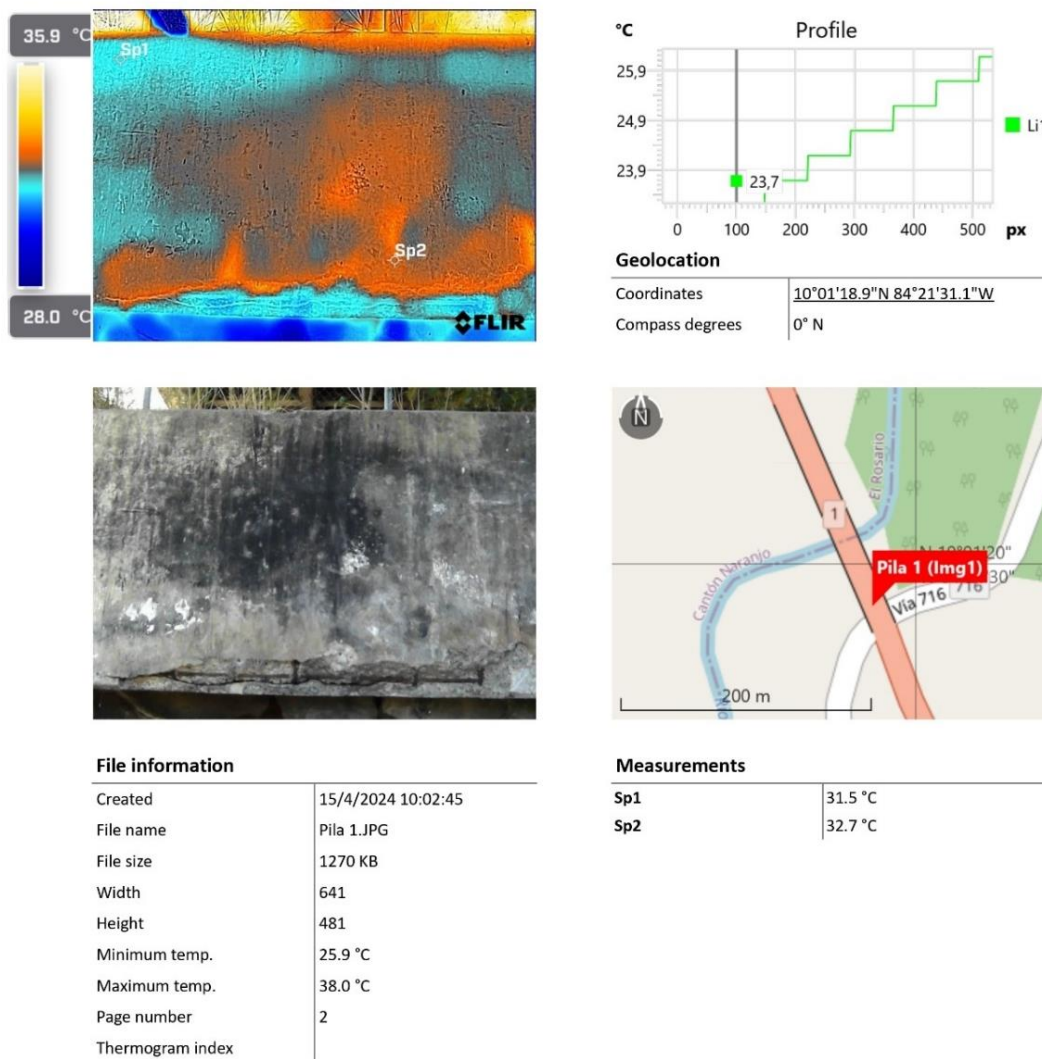


Figura No. 4. 18 Reporte térmico del acero expuesto en la sección No. 2

Fuente: Elaboración propia

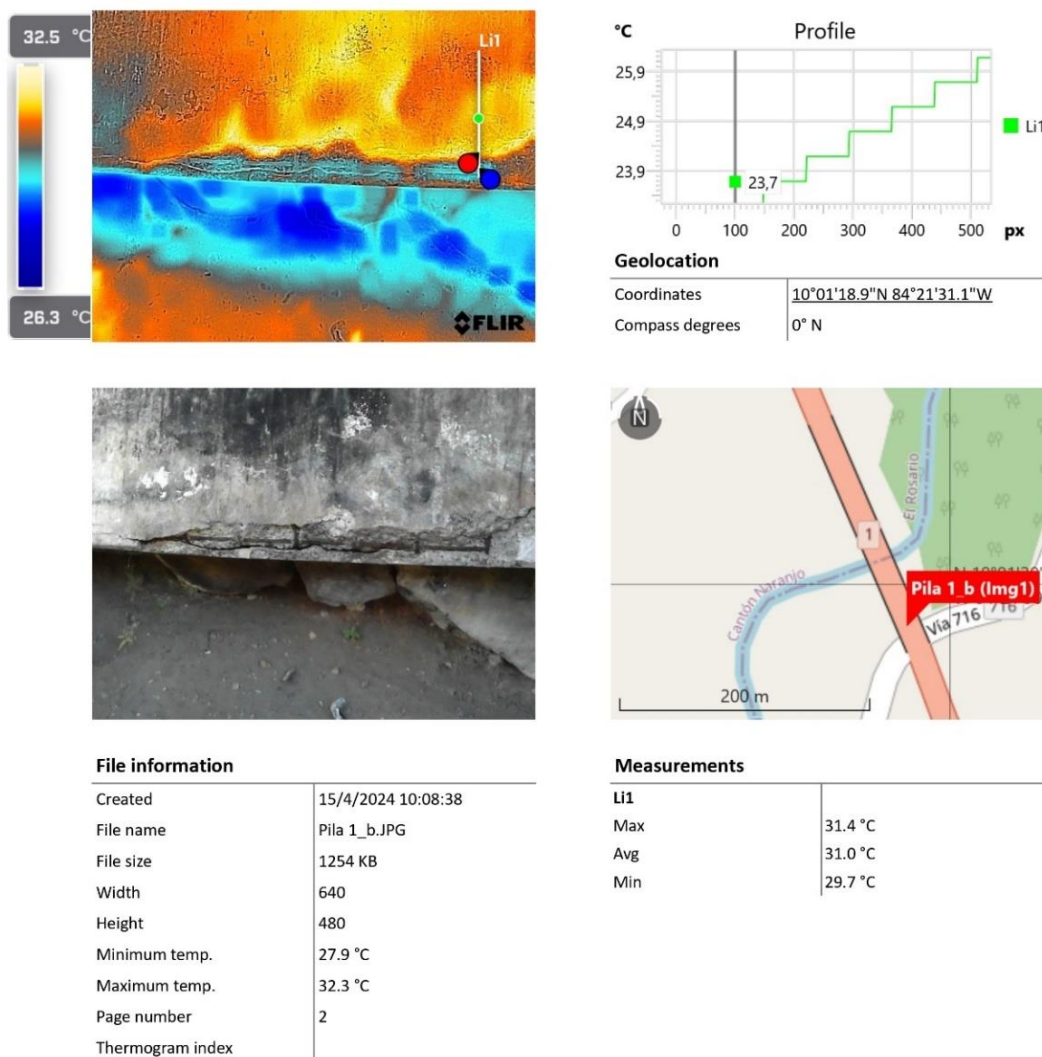


Figura No. 4. 19 Ampliación al reporte térmico del acero expuesto en la sección No. 2

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3. Sección No. 3

Los daños evaluados se encuentran en la losa, las vigas diafragma de concreto, el martillo de la pila inclinada y el cuerpo principal de la pila inclinada. Cada uno detallado a continuación:

Cuadro No. 4. 9 Principales daños en la losa de la sección No. 3

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
5	Losa	Ítem	Grietas en una dirección	Grietas en dos direcciones	Eflorescencia
		Evaluación	4	5	4

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 9 se investigó el daño por grietas en dos direcciones en la losa. La inspección señaló que, en aproximadamente un 10 % de la superficie superior

del tablero se observaron grietas en dos direcciones, con un ancho estimado mayor a 1.0 mm, con espaciamiento estimado entre 0.30 m y 0.90 m. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 5 en agrietamiento en dos direcciones, ya que se observaron desprendimientos puntuales del concreto (LANAMME-UCR, 2021).

Posterior al procesamiento de los datos, el MSX que posee el sensor permitió delimitar mejor las grietas. De forma general, las grietas en dos direcciones adquirieron un color amarillo, más intenso que el asfalto en color naranja a su alrededor. Característicamente, las grietas fueron selladas con materiales bituminosos (obtenidos de derivados del petróleo), la emisividad del bituminoso debe estar más cercana al petróleo (0.97), siendo mayor al asfalto (0.90). También, se presume que producto de cambios en las propiedades y emisividad del asfalto deteriorado alrededor de las grietas, cualitativamente si se evidenciaron los daños. La fotografía que se tomó en la siguiente figura, consideró una emisividad de 0.90.

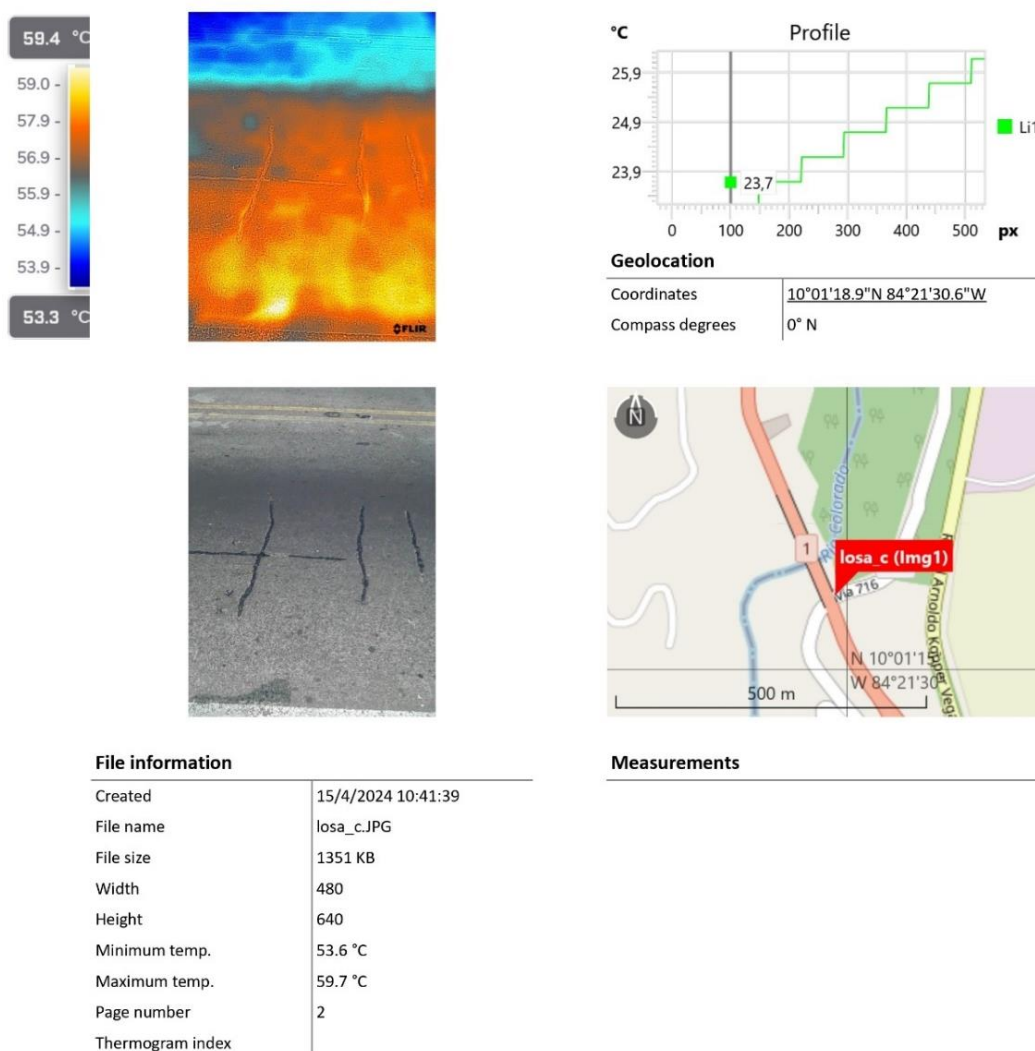


Figura No. 4. 20 Reporte de grietas en dos direcciones en la losa de la sección No. 3

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 10 Principales daños en la viga diafragma de concreto de la sección No. 3

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño	
10	Viga diafragma de concreto	Ítem	Descascaramiento
		Evaluación	3

Fuente: Elaboración propia

La inspección (Cuadro No. 4. 10) indicó que existe desprendimiento de concreto puntual en la unión de la viga diafragma del extremo sobre la pila No. 2 y la viga principal. Se estimó una extensión de un 1 %, con profundidad menor que 25 mm y dimensión máxima estimada de 150 mm. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 3 en descascaramiento (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro de una viga diafragma que se une con una viga principal, a efectos de corroborar posibles daños. El sitio puntual donde se reportó el daño, no se registró al ser de difícil acceso. Tras el procesamiento, las uniones entre vigas y la parte inferior del tablero adquirieron un color naranja. Los restantes elementos de las vigas en color cian. En la paleta de colores, el color naranja corresponde a 30.6 °C, el cian a 29.5 °C. La magnitud de la diferencia de temperatura fue de 1 °C (Figura No. 4. 22). Se presume que elementos debajo de la superficie pudieron influir en la distribución de la temperatura en la superficie del concreto. Sin embargo, la cámara termográfica solo mide la temperatura superficial. Por lo tanto, no fue posible esclarecer el cambio de temperatura del concreto. Para este caso se consideró una emisividad teórica de 0.90 y las imágenes se tomaron a una distancia inferior a 5 m.

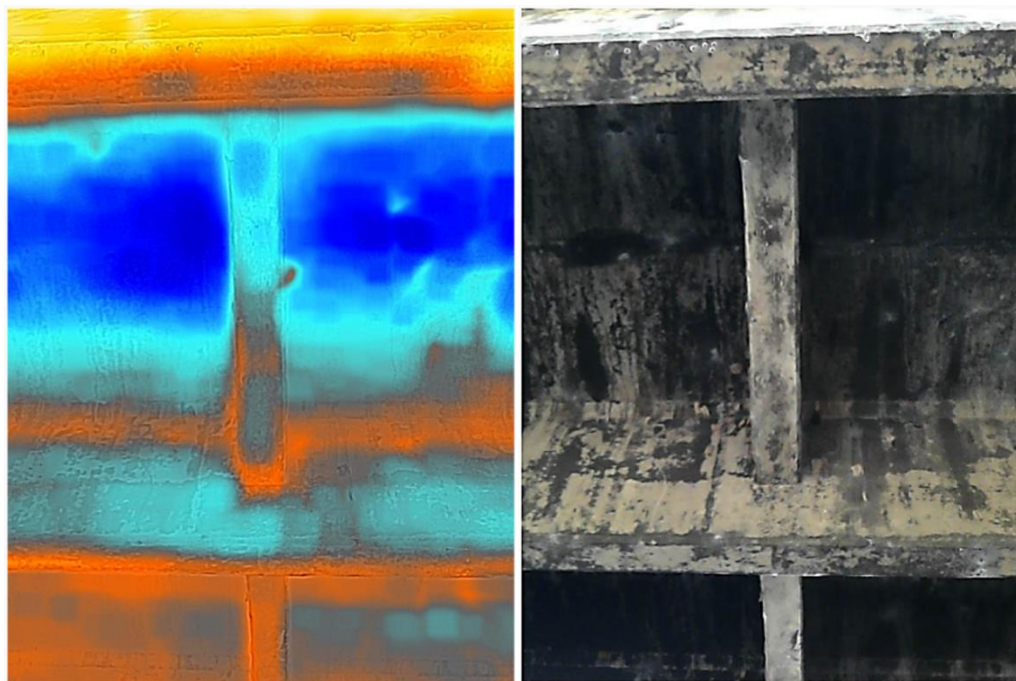


Figura No. 4. 21 Variación de temperaturas en viga diafragma de la sección No. 3

Fuente: Elaboración propia

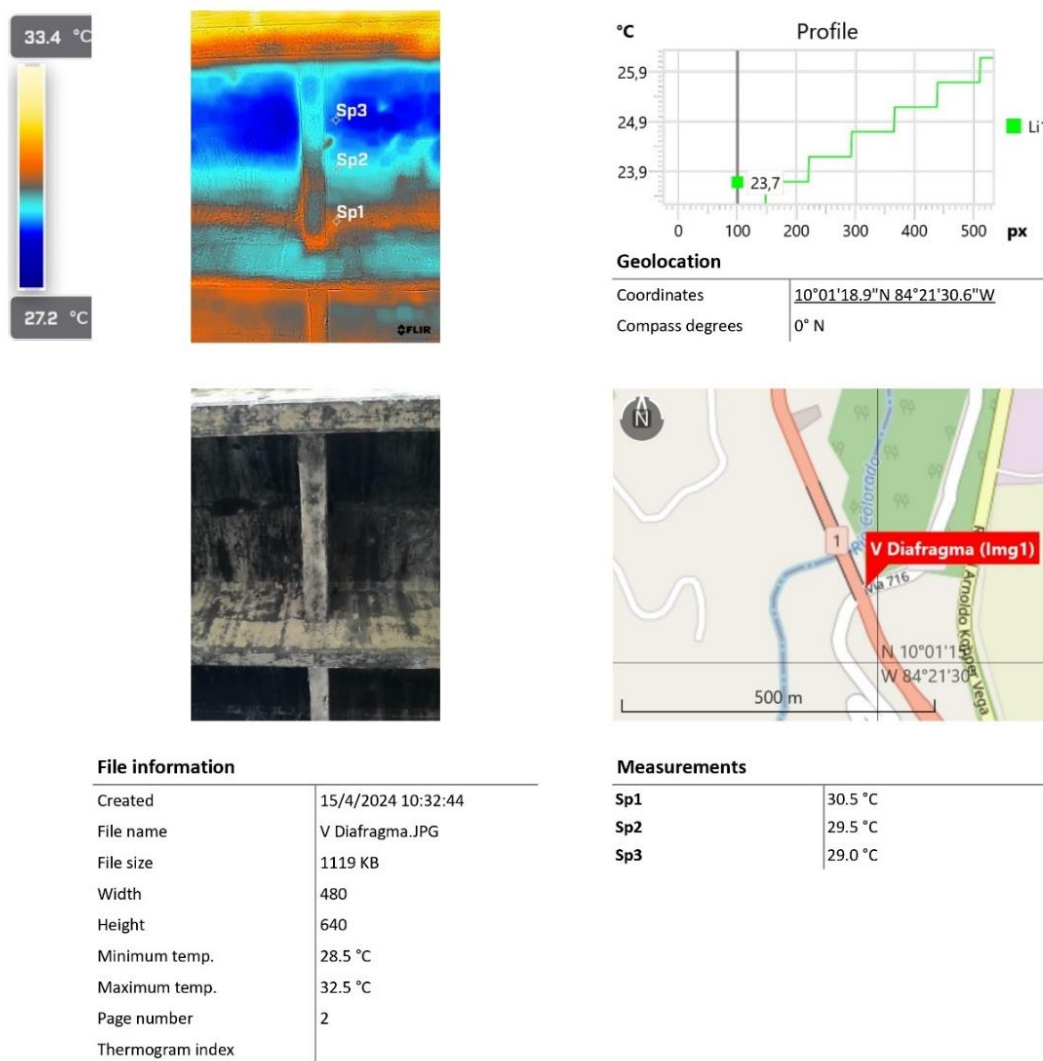


Figura No. 4. 22 Reporte de descascaramiento en la viga diafragma de la sección No. 3
Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 11 Principales daños en la pila inclinada de la sección No. 3

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño				
14	Martillo (pila inclinada)	Ítem	Grietas en una dirección	Descascaramien- to	Acero de refuerzo	Eflorescencia
		Evaluación	3	3	4	3

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 11 se investigó el daño por eflorescencia. En la inspección de LANAMME-UCR se observó agrietamiento puntual (extensión aproximada de 1 %) en el extremo noroeste y el costado aguas abajo del bloque de cabezal de la pila No. 2, las grietas se estima que tienen anchos entre 0.30 mm y 1.0 mm. Además, alrededor de las grietas se observaron manchas de humedad de posibles filtraciones o eflorescencias. Esta

deficiencia se calificó como grado de daño 3 en grietas en una dirección y grado de daño 3 en eflorescencia, (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomaron registros del martillo, a efectos de identificar eflorescencias. Tras el procesamiento, la estructura adquirió colores naranjas y amarillos. En la paleta de colores, el naranja representó 31.6 °C y el amarillo 32.2 °C. Para este caso, la magnitud de la diferencia de temperatura fue inferior a 1 °C. Por consiguiente, no se presentó una amplitud térmica considerable para generar información útil. Las imágenes se tomaron a una distancia superior de 20 m, además al utilizarse un sensor con sensibilidad térmica de escala regular (<150 mK) la precisión de la detección pudo estar susceptible a afectaciones por condiciones del ambiente (Figura No. 4. 23 y Figura No. 4. 24).

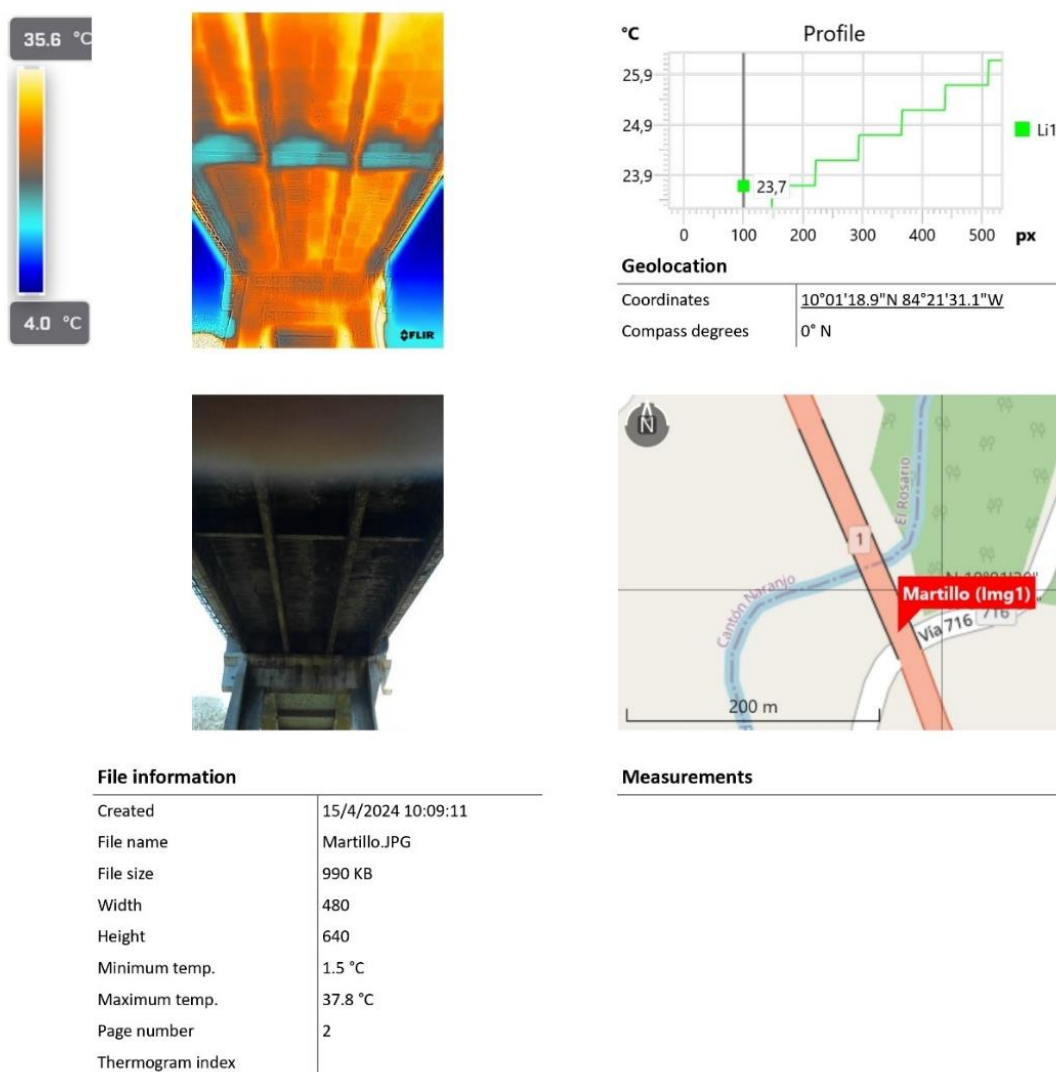


Figura No. 4. 23 Reporte de descascaramiento en la viga diafragma de la sección No. 3

Fuente: Elaboración propia

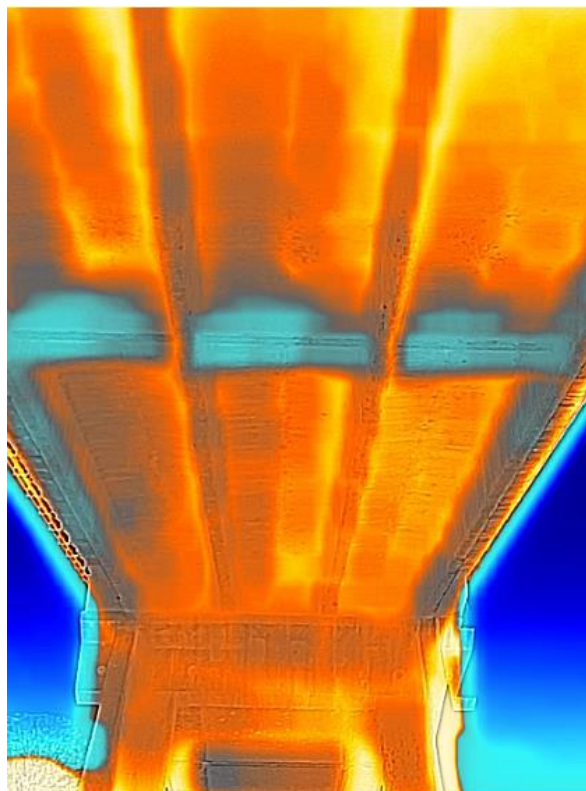


Figura No. 4. 24 Temperaturas debajo del tablero influenciadas por el ambiente

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 12 Principales daños en cuerpo de la pila inclinada de la sección No. 3

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño		
15	Cuerpo principal (pila inclinada)	Ítem	Grietas en una dirección	Eflorescencia
		Evaluación	4	3

Fuente: Elaboración propia

Para este caso (Cuadro No. 4. 12) se investigaron las grietas en una dirección. LANAMME-UCR indicó que, en la viga de unión de las columnas de la pila inclinada No. 2 se observó agrietamiento en una dirección con patrón de grietas por cortante. El ancho de grieta fue de aproximadamente entre 0.30 mm y 1.00 mm. La extensión de este agrietamiento se estimó en un 5% de la suma de las alturas de las columnas. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 4 en grietas en una dirección (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomaron registros del daño, a efectos de identificar las grietas de la viga unión. Tras el procesamiento, la estructura adquirió colores naranjas y amarillos. En la paleta de colores, el naranja representó 36.6 °C y el amarillo 45.2 °C. La magnitud de la diferencia de temperatura fue de 8.6 °C. No se obtuvo información útil a pesar de una diferencia de temperaturas con amplitud térmica considerable. Las imágenes se tomaron a una distancia superior de 20 m, además al utilizarse un sensor con sensibilidad térmica de escala regular (<150 mK) la precisión de la detección pudo estar susceptible a afectaciones por condiciones del ambiente, particularmente, rayos del sol (Figura No. 4. 25).

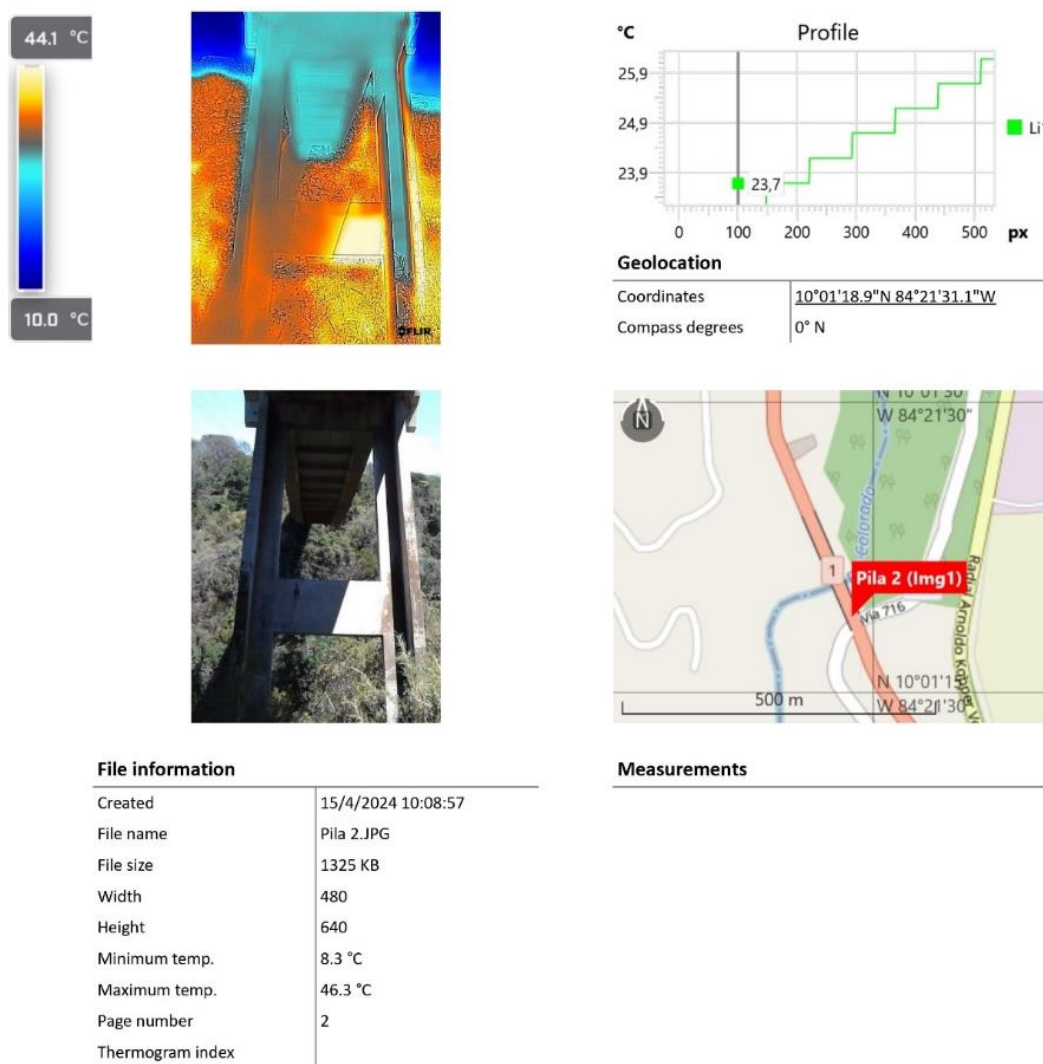


Figura No. 4. 25 Reporte de grietas en cuerpo de la pila inclinada de la sección No. 3
Fuente: Elaboración propia

4.2.2.4. Sección No. 8

Los daños evaluados se encuentran en las barandas (de acero y concreto), la losa, el martillo de la pila inclinada y el cuerpo principal de la pila inclinada, cada uno detallado a continuación:

Cuadro No. 4. 13 Principales daños en baranda (acero) de la sección No. 8

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño		
2	Baranda (Acero)	Ítem	Deformación	Faltante
		Evaluación	3	3

Fuente: Elaboración propia

El tipo de daño por deformación ya fue evaluado en la sección No. 2. Por otro lado, el tipo de daño faltante, no es objeto de análisis con la metodología térmica.

Cuadro No. 4. 14 Principales daños en baranda (concreto) de la sección No. 8

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño	
3	Baranda (Concreto)	Ítem	Acero de refuerzo expuesto
		Evaluación	4

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 14 se investigó el comportamiento de las delaminaciones en las barandas de concreto. La inspección señaló que, las barandas corresponden a sistemas de contención vehicular, en los desprendimientos de concreto se observó acero de refuerzo expuesto con oxidación, pero sin pérdida de sección medible. Esta deficiencia se calificó con grado de daño 4 en acero de refuerzo expuesto, (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro de las barandas de concreto, a efectos de corroborar si era posible identificar daños sin detectar a simple vista. Tras el procesamiento, la parte inferior de las delaminaciones adquirieron un color azul oscuro, en comparación con el resto de la baranda que se mantuvo en colores naranja y cian. En la paleta de colores, el azul oscuro se encontró en 37.2 °C, el cian a 39.4 °C y el naranja a 45.1 °C. Para este caso, la magnitud de la diferencia de temperatura fue de 2.2 °C. La delaminación sucede cuando una capa superficial de concreto se desprende, como si fuera una lámina o una película, debido a la presencia de agua y aire de exudación atrapados debajo de la superficie. Se presume que el color azul se debe a un cambio en las propiedades del concreto por la presencia de agua (Figura No. 4. 26 y Figura No. 4. 27).

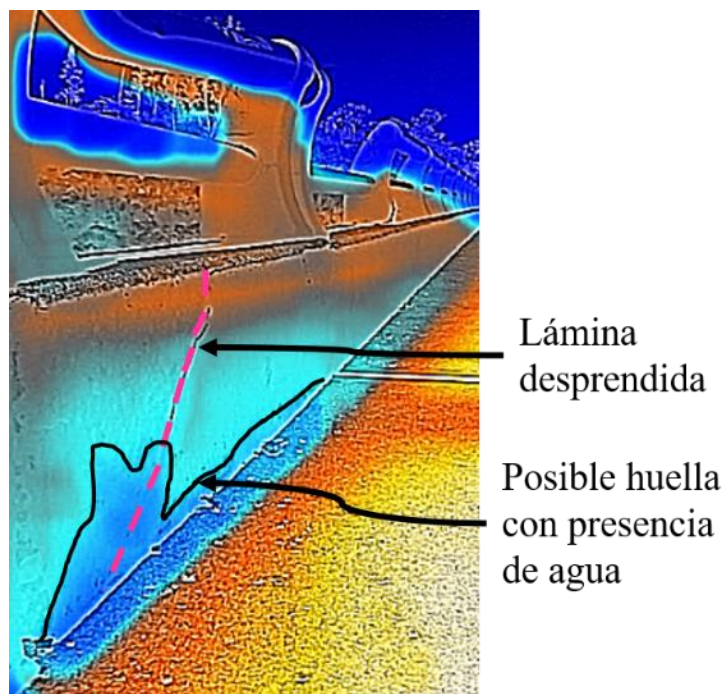


Figura No. 4. 26 Ampliación de delaminaciones en las barandas de la sección No. 8

Elaboración propia

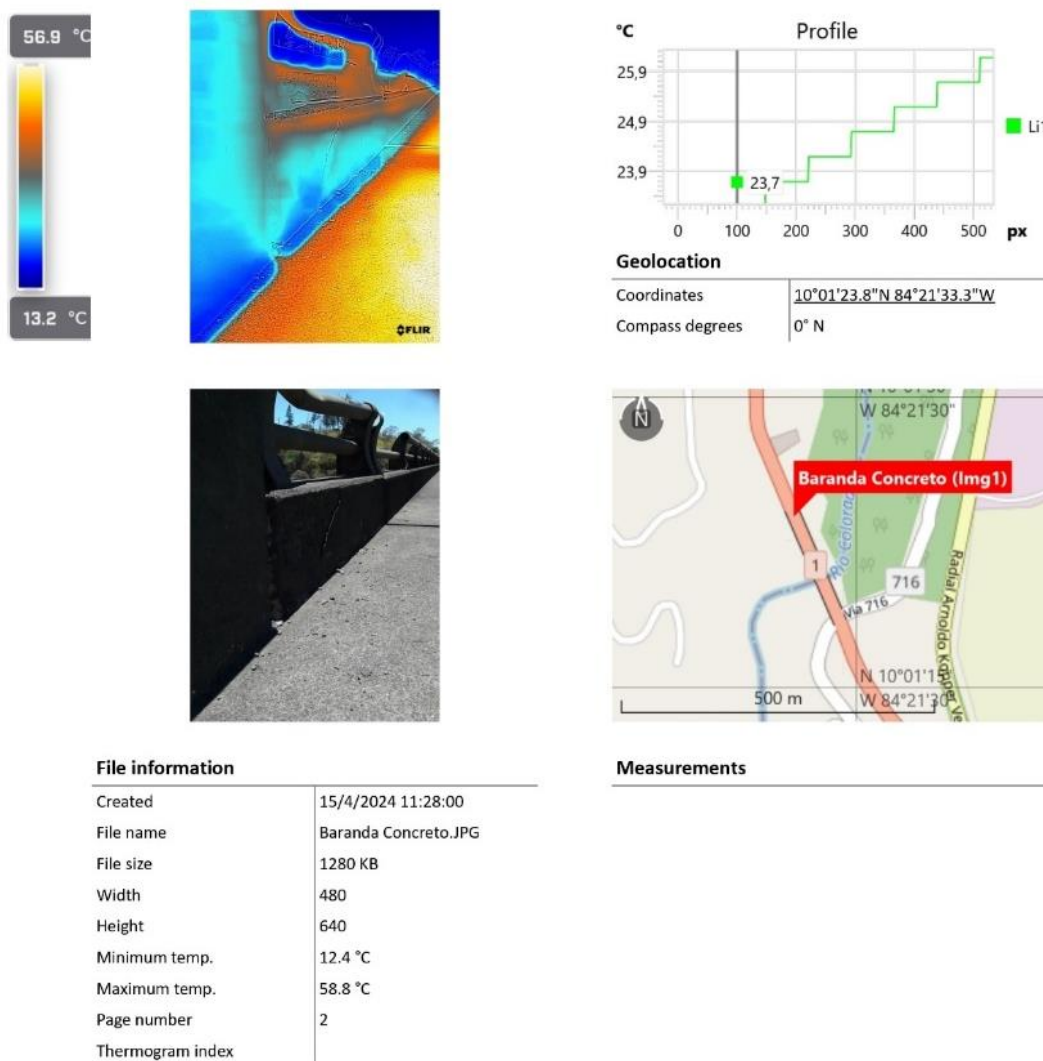


Figura No. 4. 27 Reporte térmico delaminaciones en las barandas de la sección No. 8
Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 15 Principales daños en losa de la sección No. 8

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
5	Losa	Ítem	Grietas en una dirección	Grietas en dos direcciones	Eflorescencia
		Evaluación	4	5	4

Fuente: Elaboración propia

Para este caso se investigaron las eflorescencias (Cuadro No. 4. 15). En la inspección se observaron manchas de eflorescencia y de humedad en las vigas principales y vigas diafragma, provenientes del tablero de concreto. Aunque, las manchas no fueron visibles en el tablero propiamente, se calificó como grado de daño 4 en eflorescencia, asumiendo que la eflorescencia se encuentra en más de la mitad del área del tablero (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro del daño, para identificar las eflorescencias y la humedad. Tras el procesamiento, el tablero adquirió colores cian y azul (en menor grado), las vigas se mantuvieron en color naranja. En la paleta de colores, el cian se encontró a 32.4 °C y el naranja a 33.3 °C. En la Figura No. 4. 28 y Figura No. 4. 29, se tomó consideración de la temperatura ambiente (34 °C), la distancia al objeto inferior a 5 m y se utilizó una emisividad teórica del concreto de 0.90. Con el MSX del sensor, se resaltaron las manchas del tablero, permitiendo asociarlas con la huella termal de 32.4 °C. Se asumen diferencias en las propiedades del concreto con eflorescencias y humedad que coincidieron con los colores cian de la imagen.

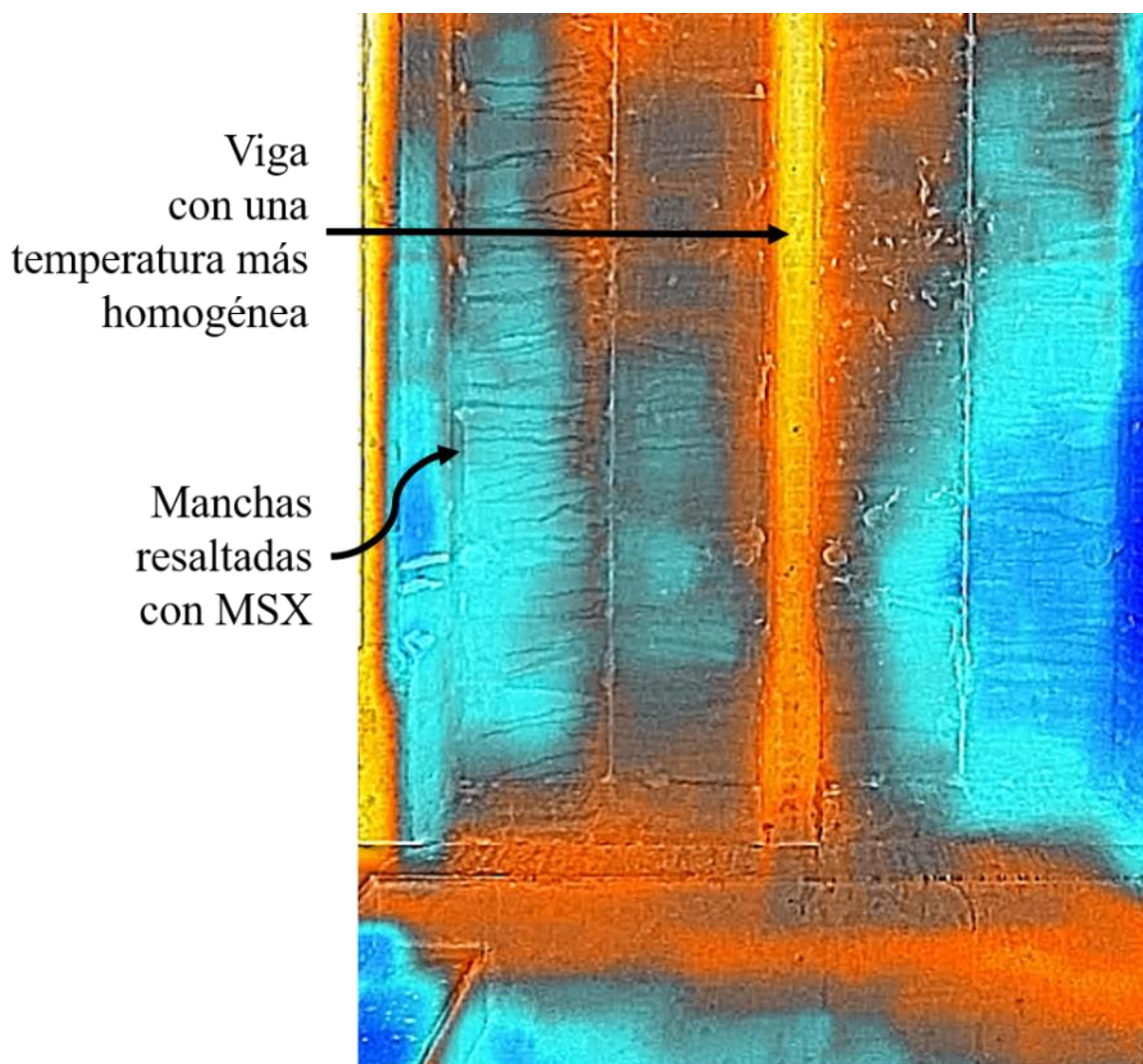


Figura No. 4. 28 Ampliación de eflorescencias en vigas de la sección No. 8
Fuente: Elaboración propia

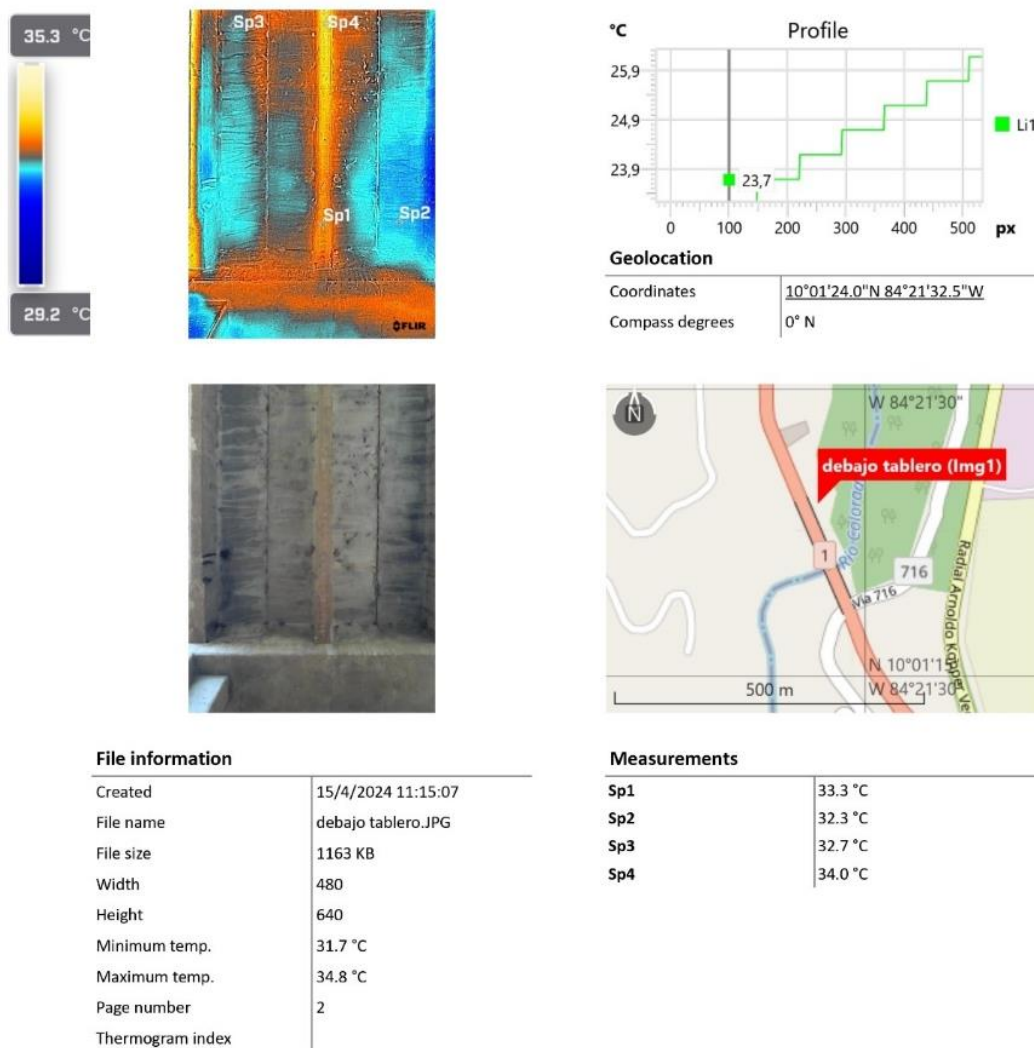


Figura No. 4. 29 Reporte térmico de eflorescencias en vigas principales de la sección No. 8
Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 16 Principales daños en martillo (pila inclinada) de la sección No. 8

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño	
14	Martillo (pila inclinada)	Ítem	Grietas en una dirección
		Evaluación	4

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 16 se investigó el daño por grietas en una dirección. La inspección señaló que, se observó agrietamiento con ancho estimado entre 0.30 mm y 1.0 mm en el costado sureste del bloque de la viga cabezal de la pila No. 7. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 4 en grietas en una dirección.

Con el sensor térmico se tomaron registros del martillo (Figura No. 4. 30), no obstante, tras el procesamiento, la estructura adquirió colores naranjas y amarillos, provocando que el análisis efectuado, coincida con en el martillo de la Figura No. 4. 23.

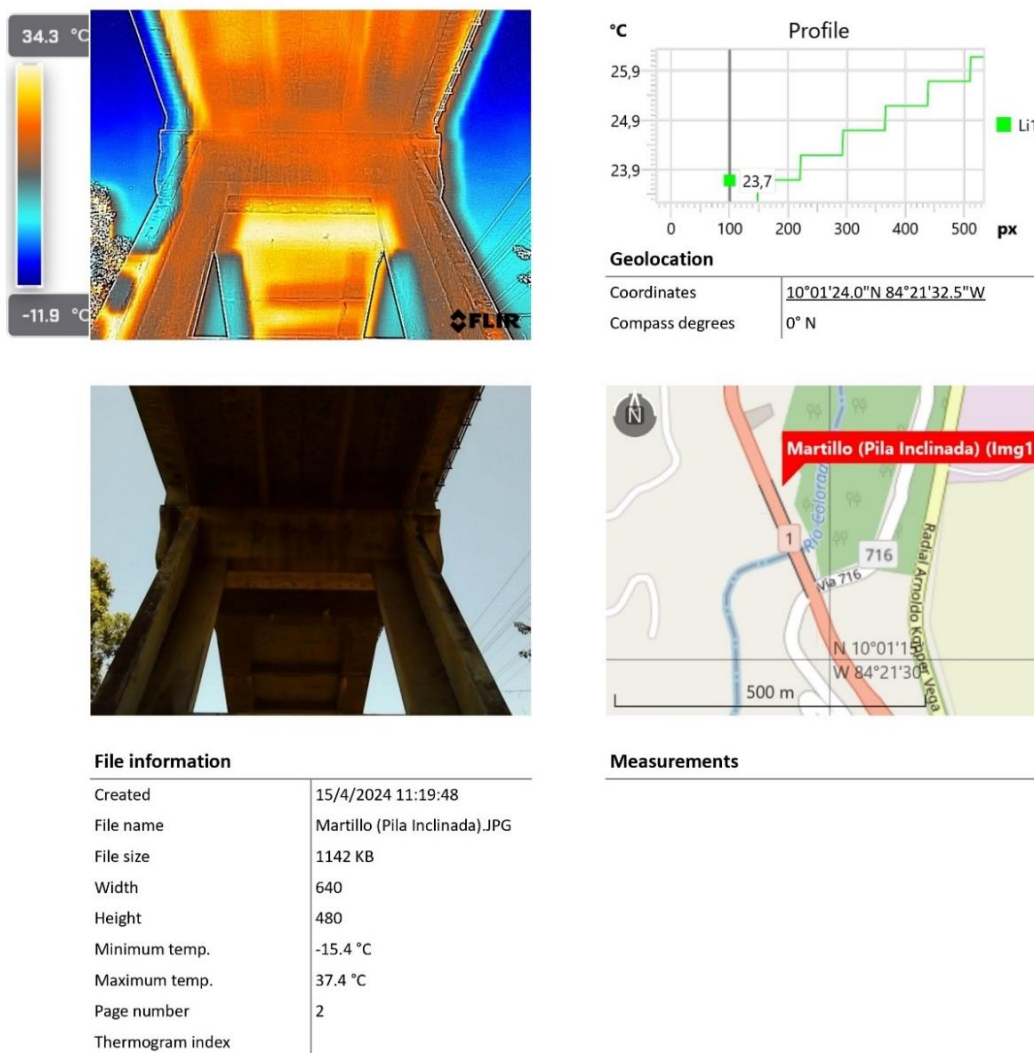


Figura No. 4. 30 Reporte térmico de grietas en martillo (pila inclinada) de la sección No. 8
Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 17 Principales daños en cuerpo principal (pila inclinada) de la sección No. 8

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño				
15	Cuerpo principal (pila)	Ítem	Grietas en una dirección	Grietas en dos direcciones	Descascaramiento	Eflorescencia
		Evaluación	4	5	3	3

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 17 se investigó el daño por grietas en una dirección. Tras realizarse la inspección, en la viga de unión de las columnas de la pila inclinada No. 7 se observó agrietamiento en una dirección con patrón de grietas por cortante. El ancho de la grieta fue de aproximadamente entre 0.30 mm y 1.00 mm. La extensión de este agrietamiento se estimó en un 5 % de la suma de las alturas de las columnas. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 4 en grietas en una dirección (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomaron registros de la viga unión, no obstante, tras el procesamiento, la estructura adquirió colores naranjas y amarillos, por consiguiente, no se mostró información de utilidad, a pesar de que con el MSX que posee el sensor, si se resaltó la grieta en la parte superior de la viga unión (Figura No. 4. 31 y Figura No. 4. 32).

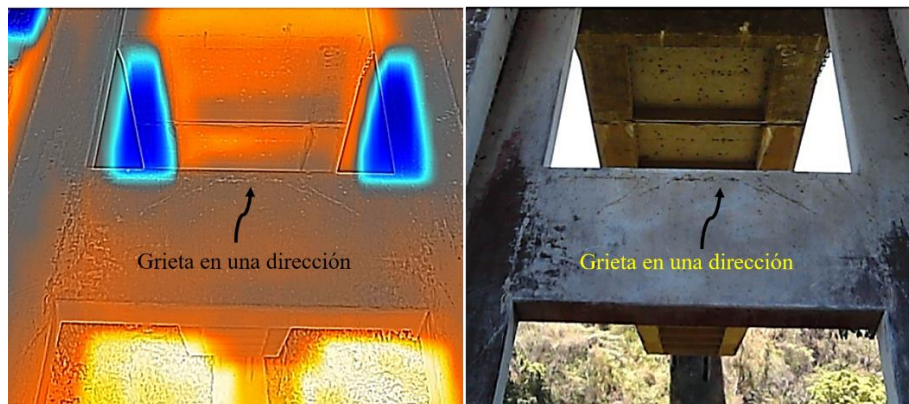


Figura No. 4. 31 Ampliación de grietas de una dirección en cuerpo principal (pila)

Fuente: Elaboración propia

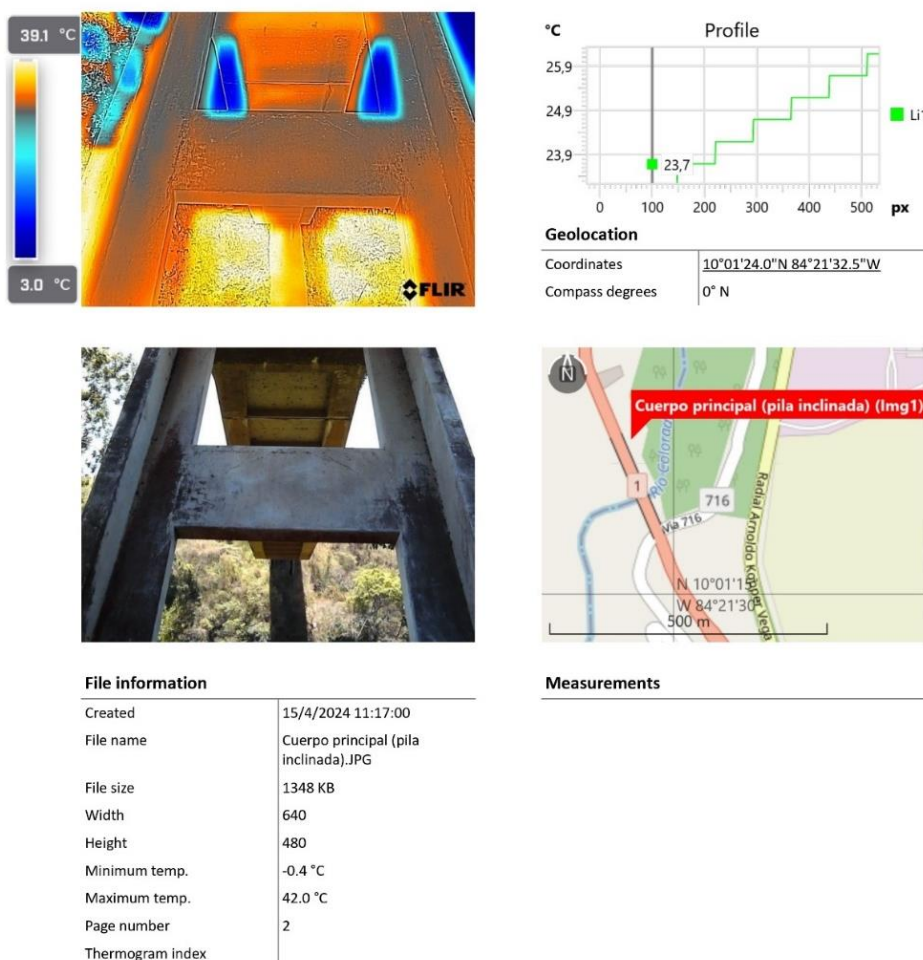


Figura No. 4. 32 Reporte térmico de grietas en cuerpo principal (pila) de la sección No. 8

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.5. Sección No. 9

Los daños evaluados se encuentran en las barandas (de acero), las juntas de expansión, la losa, la viga principal de concreto, los apoyos y el cuerpo principal de la pila. Cada uno detallado a continuación:

Cuadro No. 4. 18 Principales daños en baranda (acero) de la sección No. 9

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño		
3	Baranda (Acero)	Ítem	Deformación	Faltante
		Evaluación	3	3

Fuente: Elaboración propia

El tipo de daño por deformación ya fue evaluado en la sección No. 2. Por otro lado, el tipo de daño faltante, no es objeto de análisis con la metodología térmica.

Cuadro No. 4. 19 Principales daños en juntas de expansión de la sección No. 9

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
4	Junta de expansión	Ítem	Filtración de aguas	Faltante o deformación	Juntas obstruidas
		Evaluación	4	5	5

Fuente: Elaboración propia

Para este caso se investigaron las filtraciones de agua y las obstrucciones (Cuadro No. 4. 19). Tras realizarse la inspección, se percibió que la junta de expansión No. 2 del puente, es diferente a la que se indica en los planos, en sitio (en los extremos donde no se encontraba cubierta por asfalto) se observó una junta abierta. Se observaron filtraciones en más del 50 % los elementos bajo la junta a lo ancho del bastión. Esta deficiencia se calificó con grado de daño 4 en filtración de aguas. El 100 % de la junta de expansión se encontraba cubierta con sobre capas de asfalto. Esta deficiencia se calificó con grado de daño 5 en juntas obstruidas, (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro de las posibles zonas con filtraciones. Tras el procesamiento, en la viga debajo de las juntas de expansión, se formó una huella en color azul oscuro. En la paleta de colores el azul oscuro se encontró a 30 °C, el cian a 32 °C y el naranja a 32.7 °C. En las imágenes se tomó en consideración la temperatura ambiente, registrada ese día (34 °C), la distancia al objeto, inferior a 5m y se utilizó una emisividad teórica del concreto de 0.90 (Figura No. 4. 33).

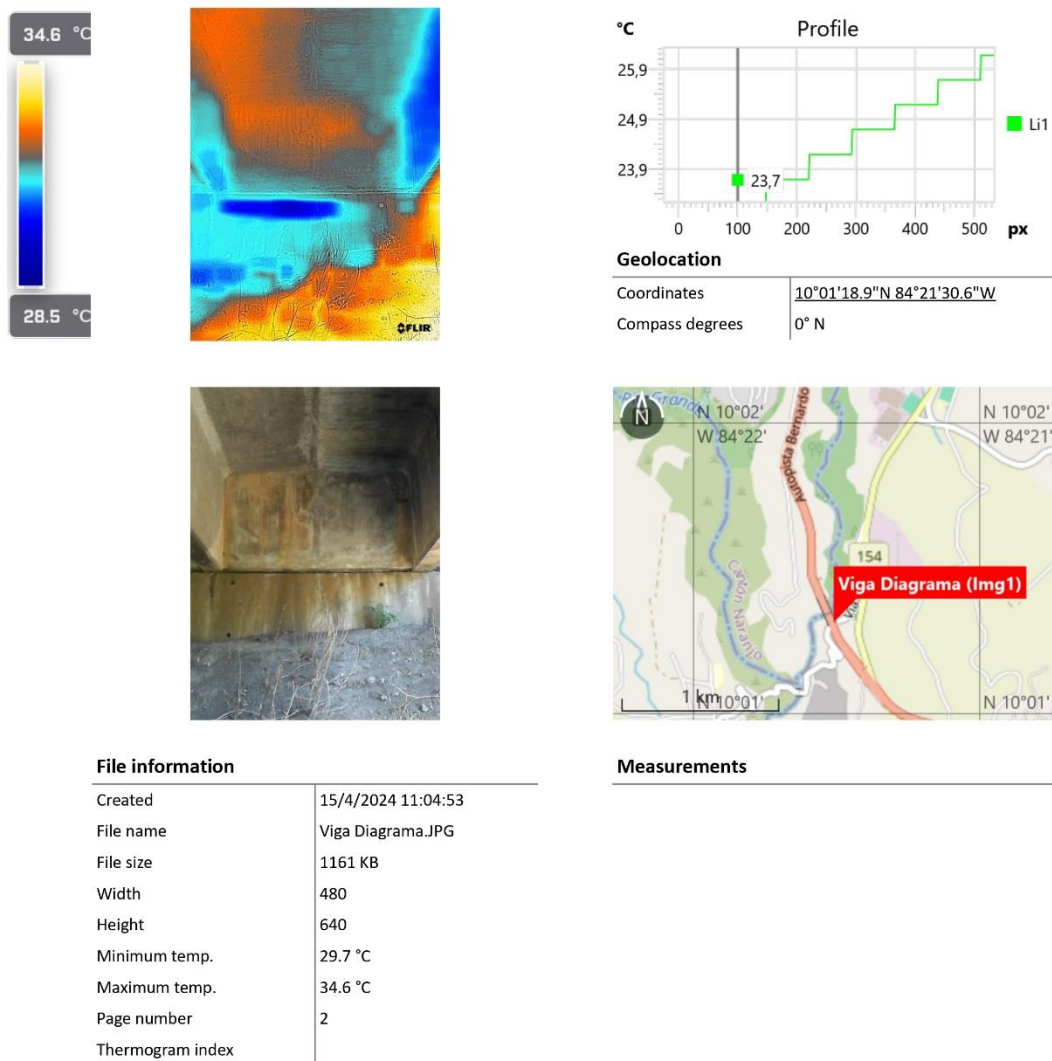


Figura No. 4. 33 Reporte térmico de filtraciones en juntas de expansión de la sección No. 9
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, al utilizar el MSX que posee el sensor, se resaltaron las manchas del tablero inferior y la viga diafragma. En el sitio, la mancha azul de la Figura No. 4. 34, es correspondiente con una capa de sedimento húmedo. Los colores cian del tablero inferior concordaron con las manchas de eflorescencia resaltadas con el MSX. Los colores naranjas de la viga diafragma, coincidieron con las manchas de humedad mezcladas con óxido metálico.

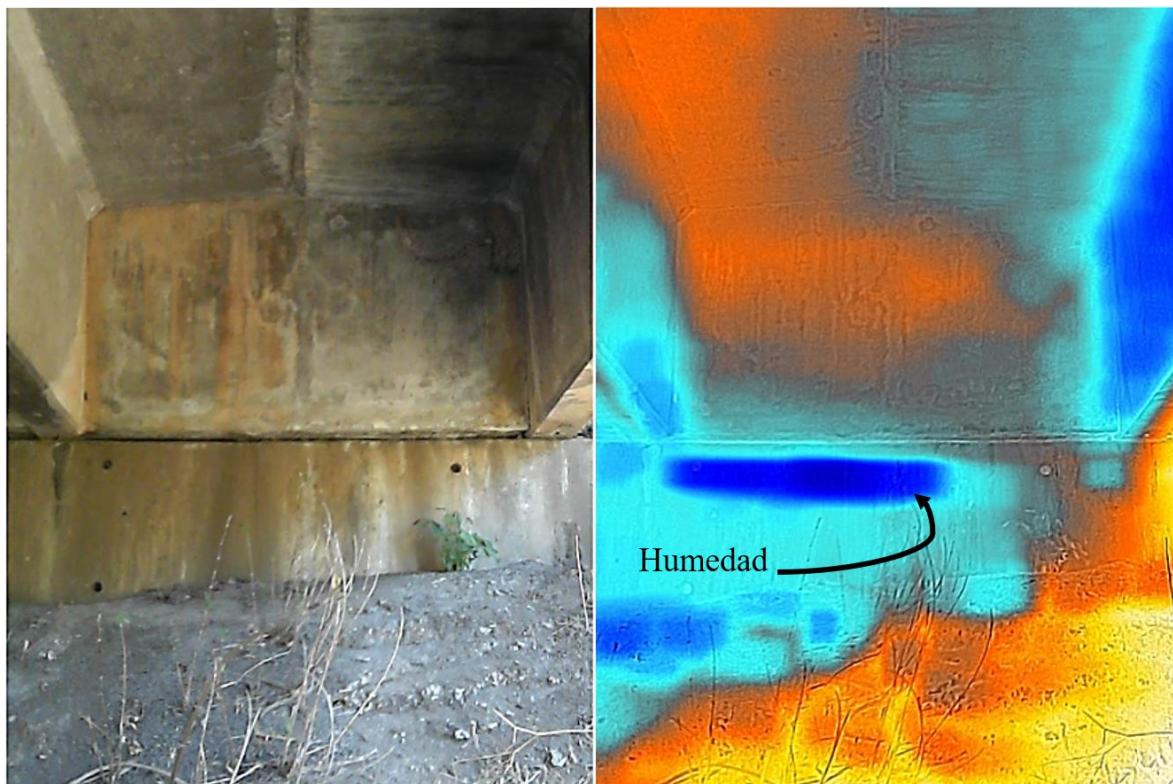


Figura No. 4. 34 Detalle de estructuras con humedad producto de filtraciones en juntas de expansión de la sección No. 9

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, con el daño relacionado a las juntas obstruidas, en el lugar se identificaron grietas en el asfalto que cubre la junta de expansión. Tras el procesamiento, con el MSX del sensor se delimitaron mejor las grietas. De igual forma que en casos de los tramos Nos. 2 y 3, se presume cambios en las propiedades y emisividad del asfalto deteriorado alrededor de las grietas, por tal motivo, la temperatura en la grieta fue menor (al menos $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) que en el resto del asfalto, significando que, cualitativamente se evidenciara la extensión de la sobre capa de asfalto que obstruye al elemento estructural (Figura No. 4. 35).

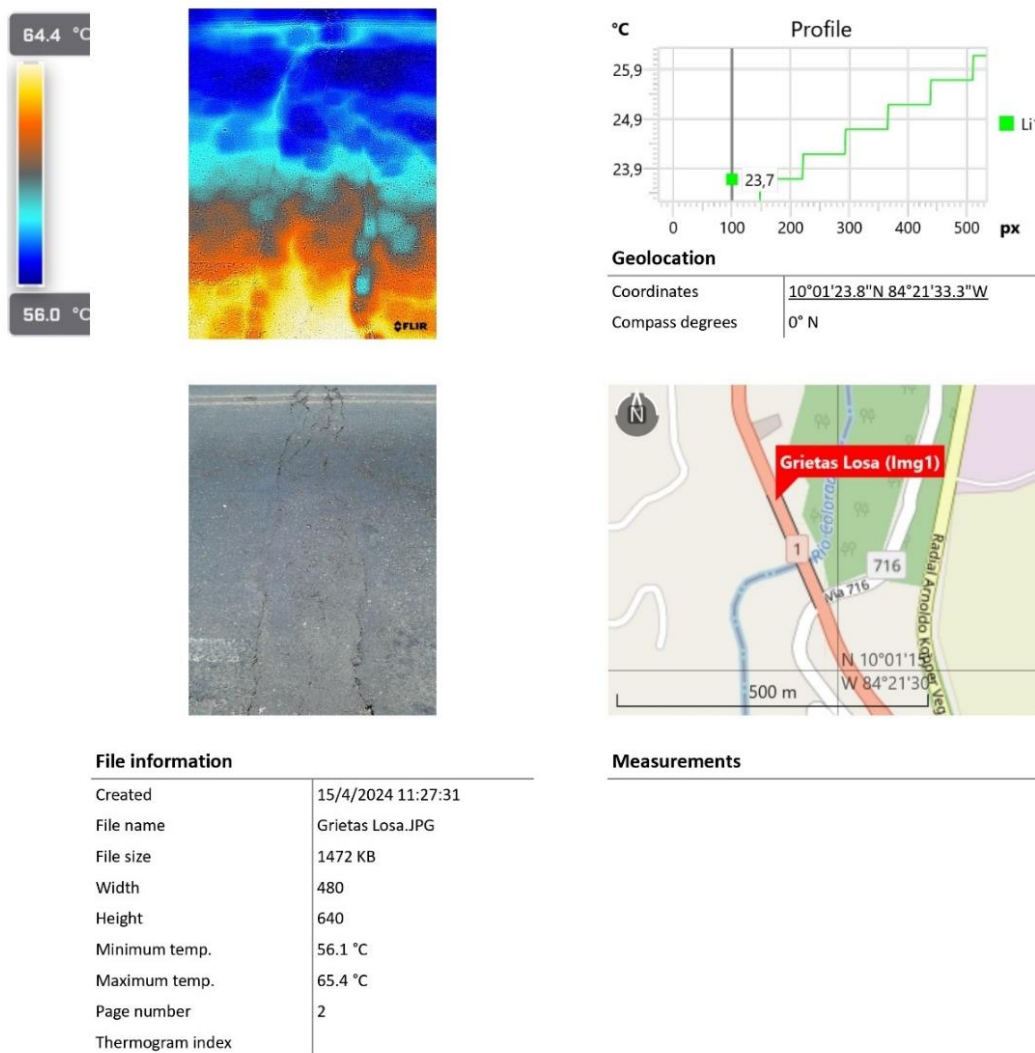


Figura No. 4. 35 Reporte térmico obstrucciones en juntas de expansión del a sección No. 9
 Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 20 Principales daños en losa de la sección No. 9

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño			
5	Losa	Ítem	Grietas en una dirección	Grietas en dos direcciones	Eflorescencia
		Evaluación	4	5	4

Fuente: Elaboración propia

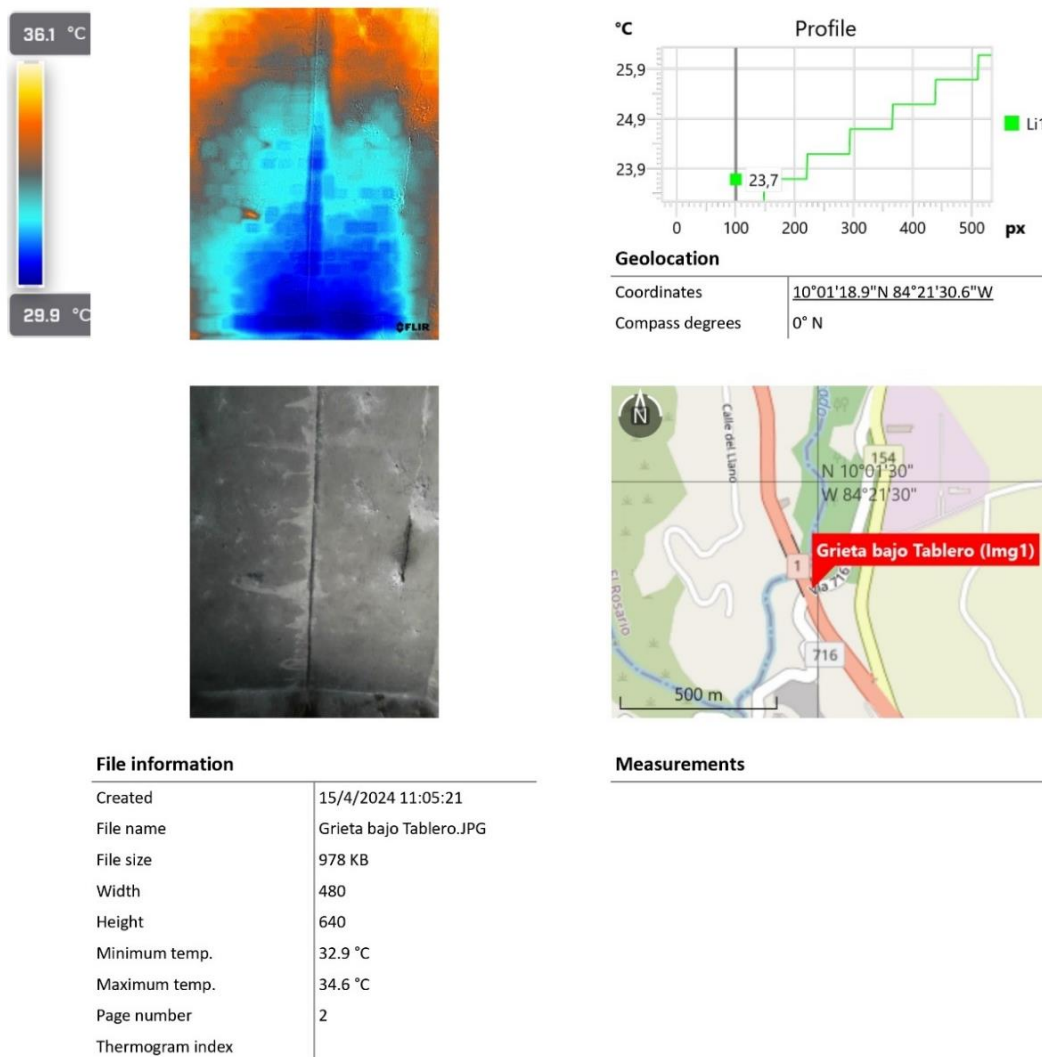
Los tipos de daños de grietas en una, dos direcciones y eflorescencia ya fueron evaluados en los tramos Nos. 2 y 3, asimismo, en el ejemplo de junta de expansión del presente tramo.

Cuadro No. 4. 21 Principales daños en viga principal de concreto de la sección No. 9

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño				
9	Viga principal de concreto	Ítem	Grietas en una dirección	Descascaramiento	Acero de refuerzo	Eflorescencia
		Evaluación	4	5	5	3

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4. 21 se investigó las grietas en una dirección de la viga de concreto. LANAMME-UCR indicó que, en aproximadamente un 5 % de la longitud total de vigas, se observaron grietas en una dirección con ancho estimado entre 0.30 mm y 1.0 mm, en las alas de las vigas principales, sobre las cuales se observó eflorescencia y acumulación de grasa, que aparentemente proviene de los cables que pasan a través de la losa. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 3 en eflorescencias y 4 en grietas en una dirección, (LANAMME-UCR, 2021).

**Figura No. 4. 36 Reporte térmico grietas en viga principal de la sección No. 9**

Fuente: Elaboración propia

Con el sensor térmico se tomó registro del daño, para corroborar las características descritas y la acumulación de grasa. Tras el procesamiento, se evidenció un objeto oval en tonalidad naranja. La grieta y la acumulación de grasa tomaron un color cian. En la paleta de colores, el cian se encontró a 33 °C y el naranja a 34 °C. El MSX del sensor, permitió delimitar mejor las grietas, el óvalo en color naranja se asoció a una telaraña muy densa, a su vez la grasa se emplea como lubricante de metal, los lubricantes generalmente están compuestos por aceites derivados de petróleo, por consiguiente, se presumía una emisividad alta, sin embargo, la temperatura no contrastó significativamente con el concreto (Figura No. 4. 36 y Figura No. 4. 37).

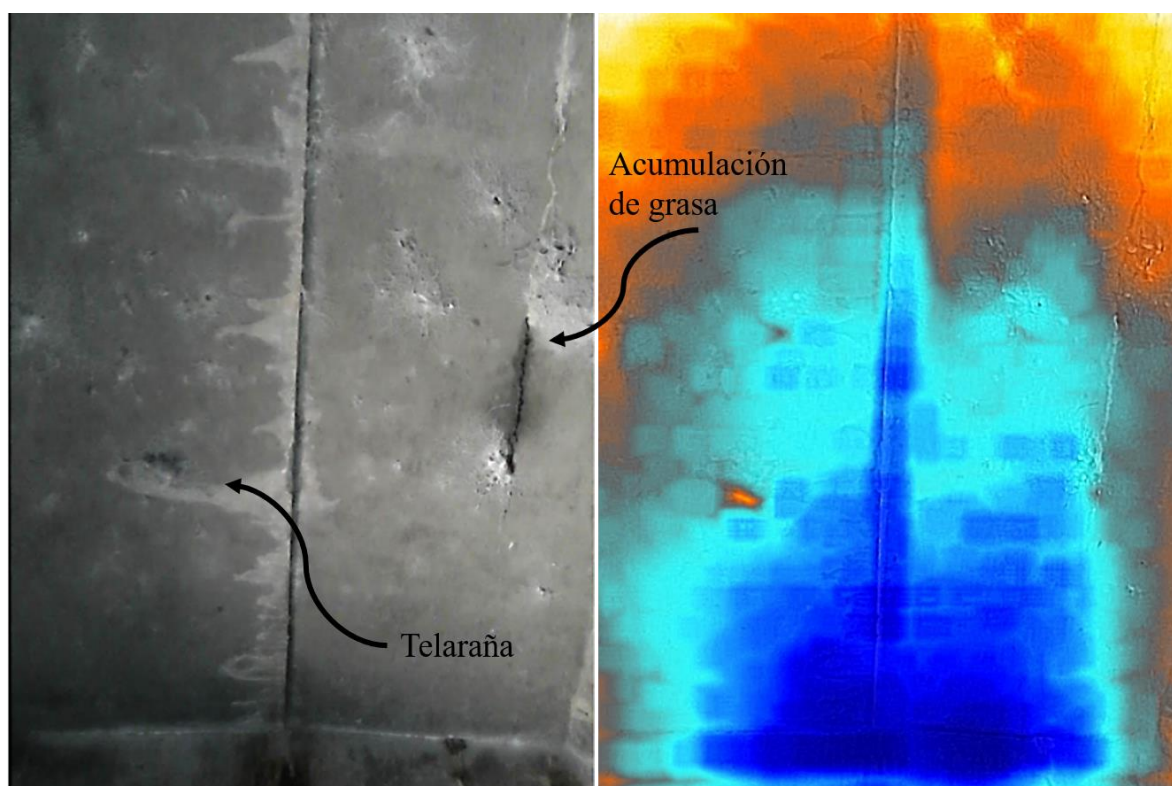


Figura No. 4. 37 Acumulación de grasa en viga principal de la sección No. 9

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4. 22 Principales daños en apoyos de la sección No. 9

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño		
		Ítem	Deformación extraña	Desplazamiento
11	Apoyos	Evaluación	5	5

Fuente: Elaboración propia

No se realizó la investigación de los daños del cuadro anterior, debido a que la ubicación de los elementos no permitió generar una imagen térmica que describiera la escena. Sin embargo, las vigas principales de la sección No. 9 se apoyan sobre unas placas de material aparentemente plástico. Estas placas se encuentran desplazadas fuera de su posición y no

están cumpliendo su función de apoyo. Esta deficiencia se evaluó como grado de daño 5 en desplazamiento y grado de daño 5 en deformación extraña, (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomó registro donde se localizan los apoyos. Tras el procesamiento, el bastión adquirió color naranja, la viga principal cian, la ubicación de los apoyos se tornó azul oscuro. En la paleta de colores, la temperatura naranja es de 41.6 °C, el cian 36.6 °C y el azul oscuro 32.1 °C. Al utilizarse un sensor con una sensibilidad térmica de escala regular (<150 mK) no se obtuvo una paleta de colores más amplia para la variación aparente de la temperatura. Por otro lado, en la viga principal se observó una huella circular con una temperatura ligeramente menor al resto de la viga, se presume indicios de pérdida de propiedades del concreto, posiblemente relacionado a la acción del agua (Figura No. 4. 38 y Figura No. 4. 39).

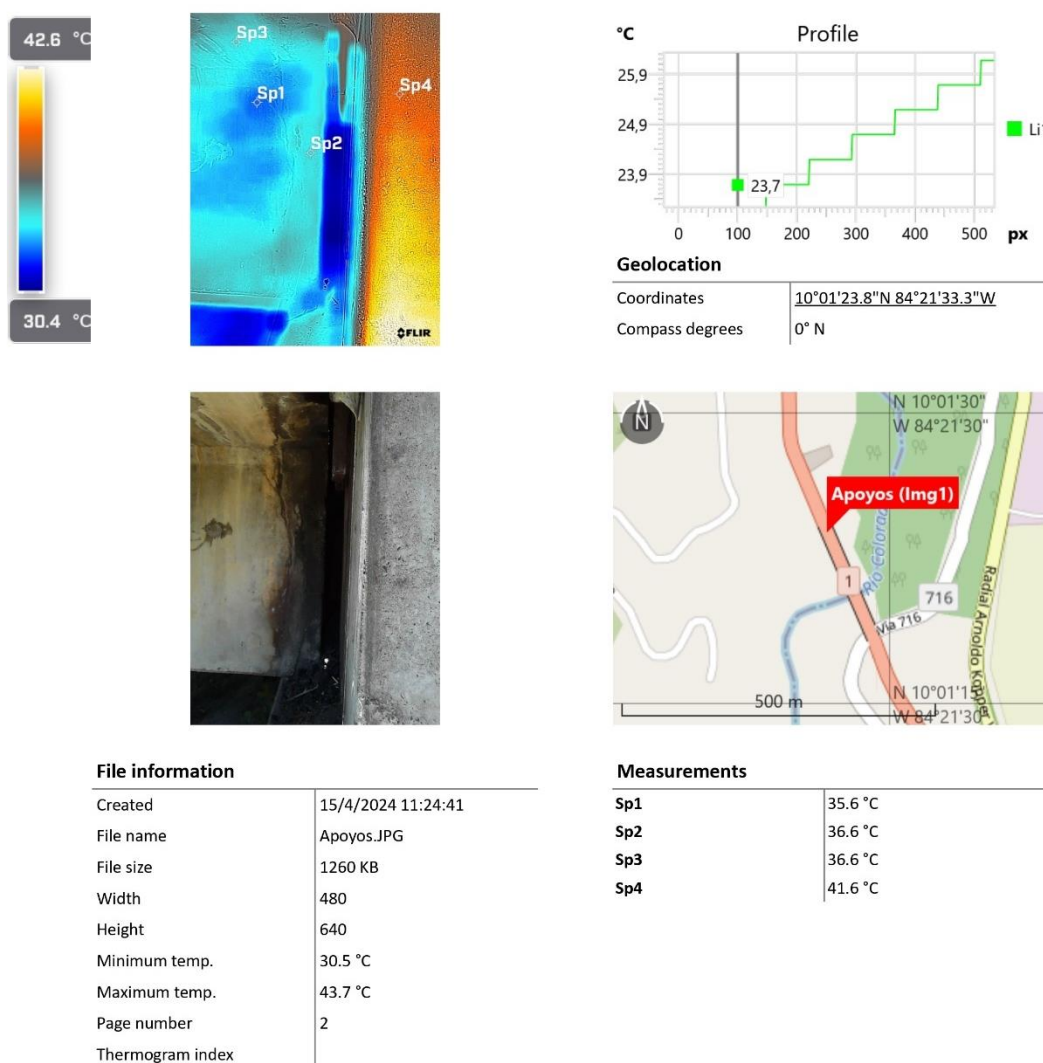


Figura No. 4. 38 Reporte térmico de filtraciones en apoyos de la sección No. 9

Fuente: Elaboración propia

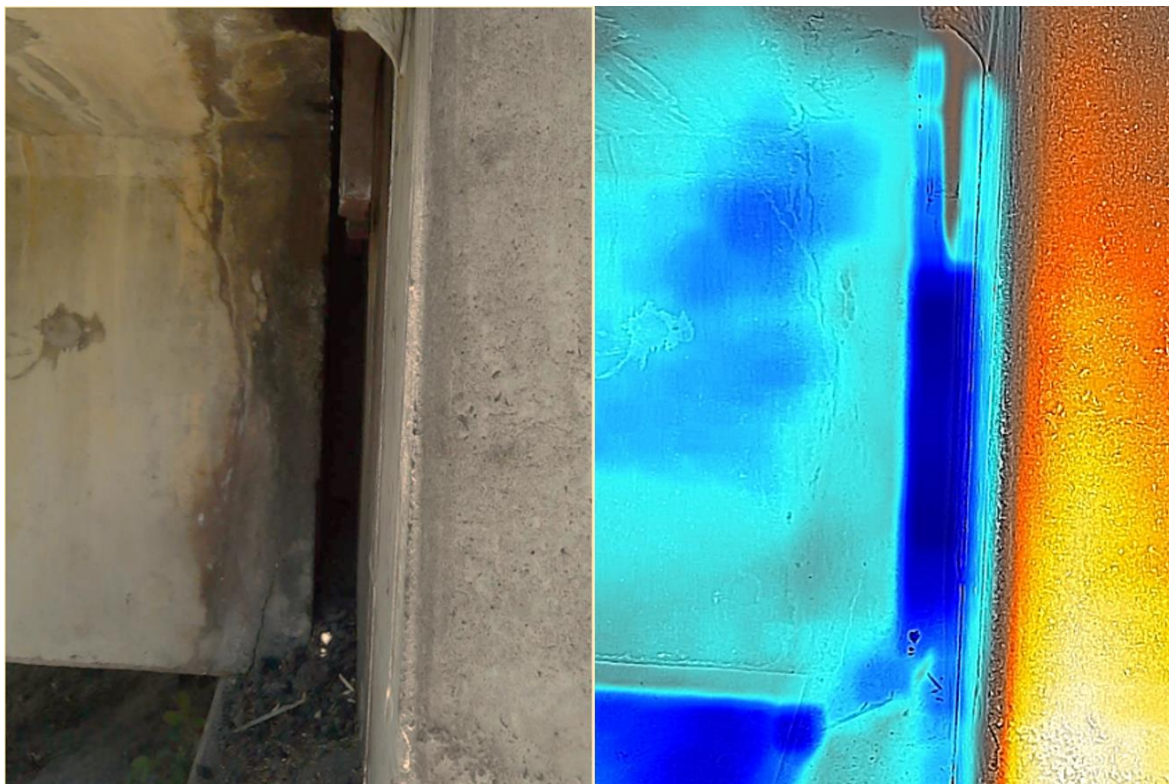


Figura No. 4.39 Detalle ampliado de los apoyos en la sección No. 9

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 4.23 Principales daños en cuerpo principal (pila) de la sección No. 9

Elemento		Tipo de daño y evaluación del grado de daño	
15	Cuerpo principal (pila)	Ítem	Grietas en una dirección
		Evaluación	4

Fuente: Elaboración propia

De la información del Cuadro No. 4.23 se investigó el daño por grietas en una dirección. La inspección señaló que, en aproximadamente un 5 % de la viga de unión intermedia entre columnas se observaron grietas en una dirección, con patrón de grietas por cortante, ancho aproximado de entre 0.3 mm y 1.0 mm, sin sellar y espaciadas aproximadamente entre 0.30 m y 0.90 m. Esta deficiencia se calificó como grado de daño 4 en grietas en una dirección, (LANAMME-UCR, 2021).

Con el sensor térmico se tomaron registros de la viga unión, no obstante, tras el procesamiento, la estructura se tornó cian, con un valor de temperatura promedio de 32 °C, por tanto, no se generó información de utilidad, a pesar de que con el MSX del sensor si se resaltó la grieta (Figura No. 4.40).

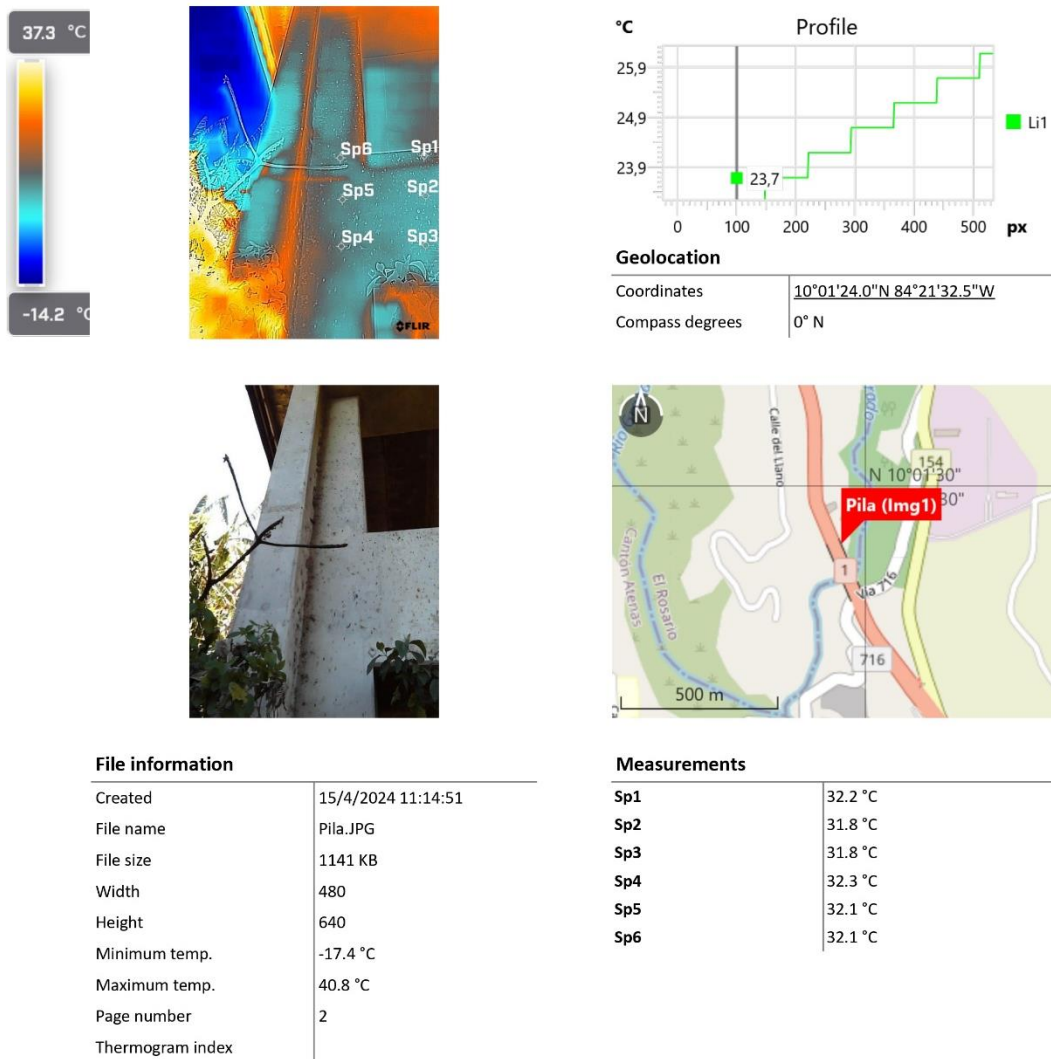


Figura No. 4. 40 Reporte térmico de grietas en cuerpo principal (pila) de la sección No. 9
 Fuente: Elaboración propia

4.2.2.6. Análisis de uso de la teledetección

Cuadro No. 4. 24 Daños verificados con cámara térmica FLIR en el puente Rafael Iglesias Castro

Daño	Elemento	Aplicabilidad de insumos térmicos	Sección
Acero de refuerzo expuesto	Cuerpo principal (pila)	Sí: el tipo de daño fue detectable con la metodología, en la viga de la pila y debido a un desprendimiento, el acero y concreto expuestos adquirieron una temperatura menor al resto de la viga. Al mismo tiempo, el concreto que rodea al desprendimiento también adquirió una temperatura diferente, debido a los cambios de propiedades del concreto y a las diferencias de emisividad entre el acero y el hormigón.	2
Deformaciones	Apoyos	No: debido a la dificultad para acceder a este elemento, no se pudo verificar mejor el tipo de daño con la metodología, además las imágenes obtenidas no mostraron la sensibilidad térmica necesaria para generar una paleta de colores a partir de la temperatura.	9
Deformaciones	Baranda de acero	Sí: este tipo de daño por deformación se puede detectar con la metodología, porque las partes de la baranda con pérdida del galvanizado alcanzaron una temperatura más alta que el resto del tubo, las superficies oxidadas tienen una emisividad mayor que el acero mejor preservado.	2
Delaminaciones	Baranda de concreto	Sí: la delaminación sucede cuando una capa superficial de concreto se desprende (como una lámina o una película). Debido a la presencia de agua y aire de exudación atrapado debajo de la superficie este tipo de daño fue detectable, ya que la película está más fría que el resto del concreto.	8
Descascaramiento	Viga de concreto	Sí: el descascaramiento que es producto de desprendimientos del concreto por impactos, adquirió una temperatura mayor que el resto de la viga. Presumiblemente los daños son detectables debido a cambios en las propiedades del concreto que ahora se expone al ambiente. Por otro lado, la metodología no permitió delimitar las grietas y fisuras que presenta la viga.	1
Descascaramiento	Viga diafragma de concreto	No: debido a su inaccesibilidad, no se registró la ubicación específica del daño reportado. Se verificó otra sección de la viga y con base en los resultados de la temperatura de la superficie y la distribución del color, se presumió también un daño por filtración de agua.	3
Eflorescencia	Martillo (pila inclinada)	No: las imágenes obtenidas no mostraron la sensibilidad térmica requerida para generar una paleta de colores por temperaturas. Las imágenes se tomaron a una distancia considerable del elemento, por tal motivo es probable que las condiciones del ambiente influenciaran el resultado.	3

Daño	Elemento	Aplicabilidad de insumos térmicos	Sección
Eflorescencia	Vigas principales, debajo del tablero	Sí: se indicó que la eflorescencia se encuentra en más de la mitad del área debajo del tablero, en esas zonas de daño, el concreto presentó una temperatura inferior, la huella del color coincidió con la eflorescencia (manchas blanquecinas de aspecto irregular que aparecen en superficies que han sufrido humedad). Cuando la superficie se seca y el agua se evapora se produce la cristalización de algunas sales solubles del hormigón, que aparentemente son detectables con la metodología.	8
Filtración de aguas	Junta de expansión	Sí: se indicó que la filtración se encuentra en más de la mitad elementos bajo la junta a lo ancho del bastión, en esas zonas el concreto adquirió un color diferente que el resto de la viga, debido a que se encuentra a una temperatura menor, presumible por cambios en las propiedades del hormigón. Por tanto, todo tipo de daño relacionado con agua es identificable con la metodología.	9
Grietas en dos direcciones	Losa	Sí: al momento de la visita las grietas en una y dos direcciones del asfalto habían sido selladas con un material bituminoso, es presumible que exista una diferencia en la emisividad de este material, como resultado, en la imagen térmica el sello tiene un color más intenso relacionado a una temperatura superior. Asimismo, se identificó que en el asfalto alrededor de las grietas se generan cambios de temperatura que podrían estar asociados al deterioro del pavimento.	3
Grietas en una dirección	Losa		2
Grietas en una dirección	Cuerpo principal (pila inclinada)	No: debido a lejanía de los elementos mencionados respecto al sitio donde se tomó la imagen, se afectó la sensibilidad térmica del sensor por las condiciones del ambiente, demostrándose que esta metodología para aplicarse debe considerar al menos: la temperatura ambiente, generar imágenes a distancias cortas y poseer un conocimiento preliminar de la emisividad teórica del elemento a analizar.	3
Grietas en una dirección	Martillo (pila inclinada)		8
Grietas en una dirección	Cuerpo principal (pila)		8 y 9
Grietas en una dirección	Viga principal de concreto		9
Obstrucción	Junta de expansión	Sí: la sensibilidad térmica facilitó diferenciar el asfalto del acero, permitiendo delimitar juntas que estén cubiertas por sobre capas de pavimento, cualitativamente también es posible delimitar la extensión de un elemento que obstruye superficialmente a otro elemento estructural, no obstante, en condiciones de buen tiempo una imagen RGB ofrece mejores resultados.	1 y 9

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

5.1. Primera área de estudio

1. Con los datos del sensor LiDAR se corroboró que la aplicabilidad al usar la teledetección en los servicios de consultoría en arquitectura en Costa Rica puede ser alta. Si bien es cierto solo se investigó bajo el enfoque del diseño de una construcción nueva, también existen otras orientaciones de esta actividad, en las que sería importante investigar la contribución para un crecimiento sostenible y deducir con mayor detalle el grado de aplicación. Por ejemplo, considerando las ampliaciones o remodelaciones de obras, la sectorización en construcción pública. En cuanto al enfoque objeto de esta investigación, se determinó que, en once de los veinticinco requisitos necesarios para optar por el permiso de construcción de una obra comercial, existe interacción directa de los datos, puesto que es imprescindible describir características físicas del terreno para tramitar el aval. En dos requisitos se podría usar de forma indirecta (solicitud de dictamen sobre cuerpos de agua y certificado de no afectación líneas de alta tensión), a pesar de que estos trámites no requieren documentación descriptiva del terreno, los datos sí pueden usarse para identificar por cuenta propia y de forma anticipada, afectaciones sobre la caracterización de un cuerpo de agua dentro de una propiedad o limitaciones en el dominio de un predio por una servidumbre eléctrica.
2. La información LiDAR se recopiló con una carta de autorización, se identificó que los archivos LAS tenían una densidad de 907.44 puntos por m². Originalmente, la clasificación de esta información estuvo compuesta por 60.67 % de datos desclasificados, 5.46 % de datos del terreno y 33.88 % de datos de vegetación alta. Una vez clasificados los datos a partir del flujo de trabajo realizado, 6.15 % de los datos no fueron clasificados, 43.88 % fueron puntos del terreno, 13.67 % vegetación baja, 2.42 % vegetación media, 33.87 % vegetación alta y 0.01 % construcciones.
3. Se creó un MDE con un tamaño de celda de 0.16 m, en formato TIFF. La técnica de interpolación utilizada fue triangulación. Los métodos de interpolación por triangulación derivan valores de celda utilizando un enfoque basado en TIN y al mismo tiempo el muestreo de los datos LAS se basó en el método de vecinos naturales para determinar el valor de cada celda. La elevación mínima obtenida fue de 548 m y la máxima fue de 665 m. Este insumo se utilizó para generar los diferentes ejemplos demostrativos relacionados a los requisitos para optar por el permiso de construcción de una obra comercial. Por ejemplo, el mapa de pendientes para evidenciar la vulnerabilidad por deslizamientos que podría afrontar el terreno o el mapa de curvas de nivel como capa base a utilizarse en los planos de conjunto.
4. Con el caso práctico, se identificó que los datos LiDAR son ampliamente utilizables en una consultoría de arquitectura que requiera confeccionar un diseño y tramitar un permiso de construcción de una obra comercial nueva. Empero, el terreno utilizado de ejemplo, tenía una cobertura mayormente de pastos, el sensor LiDAR GS-LIVOX MID40 posee

dos retornos, según sea la densidad de vegetación o cobertura predominante, no se tendría suficientes retornos para penetrar hasta el suelo, por consiguiente, siempre es adecuado corroborar los metadatos de los archivos LAS para aclarar si la muestra de información es representativa y la metodología LiDAR es aplicable al caso de interés. Actualmente, en el mercado existen drones con sensores LiDAR de hasta cinco retornos, que permiten mayor penetración para recopilar datos del terreno.

5.2. Segunda área de estudio

5. Con los datos del sensor térmico, se corroboró que existe correspondencia al usar la teledetección en los servicios de consultoría en ingeniería en el país. De igual forma que la primera área de estudio, se trabajó un enfoque en particular, no obstante, la aplicación de los datos térmicos puede ser más extendida a otras actividades del sector construcción. Asimismo, también existen otras orientaciones de esta actividad, en las que sería importante investigar la contribución para un crecimiento sostenible y deducir con mayor detalle el grado de aplicación de esta metodología para resolver situaciones. En el presente trabajo se investigó de forma práctica los diferentes daños descritos en la obra civil usada de ejemplo, encontrando relación recíproca entre la emisividad de la superficie del material y la transferencia de calor que experimentó, con la zona y tipo de deterioro conocido. Sin embargo, el fenómeno debe ejemplificarse bajo otras condiciones diferentes a las del Puente Rafael Iglesias Castro, para obtener mayor registro de resultados. Debido a que, la emisividad además de depender de la temperatura de la superficie, puede variar conforme la longitud de onda, la distancia y el ángulo de la toma.
6. Se generó información térmica del Puente Rafael Iglesias Castro, mediante dos tipos de sensores. Con el vuelo RPAS, se efectuaron cuatro misiones en un día de trabajo y sin mayores contratiempos. No obstante, en dos de las misiones, no se pudieron procesar los datos por aspectos propiamente relacionados a la forma en que se recolectó la información con el plan de vuelo. Las restantes dos misiones, si permitieron generar productos de salida, empero, se presentó incompatibilidad entre el software usado y los archivos a procesar, imposibilitando generar termogramas. Se desistió de hacer un segundo vuelo RPAS para subsanar los primeros resultados, por causa de que se identificó limitaciones para detallar algunas de las zonas con daños, principalmente en la subestructura del puente. Asimismo, al detectarse incompatibilidad entre el sensor térmico del dron Mavic 2 Enterprise Dual y el software Pix4D Mapper, se analizó que un segundo vuelo tampoco resolvería el problema. Se valoraron opciones de acuerdo a los resultados obtenidos y finalmente los insumos térmicos se generaron con un sensor térmico portátil y un software 100 % compatible. Eligiéndose así, el sensor Flir One Gen 3 y el software Flir Thermal Studio.
7. Al no generarse insumos con las imágenes aéreas RPAS, no se pudo identificar los beneficios de las imágenes de banda infrarroja respecto a las RGB. Sin embargo, con las imágenes del sensor Flir, se identificó la utilidad del MSX, esta metodología desarrolla

una imagen dinámica multispectral que añade detalles de luz visible a las imágenes térmicas para aumentar la claridad, incrustando detalle de bordes y contornos sobre las lecturas térmicas, es decir, realizó una combinación de imágenes RGB y térmica sin mediar una fusión que diluya la transparencia térmica, permitiendo diferenciar cambios de temperatura entre los materiales y sus características físicas de forma más detallada.

8. Con el caso práctico del Puente Rafael Iglesias Castro, se identificó que los datos térmicos pueden utilizarse como insumos para detectar cierto tipo de daños, sin embargo, los resultados deben manejarse con cierta discreción, ya que los cambios de temperatura de un material pueden verse influenciados por diferentes factores. La metodología térmica fue acompañada con otra metodología de análisis (inspección ocular de 11 de junio de 2021) para poder verificar cualitativamente el estado y daños de la estructura.
9. Cabe mencionar que, el sensor térmico del dron, tuvo dificultad para recolectar cierta información, debido a que algunos daños estaban en sitios inaccesibles para el correcto funcionamiento del equipo (probabilidad de colisión de la aeronave con el puente), de igual forma el sensor térmico de mano ofreció limitaciones para hacer comprobaciones en sitios de mediano y largo alcance, ya que la temperatura que genera es relativa y puede verse afectada por el ambiente.

Referencias Bibliográficas

- Medvev, A. (2013). *What is a "Forward looking infrared imaging system?"*. Obtenido de <https://www.theguardian.com/notesandqueries/query/0,-203857,00.html#:~:text=They%20can%20be%20used%20to,objects%20against%20a%20cooler%20background.>
- ACI USA Inc. (28 de Marzo de 2024). *3 usos del LiDAR en la ingeniería civil*. Obtenido de <https://acicorporation.com/espanol/category/sistema-lidar/>
- ANIPPAC. (18 de Mayo de 2016). *Capítulo 4: Diseño de puentes con elementos prefabricados y presforzados*. Obtenido de <https://anippac.org.mx/demos/cap03.pdf>
- Bosque, S. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Ediciones Rialp S.A.
- Briñeza, M., & Penagos, M. (2021). La Sostenibilidad como Estrategia Competitiva en empresas del sector Construcción del Departamento de Antioquia - Colombia. *Telos, Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín*, 325-346.
- Burrough, P. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for land resources*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- CCC. (2022). *Informe Económico del Sector Construcción*. San José: Dirección de Investigación y desarrollo técnico.
- CFIA. (11 de noviembre de 2015). *Ley Orgánica del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica*. Obtenido de <https://cfia.or.cr/legal/archivos/Ley%20Organica.pdf>
- CFIA. (10 de enero de 2018). *Trámites de Construcción*. Obtenido de <https://tramitesconstruccion.go.cr/APCRCategorias/clasificaciones.html>
- CFIA. (29 de Julio de 2019). *Reglamento para la contratación de servicios de consultoría en ingeniería y arquitectura*. Obtenido de Sistema Costarricense de Información Jurídica: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=89432&nValor3=117399&strTipM=TC
- Chance, J. (2000). *LiDAR Microconception*. Luisiana, Estados Unidos: Land Survey Inc.
- CNE. (2 de Mayo de 2024). *Amenazas del origen natural del cantón de San Ramón*. Obtenido de https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/mapas_de_amaneza/alajuela/San%20Ramon%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf
- CNE. (18 de Mayo de 2024). *Definición y componentes de los puentes*. Obtenido de <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20v2.0/CEDO/pdf/spa/doc12131/doc12131-14.pdf>
- CNN Travel. (18 de Marzo de 2022). Turkey opens record-breaking bridge between Europe and Asia. *Istanbul (Reuters)*, págs. <https://web.archive.org/web/20220320083342/https://www.cnn.com/travel/article/turkey-worlds-biggest-bridge/index.html>.
- Cruz, R. (2016). *EDECA*. Obtenido de <http://www.edeca.una.ac.cr/files/SIG12016/Presentacion3.pdf>
- DJI. (26 de Marzo de 2024). *DJI - Página oficial*. Obtenido de <https://www.dji.com/global>

- DJI Enterprise. (1 de Noviembre de 2021). Obtenido de Conceptos básicos de los drones térmicos: <https://enterprise-insights.dji.com/es/blog/conceptos-b%C3%A1sicos-de-drones-t%C3%A9rmicos>
- Dzurisin, D. (2007). *Volcano Deformation*. Berlin: Die Deutsche Bibliothek.
- Enwright, N. (04 de Agosto de 2017). *Using relative topography and elevation uncertainty to delineate dune habitat on barrier islands*. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5bd119f3e4b0b3fc5ce163e6>
- Fallas, J. (2007). Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. *Academia Edu*, 4-26.
- FAMAF. (17 de Mayo de 2024). *Radiación de cuerpo negro*. Obtenido de Universidad Nacional de Córdoba: <https://www.famaf.unc.edu.ar/~gcas/cuantica1/clases/node2.html>
- Felicísimo, A. (1994). Modelos digitales del terreno, introducción y aplicaciones en ciencias ambientales. Oviedo: Universidad de Oviedo, Escuela de Minas, Energía y Materiales.
- FLIR Teledyne. (18 de Febrero de 2022). *Teledyne FLIR Gives Çanakkale Bridge Travelers a Safer Crossing*. Obtenido de <https://www.flir.com/discover/traffic/teledyne-flir-gives-canakkale-bridge-travelers-a-safer-crossing/>
- Foxgrover, A., Finlayson, D., Jaffe, B., & Fregoso, T. (Marzo de 2018). *Bathymetry and Digital Elevation Models of Coyote Creek*. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20111315>
- Fuentes, R., Hernandez, R., Jimenez, C., Montilla-Rosero, E., Saavedra, E., & Silva, A. (2014). *Observatorio LIDAR-CEFOP*. Retrieved from http://www.tigo.cl/documents/sirgas/Poster_LiDAR_Observatorio-LIDAR-CEFOP.pdf
- García-Ramos, C., & Dávila, J. (2008). Una aplicación de la consultoría al ámbito de la Ingeniería de Organización. *XII Congreso de Ingeniería de Organización*, 1327-1329.
- IAGS. (1970). Manual de computaciones para levantamientos: Nivelación Diferencial. Colorado, Estados Unidos: Escuela Cartográfica del Servicio Geodésico Interamericano.
- IBM. (21 de Julio de 2022). *¿Qué es LiDAR?* Obtenido de <https://www.ibm.com/mx-es/topics/lidar>
- INEC. (27 de Octubre de 2023). *Listado de Temáticas*. Obtenido de Estadísticas de la Construcción. 2022. Número de construcciones, área en metros cuadrados y valor en miles de colones por clase de obra según provincia y cantón: <https://inec.cr/es/tematicas/listado?topics=134%252C336&page=2>
- INEC. (7 de Marzo de 2024). *Costa Rica, 2022 - 2023 Estadísticas de la Construcción*. Obtenido de Estadísticas de la Construcción. 2023. Número de obras, área en metros cuadrados y valor en miles de colones por clase de permiso según provincia, cantón y destino de la obra (cifras preliminares): <https://inec.cr/es/tematicas/listado?topics=134%252C336>
- INEC. (14 de Marzo de 2024). *Total de Obras de Construcción en 2023*. Obtenido de <https://inec.cr/noticias/total-obras-construccion-2023-disminuyo-65-respecto-al-ano-anterior>
- INEGI. (2014). Obtenido de Modelos Digitales de Elevación (MDE): <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Preview.aspx>

- INEGI. (2015). Obtenido de Tecnología LIDAR:
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/LiDAR.aspx>
- Kopp, C. (2009). Thermal Imaging Sensors. *NCW 101*, 52-55.
- LANAMME-UCR. (2021). *Inspección de puente Rafael Iglesias (Río Colorado)*. San José: Programa de Ingeniería Estructural.
- LANAMME-UCR. (2022). Tipos e intervalos de inspecciones de puentes en servicio. *Programa de Ingeniería Estructural, No. 1, Volumen 7*, 1-11.
- Livox. (26 de Marzo de 2024). *Livox LiDAR Sensors - For massive industrial applications*. Obtenido de <https://www.livoxtech.com/>
- Martínez-Barbáchano, R. (2019). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *EUNA*, 17-32.
- Ministerio de Salud. (2 de Mayo de 2024). *Visto bueno de Ubicación para Plantas de Tratamientos o Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales*. Obtenido de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/tramites/empresas/2-uncategorised/129-visto-bueno-de-ubicacion-para-plantas-de-tratamientos-o-sistema-de-tratamiento-de-aguas-residuales>
- Monza Lista. (26 de Agosto de 2020). Obtenido de Lección 5: El valor y la luz:
<https://lamonalista.com/valor-y-luz/>
- Moreno, R. (2012). La Competitividad en el Desarrollo Sustentable. *Alternativas para el Desarrollo*, 5-13.
- NASA. (26 de Marzo de 2013). *Electromagnetic Spectrum - Introduction - Imagine the Universe!* Obtenido de <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, España: Victor Olaya.
- PITRA-LANAMME-UCR. (2017). Vehículos aéreos no tripulados del lanammeucr: una herramienta multidisciplinaria adaptada para todo tipo de condiciones al servicio del país. *Boletín Técnico*, 1-2.
- Pix4D. (1 de Mayo de 2024). Obtenido de Processing thermal images:
<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000173463-Processing-thermal-images>
- PROCOMER. (18 de Abril de 2022). *Innovaciones que cambian el futuro de la construcción sostenible*. Obtenido de https://www.procomer.com/alertas_comerciales/comprador-internacional-alerta/innovaciones-que-cambian-el-futuro-de-la-construccion-sostenible/
- Promax. (9 de Julio de 2019). *Cámaras Termográficas: Cómo funcionan y por qué pueden ser necesarias*. Obtenido de <https://www.promax.es/esp/noticias/400/camara-termografica-como-funcionan-y-por-que-pueden-ser-necesarias/#:~:text=Dentro%20de%20este%20amplio%20margen,los%20%2D20%20y%20350%20%C2%BAC>.
- Rodríguez, R. (2008). *Aplicación de tecnología LIDAR en levantamientos topográficos de líneas de transmisión*. Heredia: Escuela Topografía Catastro y Geodesia, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

- SENARA. (22 de Mayo de 2023). *Trámites en la Dirección de Investigación y Gestión Hídrica*. Obtenido de <https://senara.go.cr/proyectos/aguassubterraneas/Tramites.aspx>
- SENARA. (5 de Mayo de 2024). *Estudios Hidrogeológicos*. Obtenido de <https://www.senara.go.cr/proyectos/aguassubterraneas/Estudios%20hidrogeologicos.aspx>
- SETENA. (2 de Mayo de 2024). *Formulario D1*. Obtenido de <https://www.setena.go.cr/Downloads/documentos/Formularios/Requisitos/ST-LRA-Gu%C3%ADa-08-v.01-Gu%C3%ADa%20de%20Requisitos%20D1.pdf>
- Teledyne FLIR. (12 de Setiembre de 2023). *What's The Difference between Thermal Imaging and Night Vision?* Obtenido de https://www.flir-com.translate.google.com/discover/ots/thermal-vs-night-vision/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=rq#::~:~:text=FLIRs%20make%20pictures%20from%20heat,thermal%20energy%2C%20and%20vice%20versa.
- Teledyne Flir. (26 de Marzo de 2024). *Teledyne FLIR: Thermal Imaging, Night Vision and Infrared cameras*. Obtenido de <https://www.flir.com/>
- Vargas Alas, L. G. (2017). Historia, comportamiento y retos del puente Rafael Iglesias. *Programa de Ingeniería Estructural N° 8, Volumen 2*, 1-8.
- Velasquez, B., Marin, C., & Ordonez, D. (2013). *Análisis de la calidad interpolante de cinco algoritmos en un modelo digital de elevaciones, en función del error medio cuadrático*. Armenia, Colombia: Universidad del Quindío, programa de Tecnología en Topografía.