



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA DE MONITOREO DE INCENDIOS EN EL CERRO CASIGANA
MEDIANTE UAVS PARA EL APOYO OPERATIVO DEL CUERPO DE
BOMBEROS AMBATO**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingenieros en Telecomunicaciones

ÁREA: Comunicaciones

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de la Información y Sistemas de
Control

AUTORES: Bryan Daniel Espin Silva

Selena Tatiana Llivicota Carpio

TUTOR: Ing. Franklin Wilfrido Salazar Logroño, Mg.

Ambato - Ecuador

julio – 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO DE INCENDIOS EN EL CERRO CASIGANA MEDIANTE UAVS PARA EL APOYO OPERATIVO DEL CUERPO DE BOMBEROS AMBATO, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por los señores Bryan Daniel Espin Silva y Selena Tatiana Llivicota Carpio, estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que los estudiantes han sido tutorados durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.



Ambato, julio 2026.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**FRANKLIN WILFRIDO
SALAZAR LOGRÑO**

Ing. Franklin Wilfrido Salazar Logroño, Mg.
TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO DE INCENDIOS EN EL CERRO CASIGANA MEDIANTE UAVS PARA EL APOYO OPERATIVO DEL CUERPO DE BOMBEROS AMBATO es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Ambato, julio 2026.

Bryan Daniel Espin Silva

C.C. 1804312443

AUTOR

Selcna Tatiana Llivicota Carpio

C.C. 0604666065

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedemos todos los derechos de autores a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

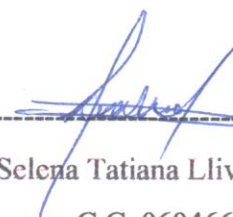
Ambato, julio 2026.



Bryan Daniel Espin Silva

C.C. 1804312443

AUTOR



Selenia Tatiana Llivicota Carpio

C.C. 0604666065

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por los señores Bryan Daniel Espin Silva y Selena Tatiana Llivicota Carpio, estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA DE MONITOREO DE INCENDIOS EN EL CERRO CASIGANA MEDIANTE UAVS PARA EL APOYO OPERATIVO DEL CUERPO DE BOMBEROS AMBATO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, julio 2026.



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**FRANKLIN OSWALDO
MAYORGA MAYORGA**

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**SANTIAGO MAURICIO
ALTAMIRANO MELENDEZ**

Ing. Santiago Mauricio Altamirano Melendez, Mg
PROFESOR CALIFICADOR



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**EDGAR PATRICIO
CORDOVA CORDOVA**

Ing. Edgar Patricio Cordova Cordova, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A mis padres, Jaime y Marina, por su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional en cada momento de mi vida, convirtiéndose en el mayor ejemplo para mi formación personal y profesional. Gracias por cada palabra de aliento, cada abrazo reconfortante, cada conversación que me ayudó a no rendirme y por creer siempre en mí, a pesar de todos los tropiezos que se presentaron durante esta trayectoria. Cada uno de mis logros también les pertenece a ustedes.

A mi hermano, Stalin, a quien estaré eternamente agradecido por ser un pilar fundamental en mi vida, por sus consejos, sus risas y compartir conmigo cada paso que doy en este camino llamado vida.

A mis abuelos, Miguel e Irene, por su cariño incondicional y por preocuparse siempre por mi bienestar. Su apoyo y amor han sido muy importantes para mí. ¡Siempre estaré eternamente agradecido!

Bryan Daniel Espin

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme y darme salud en cada paso del camino. A mi familia, por estar siempre a mi lado, en las buenas y en las malas, apoyándome incondicionalmente y ayudándome a cumplir cada una de mis metas ya que esta es una de ellas.

A mi tutor de tesis Ing. Franklin Salazar por guiarme en este proyecto de titulación y a todos los docentes de la carrera de Telecomunicaciones, por ser unas excelentes personas y profesionales ya que me brindaron sus conocimientos.

A todos mis amigos ya que fueron mis compañeros que de alguna manera han contribuido en este camino apoyándonos mutuamente, gracias por ser parte de mi vida estudiantil.

A todas las personas que de una u otra manera fueron parte de este camino siempre estaré agradecido por su granito de arena.

Bryan Daniel Espin

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mi madre, Judith, y a mi hermano, Jipson, por su constante esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional brindado a lo largo de este camino. Gracias por sus palabras de aliento y por creer siempre en mí y en mis capacidades.

A mi abuelita Sofía, quien con sus oraciones y su fe ha encomendado siempre mi vida y cada una de mis actividades a Dios.

A mis amigos y compañeros, con quienes compartí momentos de esfuerzo, aprendizaje y apoyo mutuo desde el inicio de la vida universitaria

Selena Tatiana Llivicota

.

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por guiarme y darme fuerzas en cada paso de este camino, y por las constantes bendiciones derramadas sobre mi familia y las personas que aprecio.

A mi familia, especialmente a mis tías Emperatriz, Zoila, Anita, Chavea y Juana, a mi tío Armando y a mi padre Washington, por estar siempre a mi lado, tanto en los buenos como en los momentos difíciles, brindándome su apoyo incondicional.

También expreso mi gratitud a mi padrastro, por el constante apoyo brindado a mi madre, que de manera indirecta también ha sido un apoyo importante para mí.

A mi amiga, la Ing. Elizabeth Eugenio, quien siempre estuvo a mi lado, apoyándonos mutuamente y afrontando juntos los desafíos que se presentaron durante nuestra trayectoria universitaria.

A mi tutor de tesis, el Ing. Franklin Salazar, y a todos los docentes de la carrera de Telecomunicaciones, por ser excelentes guías y compartir sus conocimientos, permitiéndome aprender cada día algo nuevo.

Finalmente, agradezco a mis amigos Telenchana, Cando, Shani, Vane y Erik, así como a todos aquellos compañeros que de una u otra manera contribuyeron en este camino.

Selena Tatiana Llivicota

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTO	ix
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xx
RESUMEN EJECUTIVO	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Tema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes investigativos	3
1.3 Fundamentación teórica	5
1.3.1 Factores Ambientales Globales	5
1.3.2 Incendios.....	7
1.3.3 Incendios Forestales	8
1.3.4 Sistemas tecnológicos para gestión de desastres	9
1.3.5 Tecnologías móviles y autónomas de observación y respuesta	10
1.3.6 UAVs (Drones)	12
1.3.7 Aplicaciones de los UAVs en diferentes áreas de desarrollo	18
1.3.8 Sistemas de control de vuelo basados en software para UAVs.....	20
1.3.9 GPS aplicado a UAVs FPV.....	23
1.3.10 Emisor y receptor de vuelo.....	25
1.3.11 Fuente de alimentación para UAV	26
1.3.12 Motor Karearea TOA LITE 2306.....	28
1.3.13 Permiso para volar UAVs en Ecuador.....	29
1.3.14 Reglamento de radiocomunicaciones	29
1.3.15 Espectro electromagnético	31

1.3.16 Fundamentos de la radiación térmica aplicada a la obtención de imágenes TIR	33
1.3.17 Cámaras térmicas	43
1.3.18 Sensor térmico MLX90640	46
1.3.19 Cámaras RGB	48
1.3.20 Sistemas FPV	49
1.3.21 Distancia de muestreo en el suelo (GSD)	52
1.3.22 Herramientas para el procesamiento de imágenes	53
1.3.23 Detección temprana de focos de calor en áreas forestales	56
1.3.24 Red convolucional YOLO.....	57
1.3.25 Plataformas de servicios en la nube.....	59
1.3.26 Equipo computacional para programación	60
1.4 Objetivos	62
1.4.1 Objetivo general.....	62
1.4.2 Objetivos específicos	62
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	63
2.1 Materiales.....	63
2.2 Métodos.....	67
2.2.1 Modalidad de la investigación.....	67
2.2.2 Recolección de información.....	69
2.2.3 Procesamiento y análisis de datos	70
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
3.1 Desarrollo de la propuesta.....	71
3.1.1 Análisis de sistemas de monitoreo de incendios con UAVs	72
3.1.2 Caracterización del entorno del Cerro Casigana.....	76
3.1.3 Requerimientos del sistema de monitoreo	82
3.1.4 Selección de tecnologías para el sistema	86
3.1.5 Esquema general del sistema.....	92
3.1.6 Diseño de conexiones electrónicas del sensor térmico MLX90640 con ESP32	93
3.1.7 Diseño del sistema de transmisión de datos del sensor.....	94
3.1.8 Diseño del sistema de captura y transmisión de video RGB.....	95
3.1.9 Diseño del sistema de captura y transmisión de CÁMARA TÉRMICA FPV	96
3.1.10 Diseño de conexiones electrónicas del módulo GPS	97
3.1.11 Diseño de la interfaz web de monitoreo remota	97
3.1.12 Diseño de la interfaz web de visualización de los datos en Azure	99
3.1.13 Estructura de la base de datos para almacenamiento	101

3.1.14 Implementación del sensor térmico MLX90640 y ESP32 en el UAV	102
3.1.15 Implementación del sistema de transmisión de video 5.8GHz	103
3.1.16 Implementación del sistema de transmisión de video CÁMARA TÉRMICA FPV ..	104
3.1.17 Verificación del peso total del UAV	105
3.1.18 Consumo de energía y tiempo de vuelo estimado.....	106
3.1.19 Configuración del UAV	108
3.1.20 Planos de vuelo autónomos	111
3.1.21 Configuración del sistema de captura de datos del sensor MLX90640	114
3.1.22 Simulación de planes de vuelo en Matlab	117
3.1.23 Desarrollo del algoritmo para detección de focos de calor con el MLX90640	120
3.1.24 Desarrollo del algoritmo para detección de focos de calor con la cámara térmica....	122
3.1.25 Implementación del algoritmo para detección de fuego/humo con YOLO.....	124
3.1.26 Implementación del algoritmo para detección de personas con YOLOv8	130
3.1.27 Creación y configuración de una infraestructura de almacenamiento en Azure	133
3.1.28 Creación y configuración de la página web en Azure.....	135
3.1.29 Creación y configuración de la página web remota en VSCode	147
3.1.30 Integración del sistema completo	152
3.1.31 Planteamiento del espacio para pruebas	153
3.1.32 Pruebas del sensor MLX90640 y detección de calor	155
3.1.33 Pruebas del sistema de transmisión de la CÁMARA TÉRMICA FPV	159
3.1.34 Validación del sistema con el Cuerpo de Bombero	173
3.1.35 Ajustes y mejoras al sistema post-pruebas	175
3.1.36 Discusión de resultados	176
3.1.37 Presupuesto del proyecto.....	177
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	181
4.1 Conclusiones	181
4.2 Recomendaciones.....	182
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183
ANEXOS	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas de los UAVs [26].	17
Tabla 2. Características software controlador de vuelo [30].	22
Tabla 3. Características de los GPS [31].	24
Tabla 4. Características de los radios controles [33].	26
Tabla 5. Baterías LiPo [34].	27
Tabla 6. Bandas de frecuencia asignadas en Ecuador [37].	30
Tabla 7. Banda espectral del espectro infrarrojo [40].	33
Tabla 8. Características técnicas de cámaras para drones [52].	50
Tabla 9. Características de transmisores de video.	51
Tabla 10. Características de receptores de video.	52
Tabla 11. Características de plataformas con servicios en la nube [63].	59
Tabla 12. Características de ordenadores portátiles [64].	61
Tabla 13. Materiales y dispositivos [65].	63
Tabla 14. Softwares y servicios de aplicación [66].	66
Tabla 15. Recolección de Información.	69
Tabla 16. Características de la batería LiPo.	106
Tabla 17. Valores de Precision, Recall y mAP obtenidos por el modelo best.pt....	128
Tabla 18. Evaluación del enlace FPV y comportamiento del sensor térmico MLX90640.	156
Tabla 19. Resultados experimentales del sistema de monitoreo térmico FPV	159
Tabla 20. Resultados operativos del sistema de cámara térmica FPV en la Zona 2	162
Tabla 21. Análisis de detección térmica durante el segundo vuelo en la Zona 1	165
Tabla 22. Evaluación del sistema térmico FPV durante el segundo vuelo en la Zona 2	168
Tabla 23. Validación de vuelo del UAV.	171
Tabla 24. Resultados experimentales del sistema mediante videos de simulación..	172
Tabla 25. Presupuesto de los materiales del sistema.	179

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Factores ambientales globales en incendios forestales	6
Figura 2. Sistemas de los UAVs	12
Figura 3. UAV de ala fija [26].	14
Figura 4. UAV de ala rotatoria [26].	14
Figura 5. UAV tipo helicóptero [26].	15
Figura 6. UAV Tricóptero [26].	15
Figura 7. UAV cuadricóptero [26].	16
Figura 8. UAV Hexacóptero [26].	16
Figura 9. Aplicaciones de los UAVs	18
Figura 10. Emisora T-pro y Receptor asociado [32].	25
Figura 11. Motor Karearea TOA LITE 2306 [35].	28
Figura 12. Espectro electromagnético	31
Figura 13. Espectro visible	32
Figura 14. Ilustración de un campo de visión	35
Figura 15. Ejemplo de escala de píxeles deseada	37
Figura 16. Medio absorbente y medio detector.	40
Figura 17. (a) Fracción de la radiación emitida por las fuentes transmitida a través de aire húmedo. (b) Variación de la temperatura observada respecto a la temperatura real, como resultado de los procesos de absorción y emisión producidos por la niebla [45].	41
Figura 18. Bandas MWIR y LWIR relativas a las ventanas atmosféricas [46].	42
Figura 19. Emisividad y FOV [47].	43
Figura 20. Paleta de colores térmicos [48].	44
Figura 21. Ejemplos de cada una de las principales paletas térmicas.	44
Figura 22. Características del Sensor térmico MLX90640 [49].	47
Figura 23. Sistema de captura digital.	48
Figura 24. Sistema de transmisión.	51
Figura 25. Detección de indicio de incendio con YOLO.	57
Figura 26. mAP COCO vs número de Parámetros (pesos y sesgos) – YOLOv8 [61].	58
Figura 27. Diseño de un sistema de monitoreo RGB.	73

Figura 28. Sistemas de posicionamiento y navegación.....	74
Figura 29. Detección térmica.	75
Figura 30. Monitoreo ambiental.....	75
Figura 31. Sistema de comunicación.	76
Figura 32. Cerro Casigana.....	77
Figura 33. Postes de concreto utilizados en la red eléctrica.....	79
Figura 34. Torres de celosía.	80
Figura 35. Líneas de Media y Alta Tensión.	81
Figura 36. Antenas sectoriales.	82
Figura 37. Requerimientos operativos.	83
Figura 38. Requerimientos técnicos.....	85
Figura 39. Cuadricóptero armable tipo SpeedyBee F405 V3.	87
Figura 40. Sensor MLX90640.....	88
Figura 41. Cámara analógica FPV RunCam Micro Swift de 5.8 GHz.	89
Figura 42. GPS TBS M8.2 GLONASS.....	89
Figura 43. microcontrolador ESP32.....	90
Figura 44. Batería LiPo 4S de 14.8 V (1550 mAh, 100C).....	90
Figura 45. Esquema general del sistema de monitoreo mediante UAV.	92
Figura 46. Diagrama de conexión Sensor MLX90640 y ESP32.	94
Figura 47. Sistema de transmisión de datos del sensor térmico MLX90640.....	95
Figura 48. Sistema de captura y transmisión de video RGB.....	95
Figura 49. Sistema de captura y transmisión de CÁMARA TÉRMICA FPV.....	96
Figura 50. Conexiones electrónicas del módulo GPS.....	97
Figura 51. Esquema de la Interfaz web de monitoreo remota.....	98
Figura 52. Esquema de la interfaz web de visualización de los datos en Azure.....	99
Figura 53. Arquitectura de datos del sistema de almacenamiento y visualización..	101
Figura 54. Implementación del sensor térmico MLX90640 y ESP32 en el UAV...	103
Figura 55. Implementación del sistema de transmisión de video 5.8GHz.....	104
Figura 56. Implementación del sistema de transmisión de video con cámara térmica FPV.	105
Figura 57. Peso total del UAV.	105
Figura 58. Interfaz principal del software Mission Planner de ArduPilot.....	109
Figura 59 Tipo de frame del UAV.	109

Figura 60. Radio control (Jumper T-pro).....	111
Figura 61. Trayectoria automatizada correspondiente a la Zona 1.	112
Figura 62. Configuración de la misión de vuelo de la Zona 1 automatizada.....	112
Figura 63. Trayectoria automatizada correspondiente a la Zona 2.	113
Figura 64. Configuración de una segunda trayectoria de vuelo de la Zona 2.....	114
Figura 65. Librerías para el control del sensor térmico, comunicación WiFi y transmisión UDP.	114
Figura 66. Declaración del objeto e inicialización de la matriz de datos para el sensor térmico MLX90640.....	114
Figura 67. Definición del identificador de red (SSID) y contraseña para el modo Access Point.	115
Figura 68. Configuración del protocolo UDP, dirección IP de difusión y puerto de comunicación.	115
Figura 69. Fase de inicialización.....	115
Figura 70. Algoritmo de inicialización y control de excepciones para el sensor térmico MLX90640.....	115
Figura 71. Ajuste de modo de lectura en ajedrez, resolución del ADC a 18 bits y frecuencia de muestreo de 4 Hz.	116
Figura 72. Creación del punto de acceso WiFi.	116
Figura 73. Lectura continua de la matriz térmica.	116
Figura 74. Estructura de control iterativa para la ejecución cíclica de subtareas. ...	116
Figura 75. Secuencia de empaquetado y transmisión inalámbrica de datos vía UDP Broadcast.....	117
Figura 76. Sentencia de temporización para el control de la tasa de refresco del sistema.	117
Figura 77. Diseño y modelado tridimensional del chasis del cuadricóptero (Quadcopter_Y1101).....	118
Figura 78. Función de cálculo matricial para el desplazamiento dinámico de los vértices del UAV.....	119
Figura 79. Resultados de la simulación tridimensional de la trayectoria cinemática del UAV en MATLAB.	120
Figura 80. Diagrama de flujo del firmware para la inicialización, captura termográfica y transmisión inalámbrica UDP.	121

Figura 81. Diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento digital de imágenes para la segmentación y detección de focos térmicos.	122
Figura 82. Algoritmo de visión computacional y aprendizaje profundo para la detección automatizada de fuego y humo.	125
Figura 83. Ejemplos del dataset utilizado para el entrenamiento del modelo.....	127
Figura 84. Resultados del proceso de entrenamiento y validación del modelo best.pt.	128
Figura 85. Matriz de confusión del best.pt.....	129
Figura 86. Diagrama de flujo del pipeline de inferencia optimizado con YOLOv8n para la detección y conteo de personas.	131
Figura 87. Ajustes de suscripción, grupo de recursos y redundancia para el servicio Azure Blob Storage.....	133
Figura 88. Estructura de contenedores lógicos en Azure Blob Storage para la persistencia de datos del sistema.....	134
Figura 89. Credenciales criptográficas (key1 y key2) para la autenticación segura del sistema de monitoreo.....	134
Figura 90. Validación de la carga y persistencia de archivos en el contenedor Azure Blob Storage.....	135
Figura 91. Estructura de la carpeta UAVS.....	136
Figura 92. Instanciación del cliente del servicio Azure Blob Storage en Python mediante cadena de conexión.....	136
Figura 93. Función base para el control de acceso restringido a objetos en Azure Blob Storage.....	137
Figura 94. Ruta de backend para el control de acceso y validación de credenciales del operador.....	137
Figura 95. Rutina para la vinculación de referencias lógicas a los contenedores de videos y reportes.	137
Figura 96. Ruta dinámica de backend para la remoción segura de objetos en Azure Blob Storage.....	138
Figura 97. Definición del endpoint en el framework web para el servicio de finalización de sesión.	138
Figura 98. Directiva de maquetación web para la canalización de solicitudes mediante el método POST.	138

Figura 99. Atributo de validación nativa en el frontend para campos obligatorios de autenticación.	139
Figura 100. Declaración de botón de tipo submit para el disparo del formulario en el frontend	139
Figura 101. Propiedades CSS Flexbox para la alineación y centrado absoluto de los elementos de la interfaz.....	139
Figura 102. Estructura frontend para el conteo automático de elementos lógicos en el panel de control.....	140
Figura 103. Bloque frontend para la visualización dinámica del censo de individuos en la zona de monitoreo.	140
Figura 104. Script en JavaScript para la inicialización y centrado geográfico del mapa interactivo mediante Leaflet.....	141
Figura 105. Estructura del archivo requirements.txt para el despliegue del backend y conectores en la nube.	141
Figura 106. Parametrización de recursos, entorno de ejecución y plan de facturación en Azure App Service.	142
Figura 107. Exclusión voluntaria del componente Application Insights durante el aprovisionamiento de la Web App.....	143
Figura 108. Validación exitosa de la arquitectura y resumen de aprovisionamiento de la Web App en Azure.....	143
Figura 109. Ejecución del comando de despliegue directo a Azure App Service desde Visual Studio Code.	144
Figura 110. Interfaz de selección y validación de la carpeta raíz del proyecto para el empaquetado del software.....	144
Figura 111. Resolución del recurso remoto 'uav-monitor-final' para el direccionamiento del paquete de despliegue.....	145
Figura 112. Ventana emergente de confirmación de seguridad y validación de sobrescritura previa al despliegue en producción.	145
Figura 113. Logs de estado del IDE que validan la finalización del despliegue en Azure App Service.....	146
Figura 114. Interfaz gráfica de autenticación del operador corriendo en producción en el servidor en la nube.	146

Figura 115. Panel de control centralizado (Dashboard) de la plataforma en pleno procesamiento de analítica de video térmico y telemetría de UAV.....	147
Figura 116. Estructura jerárquica de directorios y distribución de módulos de software del sistema base.....	148
Figura 117. Rutina de inicialización del backend en Python para la verificación y creación automatizada de carpetas de almacenamiento.	149
Figura 118. Líneas de código destinadas a la carga paralela del modelo especializado (incendios) y el modelo generalista (personas) de YOLOv8.	149
Figura 119. Líneas de código destinadas al preprocesamiento de la matriz de imagen mediante ecualización y filtrado espacial.	150
Figura 120. Desarrollo algorítmico para la generación de marcas de tiempo y guardado físico de fotogramas de alerta	150
Figura 121. Línea de código destinada a la inicialización del objeto codificador de video para la grabación de secuencias multimedia.	150
Figura 122. Líneas de código destinadas a la instanciación de la estructura del reporte y renderizado final del archivo PDF.	151
Figura 123. Invocación de la rutina algorítmica para la transferencia y respaldo de evidencias en contenedores cloud de Microsoft Azure.....	151
Figura 124. Definición de la ruta de red para la distribución de la matriz de video mediante protocolo HTTP en el backend.....	151
Figura 125. Evidencia de interoperabilidad híbrida y sincronización de datos entre el entorno local en el borde (Edge) y el servidor web elástico en la nube (Cloud).	153
Figura 126. Zona 1	154
Figura 127. Zona 2.....	155
Figura 128. Demostración del ecosistema de sistema de monitoreo a las autoridades operativas del cuerpo de bomberos Ambato.	174
Figura 129. Interfaz proactiva con el módulo de alerta emergente en tiempo real ante detecciones críticas implementado post-pruebas con el usuario final.	175

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Resolución de las normas generales que regulan la operación de Aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)[81]	192
Anexo B. Adaptación piezas, estructuras y montaje de la cámara térmica FPV en el UAV	193
Anexo C. Prueba del sistema de monitoreo con el sensor térmico MLX90640 y cámara FPV.	194
Anexo D. Prueba del sistema de monitoreo con la cámara térmica FPV implementada en el UAV.	194

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación se enfoca en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de incendios forestales en el Cerro Casigana mediante vehículos aéreos no tripulados (UAVs), con el propósito de apoyar al Cuerpo de Bomberos Ambato en la detección y supervisión de focos de calor en zonas de difícil acceso. El sistema integra monitoreo aéreo, transmisión de video en tiempo real y sensores térmicos para fortalecer la capacidad de respuesta ante incendios forestales.

Inicialmente, se realizaron pruebas con un sensor térmico conectado a una ESP32 para validar la detección de variaciones de temperatura y establecer un sistema básico de monitoreo. Posteriormente, se implementó una cámara térmica FPV instalada en un UAV, permitiendo la transmisión de video térmico en tiempo real hacia una estación terrestre para el análisis de eventos térmicos.

El sistema desarrollado está compuesto por un UAV equipado con cámara térmica FPV, transmisor de video y sistema de control de vuelo. Las pruebas de campo efectuadas en distintas zonas del Cerro Casigana evaluaron la estabilidad de vuelo, transmisión de video, detección térmica y capacidad operativa. Además, se realizaron preentrenamientos con YOLOv8 para identificar posibles focos de incendio mediante imágenes térmicas.

Los resultados demostraron una transmisión estable y una adecuada detección térmica en tiempo real, constituyendo una alternativa tecnológica innovadora para fortalecer las acciones de prevención y respuesta ante incendios forestales del Cuerpo de Bomberos Ambato.

Palabras clave: UAV, monitoreo de incendios, cámara térmica FPV, ESP32, transmisión de video, YOLOv8, Cerro Casigana.

ABSTRACT

This research work focuses on the design and implementation of a wildfire monitoring system on Cerro Casigana using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), aimed at supporting the Ambato Fire Department in detecting and monitoring heat sources in areas of difficult access. The system integrates aerial monitoring, real-time video transmission, and thermal sensors to strengthen the response capacity against forest fires.

Initially, testing was conducted with a thermal sensor connected to an ESP32 microcontroller to validate the detection of temperature variations and establish a basic monitoring system. Subsequently, an FPV thermal camera was installed on a UAV, enabling the transmission of real-time thermal video to a ground station for the analysis of thermal events.

The developed system comprises a UAV equipped with an FPV thermal camera, a video transmitter, and a flight control system. Field tests carried out in different areas of Cerro Casigana evaluated flight stability, video transmission, thermal detection, and operational capacity. Furthermore, pre-training operations were performed using YOLOv8 to identify potential fire sources through thermal imagery.

The results demonstrated stable transmission and adequate real-time thermal detection, constituting an innovative technological alternative to strengthen the prevention and response actions of the Ambato Fire Department against wildfires.

Keywords: UAV, fire monitoring, FPV thermal camera, ESP32, video transmission, YOLOv8, Cerro Casigana.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

SISTEMA DE MONITOREO DE INCENDIOS EN EL CERRO CASIGANA MEDIANTE UAVS PARA EL APOYO OPERATIVO DEL CUERPO DE BOMBEROS AMBATO

1.1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años, los incendios forestales han aumentado en frecuencia e intensidad a nivel mundial, constituyendo una de las principales amenazas ambientales. Este fenómeno se ve exacerbado por condiciones climáticas extremas, atribuibles al cambio climático, y por actividades humanas como la deforestación y la expansión urbana no planificada. En 2024, América Latina y el Caribe experimentaron temperaturas récord, superando en 0,90 °C la media de 1991-2020, lo que contribuyó a la proliferación de incendios devastadores en la región. Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) publicado en 2022 sobre incendios extremos, se estima que la frecuencia y severidad de estos eventos aumentará un 30% para 2050. En América Latina, esta situación se agrava por la falta de monitoreo temprano, afectando la biodiversidad, la salud de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades rurales y urbanas cercanas [1].

En Ecuador, durante el año 2024, los incendios forestales constituyeron una emergencia recurrente que amenazó la biodiversidad y la seguridad ciudadana. Entre enero y agosto de 2024 se reportaron 1.994 incendios en 19 provincias, afectando más de 18.300 hectáreas de cobertura vegetal. Tungurahua figuró entre las provincias más afectadas, con más de 100 hectáreas dañadas, destacándose el cantón Ambato por su alta incidencia, especialmente en zonas como el Cerro Casigana [2].

La falta de un sistema de monitoreo en tiempo real que permita la detección temprana de incendios forestales en el Cerro Casigana dificulta una respuesta rápida y eficaz por parte del Cuerpo de Bomberos, lo que agrava la pérdida de biodiversidad, el daño ambiental y el riesgo para la población. El Cerro Casigana, ubicado en el sur de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, constituye una zona de alta importancia ambiental y recreativa para la población ambateña. A pesar de múltiples esfuerzos de reforestación y campañas de educación ambiental, este espacio natural continúa siendo afectado por incendios forestales recurrentes, especialmente en épocas secas, como los meses de agosto a diciembre [3].

En este contexto local, el Cerro Casigana ha sido escenario frecuente de incendios forestales, como el ocurrido en 2021 que consumió cerca de 10 hectáreas de vegetación nativa. Este espacio, además de tener valor ambiental, es un área recreativa para la ciudadanía ambateña, por lo que la amenaza de incendios compromete no solo la biodiversidad sino también la seguridad y calidad de vida de las personas. Entre agosto y octubre de 2024 se registraron 167 incendios forestales en Ambato, y gran parte de ellos se presume fueron provocados, evidenciando una problemática estructural aún sin solución [4].

Este problema obedece a múltiples causas, como la ausencia de un sistema de monitoreo en tiempo real y la falta de tecnología de detección temprana, lo que impide una respuesta inmediata por parte del Cuerpo de Bomberos y demás entidades de socorro. Entre los factores que originan esta situación se encuentran la insuficiente inversión en vigilancia ambiental, la dependencia de reportes ciudadanos, y la limitada visibilidad en áreas boscosas por condiciones climáticas o topográficas.

Como resultado, se generan impactos negativos como la pérdida acelerada de vegetación nativa, el desequilibrio en los ecosistemas locales, la migración de fauna silvestre, y un riesgo constante para la ciudadanía y sus bienes. Además, el trabajo del personal de respuesta se vuelve más riesgoso y menos eficiente, incrementando los costos operativos y humanos para el municipio.

Esto conlleva a un círculo vicioso donde la falta de monitoreo tecnológico perpetúa la alta vulnerabilidad de las zonas naturales. Sus efectos negativos incluyen la degradación ambiental, pérdida de servicios ecosistémicos (como la captura de carbono y regulación hídrica), y el debilitamiento del tejido comunitario en torno al cuidado del entorno.

Ante esta situación, se hace urgente implementar una intervención tecnológica eficaz, como un sistema de monitoreo de incendios basado en drones con cámaras térmicas y alertas en tiempo real, que permita anticiparse a los focos de calor, guiar a las brigadas de respuesta y fortalecer la gestión de riesgos en áreas vulnerables como el Cerro Casigana. Esta iniciativa no solo aportaría a la conservación ambiental local, sino que también puede servir de modelo replicable en otras zonas del país.

1.2 Antecedentes investigativos

En los últimos años, el monitoreo y prevención de incendios forestales ha cobrado una gran importancia debido al impacto ambiental, económico y social que estos eventos generan. Diversas investigaciones han explorado el uso de tecnologías emergentes como sensores IoT, UAVS, imágenes satelitales e inteligencia artificial para mejorar la detección temprana y la capacidad de respuesta ante estos desastres. A continuación, se presentan antecedentes investigativos que demuestran la implementación y efectividad de estas soluciones tecnológicas en distintos contextos nacionales.

En el año 2020, Iglesias Jiménez desarrolló un sistema de Alerta Temprana para Incendios Forestales Basado en Sensores IoT. El objetivo fue diseñar un sistema de monitoreo que permitiera la detección oportuna de incendios forestales en zonas rurales de difícil acceso. La metodología consistió en el despliegue de sensores de temperatura y humo conectados mediante tecnología LoRaWAN, ubicados estratégicamente para la transmisión de datos hacia una plataforma de visualización remota. Como resultado, se logró mejorar significativamente en la detección temprana de conatos de incendio, optimizando el tiempo de respuesta de las autoridades locales.

El estudio evidenció la viabilidad técnica y operativa de implementar soluciones IoT en contextos rurales para mitigar riesgos ambientales [5].

En 2021, Orquera Guevara [7] presentó el artículo científico “Implementación de UAVs para la Prevención de Incendios Forestales en el Parque Metropolitano Guanguiltagua”, cuyo objetivo fue establecer una solución tecnológica preventiva para el patrullaje de zonas naturales protegidas. La metodología incluyó el uso de drones DJI Mavic equipados con cámaras térmicas y sensores de CO₂, configurados para ejecutar vuelos autónomos sobre rutas críticas. Esta solución permitió identificar focos de calor o presencia de gases combustibles, logrando una reducción del 60% en el tiempo de respuesta ante emergencias. El proyecto demostró la eficacia operativa de los UAVs como herramienta de prevención en áreas forestales de difícil acceso [6].

En el año 2022, Gambín Martínez y Juan Antonio [8] llevaron a cabo la investigación “Sistema Inteligente de Detección de Incendios Forestales con Imágenes Satelitales y Aprendizaje Automático”. El objetivo fue detectar y predecir conatos de incendios forestales en la Sierra ecuatoriana mediante técnicas de inteligencia artificial. La metodología consistió en el uso de imágenes térmicas satelitales procesadas con redes neuronales convolucionales (CNN), permitiendo clasificar zonas de riesgo térmico. El sistema alcanzó una precisión del 92% en la predicción de incendios, evidenciando el potencial del aprendizaje automático en la vigilancia forestal automatizada y a gran escala [7].

En el año 2023, Gómez, Cordero y Tapia [9] a través de la Revista Tecnológica ESPOL, publicaron el artículo “Sistema de Monitoreo de Incendios Forestales con Drones y Cámaras Térmicas”, cuyo objetivo fue desarrollar un sistema automatizado para la detección de focos de calor en tiempo real. La metodología consistió en la implementación de drones con cámaras térmicas y conectividad 4G, ejecutando vuelos programados y transmitiendo imágenes hacia una plataforma digital para análisis térmico. El sistema generaba alertas automáticas al personal de respuesta, logrando un incremento del 75% en la eficacia del monitoreo en comparación con métodos tradicionales.

En 2024, Blesa Jiménez [10] publicó en la Revista Latinoamericana de Ingeniería, el artículo “Optimización de la misión de un enjambre de drones para la detección temprana de incendios forestales”, el cual tuvo como objetivo desarrollar un sistema inteligente para la vigilancia ambiental en zonas de alto riesgo de incendios. La metodología integró drones equipados con cámaras térmicas, una red de sensores IoT y una plataforma en la nube, la cual recibía los datos para su análisis automático. El sistema permitió una reducción del 80% en los tiempos de notificación de incendios, mejorando significativamente la capacidad de respuesta de los equipos de emergencia. El estudio resaltó el impacto positivo de la convergencia tecnológica en la prevención de riesgos ambientales [8].

1.3 Fundamentación teórica

Para el desarrollo del presente proyecto, es fundamental contar con bases teóricas relacionadas con los factores ambientales que influyen en la ocurrencia de incendios forestales y con las tecnologías aplicadas a su detección y monitoreo en zonas vulnerables como el Cerro Casigana. Se abordarán aspectos como sequías, condiciones meteorológicas, tipos de incendios y sus impactos ambientales, así como el uso de sistemas tecnológicos de alerta temprana, sensores, redes de comunicación y vehículos aéreos no tripulados (UAVs). En las siguientes secciones, se desarrollará de manera específica cada uno de estos elementos que sustentan la propuesta tecnológica de prevención y gestión de incendios forestales.

1.3.1 Factores Ambientales Globales

En la Figura 1, los factores ambientales globales desempeñan un papel determinante en la ocurrencia y propagación de incendios forestales, ya que influyen directamente en las condiciones climáticas y ecológicas de los ecosistemas. Fenómenos como las sequías, el incremento de incendios y las tormentas modifican la humedad del suelo,

la vegetación y la estabilidad atmosférica, aumentando el riesgo de incendios en zonas vulnerables como el Cerro Casigana [9].

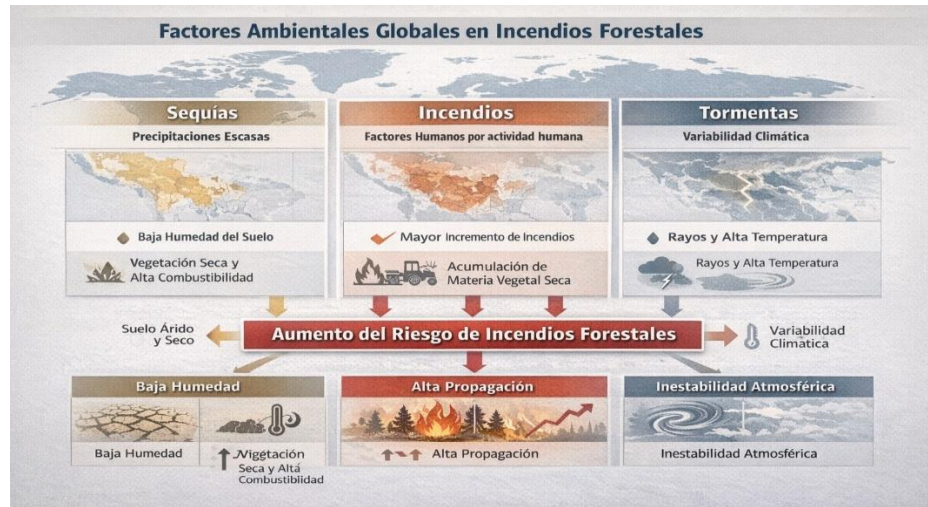


Figura 1. Factores ambientales globales en incendios forestales

a. Sequías

Las sequías son períodos prolongados de escasez de precipitaciones que afectan la disponibilidad de agua en los suelos, ríos y cobertura vegetal. Estas condiciones favorecen la acumulación de biomasa seca, la cual actúa como combustible altamente inflamable, facilitando la propagación de incendios forestales. En zonas andinas como el Cerro Casigana, las sequías estacionales, especialmente durante los meses secos, incrementan significativamente la probabilidad de incendios, fenómeno que se ha intensificado debido al cambio climático [10].

b. Tormentas

Las tormentas eléctricas constituyen un factor ambiental que puede actuar como detonante natural de incendios cuando las descargas eléctricas impactan áreas secas y boscosas. Además, la presencia de vientos fuertes durante estos eventos contribuye a la rápida propagación del fuego una vez iniciado. Las variaciones de presión, temperatura y humedad asociadas a las tormentas generan condiciones meteorológicas inestables que incrementan el riesgo y la dificultad de control de los incendios forestales [11].

1.3.2 Incendios

Los incendios pueden clasificarse según el entorno en el que se desarrollan, ya que sus causas, comportamiento e impactos varían en función del área afectada. Esta clasificación permite comprender mejor los riesgos asociados y facilita el diseño de estrategias de prevención, monitoreo y respuesta, especialmente en zonas donde coexisten áreas rurales, forestales y urbanas, como ocurre en el entorno del Cerro Casigana [12].

a. Incendios rurales

Los incendios rurales se producen en áreas agrícolas, pastizales o zonas de transición entre el campo y el bosque. Generalmente están asociados a prácticas humanas como la quema de rastrojos o la limpieza de terrenos agrícolas, las cuales pueden salirse de control debido a condiciones climáticas adversas como viento o sequía. Este tipo de incendios representa una amenaza directa para los cultivos, el ganado y las áreas naturales cercanas, incrementando el riesgo de propagación hacia zonas forestales [13].

b. Incendios forestales

Los incendios forestales son eventos de combustión que afectan ecosistemas naturales como bosques, páramos y matorrales. Suelen originarse en áreas rurales y expandirse rápidamente hacia reservas naturales, especialmente durante los períodos secos. En Ecuador, estos incendios se presentan con mayor frecuencia en regiones andinas y afectan de forma severa la biodiversidad, el equilibrio ecológico y los servicios ambientales que proveen estos ecosistemas, como ocurre en sectores del Cerro Casigana [14] .

c. Incendios urbanos

Los incendios urbanos ocurren dentro de los límites de las ciudades y están comúnmente relacionados con fallas eléctricas, manejo inadecuado de materiales inflamables o eventos extremos. Aunque se desarrollan en un contexto distinto al forestal, pueden verse agravados por la cercanía a zonas naturales o por la expansión urbana desordenada hacia áreas boscosas. Sus consecuencias afectan directamente a la población, la infraestructura y los servicios básicos, representando un alto riesgo para la seguridad humana [15].

1.3.3 Incendios Forestales

Los incendios forestales constituyen uno de los desastres ambientales más graves debido a sus efectos directos y prolongados sobre los ecosistemas naturales. Estos eventos no solo generan pérdidas inmediatas de flora y fauna, sino que también provocan alteraciones climáticas, degradación del suelo y afectaciones a largo plazo en la capacidad de recuperación de los territorios impactados, como ocurre en zonas andinas vulnerables como el Cerro Casigana [16].

a. Destrucción de flora y fauna

Los incendios forestales provocan la destrucción de hábitats completos, afectando gravemente la biodiversidad. Muchas especies vegetales no resisten las altas temperaturas, mientras que la fauna silvestre muere por exposición directa al fuego, inhalación de humo o falta de rutas de escape. En áreas como el Cerro Casigana, donde existe vegetación nativa y fauna local, los incendios recurrentes generan pérdidas ecológicas significativas que, en muchos casos, resultan irreversibles [17].

b. Emisión masiva de CO₂ y otros contaminantes

Durante los incendios forestales, la combustión de biomasa libera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y material particulado fino (PM10 y PM2.5), contribuyendo al deterioro de la calidad del aire y al cambio climático. Estas emisiones tienen efectos negativos tanto a nivel ambiental como en la salud humana. Los incendios forestales representan una fuente importante de gases de efecto invernadero, intensificando el calentamiento global y sus consecuencias [18].

c. Degradación del suelo y aumento de la erosión

El fuego elimina la cobertura vegetal que protege el suelo, dejándolo expuesto a la acción del viento y la lluvia. Esta situación provoca procesos acelerados de erosión, pérdida de nutrientes y disminución de la capacidad del suelo para retener humedad. A largo plazo, estas alteraciones dificultan la regeneración natural del ecosistema y limitan los procesos de reforestación, comprometiendo la recuperación ambiental de zonas afectadas como el Cerro Casigana [18].

1.3.4 Sistemas tecnológicos para gestión de desastres

Los sistemas tecnológicos para la gestión de desastres desempeñan un papel fundamental en la prevención, monitoreo y mitigación de eventos adversos como los incendios forestales. El uso de tecnologías avanzadas permite mejorar la capacidad de detección temprana, optimizar la coordinación entre entidades de respuesta y reducir los impactos humanos, ambientales y económicos derivados de estos eventos, especialmente en territorios vulnerables como el Cerro Casigana [19].

a. Tecnología de monitoreo y alerta temprana

Las tecnologías de monitoreo y alerta temprana permiten la recolección y análisis de información en tiempo real sobre variables ambientales críticas, tales como temperatura, humedad, presencia de humo y concentración de gases. Para ello se

emplean sensores térmicos, cámaras infrarrojas, estaciones meteorológicas portátiles y redes basadas en Internet de las Cosas (IoT). Estos sistemas facilitan la detección oportuna de focos de incendio en sus etapas iniciales, reduciendo significativamente los tiempos de respuesta y el alcance del daño ambiental [19].

b. Tecnologías móviles y autónomas de observación y respuesta

Las tecnologías móviles y autónomas incluyen dispositivos no tripulados y sistemas robotizados capaces de operar en zonas de difícil acceso o alto riesgo. Estas herramientas resultan especialmente útiles en entornos montañosos y boscosos, donde el acceso humano es limitado o peligroso. Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), robots terrestres y otros sistemas autónomos permiten realizar reconocimiento del terreno, supervisión térmica y evaluación de amenazas sin comprometer la seguridad del personal de emergencia [20].

c. Sistema de comunicación y coordinación de emergencia

La efectividad de la gestión de desastres depende en gran medida de una comunicación eficiente entre las instituciones involucradas, como cuerpos de bomberos, autoridades locales y organismos de gestión de riesgos. Para ello se emplean sistemas de radio VHF/UHF, redes de datos, plataformas IoT, tecnologías de transmisión 4G o LoRaWAN y centros de comando con software especializado. Estos sistemas permiten compartir información en tiempo real, geolocalizar recursos mediante GPS y coordinar acciones de respuesta de forma integrada, mejorando la eficiencia operativa durante emergencias por incendios [21].

1.3.5 Tecnologías móviles y autónomas de observación y respuesta

Las tecnologías móviles y autónomas han cobrado gran relevancia en la gestión moderna de desastres, ya que permiten realizar tareas de monitoreo, vigilancia y apoyo operativo en escenarios de alto riesgo. Su capacidad para operar de forma remota o autónoma reduce la exposición del personal humano y mejora la eficiencia en la

recopilación de información crítica durante emergencias como los incendios forestales [21].

a) Robots terrestres

Los robots terrestres son plataformas diseñadas para desplazarse sobre superficies irregulares o en entornos peligrosos. Están equipados con sensores térmicos, cámaras de alta definición y otros instrumentos que permiten la inspección de áreas afectadas por incendios, la búsqueda de víctimas o la evaluación de daños estructurales. Aunque su aplicación en incendios forestales es limitada debido a la complejidad del terreno, resultan especialmente útiles en escenarios urbanos, industriales o estructurales donde el acceso humano es riesgoso [22].

b) UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados)

Los UAVs, comúnmente conocidos como drones, son herramientas altamente versátiles para el monitoreo ambiental y la gestión de incendios. Pueden operar de manera autónoma o mediante control remoto y están equipados con cámaras térmicas, sensores de gases, sistemas GPS y módulos de transmisión de datos en tiempo real. Su capacidad para acceder a zonas de difícil alcance, operar en condiciones adversas y proporcionar información aérea detallada los convierte en un recurso clave para la detección temprana, supervisión y evaluación de incendios forestales [23].

c) Embarcaciones no tripuladas

Las embarcaciones no tripuladas se emplean principalmente en entornos acuáticos y pueden complementar las labores de gestión de incendios mediante el monitoreo de cuerpos de agua, medición de parámetros hidrológicos y apoyo logístico. Aunque su uso no es directamente aplicable al contexto del Cerro Casigana, representan una tecnología emergente dentro de los sistemas autónomos de observación y respuesta, con potencial de integración en estrategias de gestión de desastres a nivel regional [24].

1.3.6 UAVs (Drones)

Los UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), comúnmente denominados drones, tienen su origen en los primeros desarrollos de la aviación. Diversos pioneros de la ingeniería aeronáutica, como Cayley, Ninomiya, Du Temple y Langley, sentaron las bases para la creación de aeronaves no tripuladas, cuyos principios aerodinámicos evolucionaron hasta dar lugar a los sistemas autónomos actuales. En la actualidad, los UAVs constituyen una herramienta tecnológica de alto impacto en múltiples sectores, incluyendo la gestión ambiental y la prevención de riesgos naturales [23].

a) Sistemas de los UAVs

Un UAV no debe entenderse únicamente como una aeronave, sino como un sistema integrado conformado por diversos subsistemas interconectados. En la Figura 2 muestra estos dispositivos que forman parte de una arquitectura tecnológica más amplia que puede incluir plataformas aéreas y terrestres, sistemas satelitales y redes de comunicación entre múltiples UAVs [23].



Figura 2. Sistemas de los UAVs

Desde el punto de vista estructural, el sistema se divide en dos componentes principales: el segmento aéreo y el segmento terrestre.

El segmento aéreo está constituido por:

- La plataforma aérea (estructura física del UAV).
- La carga útil (sensores, cámaras térmicas, multiespectrales, otros dispositivos)
- Parte del sistema de comunicaciones.

Por su parte, el segmento terrestre integra:

- El sistema de control del UAV.
- Los equipos de comunicación.
- La estación de control en tierra (Ground Control Station, GCS).

La GCS permite supervisar en tiempo real los datos captados por los sensores, gestionar parámetros de vuelo y ejecutar misiones específicas, lo que resulta fundamental en aplicaciones como el monitoreo preventivo de incendios forestales [25].

b) Clasificación de los UAVs

Los UAVs pueden clasificarse principalmente en dos grandes categorías según su configuración aerodinámica: de ala fija y de ala rotatoria [14]. Cada tipo presenta características particulares que determinan su idoneidad para diferentes aplicaciones operativas [26].

- **UAVs de ala fija**

En la Figura 3, Los UAVs de ala fija generan sustentación mediante el flujo de aire sobre sus alas, lo que les permite despegar y aterrizar generalmente en trayectoria horizontal. Su diseño aerodinámico puede variar considerablemente, incluyendo configuraciones como ala convencional, canard, ala volante, delta, joined wing, así como alas rectangulares o trapezoidales, con o sin flecha. Asimismo, pueden

diferenciarse según la posición del ala (alta, media o baja) y el tipo de estabilizador de cola (cola convencional, en V o doble cola) [26].



Figura 3. UAV de ala fija [26].

Este tipo de UAV se caracteriza por su mayor autonomía de vuelo y eficiencia energética, lo que lo convierte en una alternativa adecuada para misiones de vigilancia de amplias extensiones territoriales, como el monitoreo de zonas montañosas propensas a incendios [26].

- **UAVs de ala rotatoria o multirrotor.**

Los UAVs de ala rotatoria producen sustentación mediante el movimiento giratorio de sus hélices o rotores, lo que les permite despegar y aterrizar verticalmente. Esta característica les otorga alta maniobrabilidad y capacidad de vuelo estacionario como se muestra en Figura 4 [26].



Figura 4. UAV de ala rotatoria [26].

Dentro de esta categoría se incluyen:

UAV tipo helicóptero: La Figura 5 es un ejemplar de esta categoría de UAV que pueden despegar verticalmente, desplazarse en distintas direcciones (adelante, atrás y lateralmente) y operar con uno o varios motores durante el vuelo [26].



Figura 5. UAV tipo helicóptero [26].

Tricópteros: La Figura 6 muestra un tricóptero que está equipado con tres motores distribuidos en sus brazos estructurales. Generalmente, dos rotores giran en sentido opuesto para equilibrar el sistema, mientras el rotor posterior contribuye a la estabilidad direccional [26].



Figura 6. UAV Tricóptero [26].

Cuadricópteros: conformados por cuatro motores, uno en cada brazo. Son los modelos más difundidos comercialmente debido a su equilibrio entre costo, estabilidad y facilidad de control, la Figura 7 es un ejemplar de esta categoría [26].



Figura 7. UAV cuadricóptero [26].

Hexacópteros: En la Figura 8 este modelo de UAV está integrado por seis motores, ofrecen mayor estabilidad y capacidad de carga, razón por la cual suelen emplearse en aplicaciones que requieren equipos adicionales, como cámaras profesionales o sensores especializados [26].



Figura 8. UAV Hexacóptero [26].

Gracias a su capacidad de vuelo estacionario y precisión en el posicionamiento, los UAVs multirrotor resultan especialmente adecuados para tareas de inspección puntual, monitoreo térmico y detección temprana de focos de calor en áreas específicas [26].

En la Tabla 1 se presentan especificaciones técnicas de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) que fueron otorgados en esta investigación. Estos equipos fueron aportados con fines académicos y experimentales, de esta manera, siendo utilizados en varias actividades de monitoreo, adquisición de datos y validación de la propuesta elaborada en el presente proyecto.

Tabla 1. Características técnicas de los UAVs [26].

Características	Cuadricóptero MatekF405-STD FPV	Cuadricóptero SpeedyBeeF405 V3 FPV
		
Peso	700 g	600 g
Dimensiones	300x260x100 mm	135x165x40 mm
Autonomía de vuelo	9-10 min	7-8 min
Velocidad máxima	20 Km/h	20 Km/h
Altura máxima de Vuelo	122 m	120 m
Número de motores	4	4
Motores incorporados	BR2205 2300KV CCW 2S a 4S (7.4 V a 14.8 V)	KAREREA 2306-2650KV 3S a 5S (11.1 V a 18.5 V)
Sistema de navegación	GPS	GPS
Sensores	Acelerómetro Giroscopio Barómetro	Acelerómetro Giroscopio Barómetro
Sistema de batería	2 S a 6 S (7.4 V a 22.2 V)	3 S a 5 S (11.1 V a 18.5 V)
Material del marco	Fibra de carbono PLA	Fibra de carbono PLA
Software compatible	Betaflight /Mission Planner	Betaflight /Mission Planner
Estándar	AFHDS 2A	ExpressLRS

1.3.7 Aplicaciones de los UAVs en diferentes áreas de desarrollo

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) se caracterizan por su alta versatilidad tecnológica, lo que ha permitido su incorporación en múltiples sectores productivos, científicos y estratégicos. Su capacidad para integrar sensores especializados, sistemas de posicionamiento y transmisión de datos en tiempo real los convierte en herramientas eficientes para la recolección y análisis de información en diversos entornos. En la Figura 9 tenemos entre los principales campos de aplicación que destacan son: la agricultura, la logística, el ámbito militar, el sector ambiental, las geociencias y el mapeo cartográfico [8].



Figura 9. Aplicaciones de los UAVs

a) Agricultura

En el sector agrícola, los UAVs se emplean para la planificación, supervisión y optimización de los sistemas productivos. Mediante técnicas como generación de nubes de puntos, modelado geométrico y aplicación de algoritmos de inteligencia artificial, incluyendo redes neuronales artificiales y máquinas de soporte vectorial, es posible construir modelos tridimensionales del cultivo, estimar rendimientos y detectar amenazas como plagas o malezas [27].

b) Logística

En el ámbito logístico, los UAVs han comenzado a implementarse como alternativa innovadora para el transporte de suministros. Un caso destacado es el de la empresa Zipline, reconocida por la distribución aérea de sangre y medicamentos en Ruanda, facilitando el acceso a servicios médicos a millones de personas. Estos sistemas incorporan mecanismos de monitoreo tanto para el operador como para el usuario final, lo que permite optimizar tiempos de entrega y mejorar la eficiencia empresarial [27].

c) Militar

El ámbito militar ha sido uno de los principales impulsores del desarrollo de los UAVs. Actualmente, estos vehículos se utilizan en tareas de vigilancia fronteriza, control de actividades ilícitas y soporte en comunicaciones estratégicas.

Su evolución tecnológica ha integrado sistemas avanzados como sensores de alta precisión, radares, sistemas de posicionamiento global (GPS) y redes de comunicación móvil (GSM) [19]. Asimismo, pueden emplearse en misiones de rescate y localización de personas mediante el uso de cámaras térmicas, micrófonos direccionales y cámaras de alta resolución [28].

d) Ambiental

En el campo ambiental, los UAVs se han convertido en herramientas fundamentales para el monitoreo, conservación y prevención de riesgos en ecosistemas naturales. Son utilizados en censos de fauna, supervisión forestal y detección temprana de alteraciones ambientales [28].

Mediante sensores térmicos, sistemas láser, biosensores y cámaras multiespectrales, es posible obtener información detallada sobre condiciones climáticas, niveles de estrés hídrico en la vegetación, variaciones en la cobertura vegetal y parámetros físico-químicos de cuerpos de agua [28].

Esta aplicación resulta especialmente relevante para la detección y prevención de incendios forestales, ya que permite identificar anomalías térmicas y cambios en la vegetación antes de que el evento se propague.

e) Geociencias

En las geociencias, los UAVs facilitan la evaluación de recursos minerales, análisis de estructuras geológicas y documentación de patrimonio arqueológico. Estos equipos pueden incorporar tecnologías como sistemas de posicionamiento de alta precisión, cámaras térmicas, sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) y cámaras RGB digitales. Gracias a estas herramientas, se obtiene información topográfica y estructural con mayor detalle y menor costo en comparación con métodos tradicionales [28].

f) Mapeo

El uso de UAVs en cartografía y topografía ha revolucionado la generación de mapas de alta resolución. Su principal aporte radica en la producción de modelos tridimensionales del terreno mediante técnicas de fotogrametría aérea y sensores LiDAR. Estos sistemas permiten obtener datos geospaciales precisos, fundamentales para la planificación territorial, evaluación de riesgos naturales y diseño de estrategias de intervención en zonas vulnerables [28].

1.3.8 Sistemas de control de vuelo basados en software para UAVs

Los sistemas de control de vuelo basados en software para UAVs constituye un elemento fundamental en la operación del UAV, ya que permite configurar, monitorear y ajustar los parámetros necesarios para garantizar estabilidad, navegación autónoma y seguridad durante la misión. En el presente proyecto se analizan dos plataformas ampliamente utilizadas en sistemas no tripulados [29].

a. Mission Planner

Es una estación de control terrestre (Ground Control Station) diseñada para vehículos que utilizan el firmware ArduPilot. Este software permite configurar parámetros del controlador de vuelo, planificar misiones autónomas mediante puntos de referencia (waypoints), monitorear variables en tiempo real y registrar datos de telemetría [30]. En el contexto del sistema propuesto, Mission Planner resulta especialmente útil cuando se requiere:

- Planificación de rutas automáticas para monitoreo sistemático de un área.
- Control preciso de altitud, velocidad y trayectoria.
- Supervisión de parámetros críticos durante el vuelo (voltaje, GPS).

Su enfoque es adecuado para aplicaciones de inspección y vigilancia estructurada, como la detección de personas en zonas específicas mediante cámara térmica.

b. Betaflight

Es un firmware orientado principalmente a drones tipo cuadricóptero y drones de carreras. Se centra en el ajuste manual y preciso del comportamiento dinámico del UAV, permitiendo configurar parámetros del sistema de control PID, tasas de respuesta y sensibilidad de los mandos. A diferencia de Mission Planner, Betaflight está optimizado para vuelos manuales de alta maniobrabilidad y baja latencia, siendo ideal en escenarios donde se requiere reacción rápida y control directo del piloto [30].

La Tabla 2 presenta un análisis comparativo de las características más relevantes de ambos softwares, con el fin de determinar cuál se ajusta mejor a los requerimientos del UAV empleado en el sistema de detección térmica.

Tabla 2. Características software controlador de vuelo [30].

Características	Mission Planner	Betaflight
Orientación del sistema	Operación de UAVs autónomos basados en navegación satelital (GPS) y planificación de misiones	Control de drones FPV orientados a carreras y maniobras acrobáticas
Firmware asociado	Compatible principalmente con ArduPilot	Compatible con firmware Betaflight
Tipo de operación de vuelo	Vuelo autónomo, semiautónomo y planificado por waypoints	Vuelo manual de alta respuesta y control en tiempo real
Interfaz de usuario	Interfaz avanzada con visualización cartográfica, telemetría en tiempo real y análisis de datos	Interfaz simplificada orientada a configuración rápida y ajuste de parámetros de rendimiento
Modos de vuelo disponibles	Auto, Guided, Loiter, RTL (Return to Launch), Stabilize, entre otros	Acro (Manual), Angle, Horizon, entre otros
Ámbitos de aplicación	Fotogrametría, mapeo, agricultura de precisión, rescate y monitoreo ambiental	Competencias FPV, freestyle y entrenamiento acrobático
Compatibilidad con sistemas operativos	Windows (nativo); macOS y Linux mediante entornos compatibles	Windows, macOS y Linux

Nivel de complejidad técnica	Alto; requiere conocimientos en configuración avanzada y planificación de misiones	Intermedio; configuración accesible para usuarios con experiencia básica en drones FPV
Licenciamiento	Software de código abierto y gratuito	Software de código abierto y gratuito

1.3.9 GPS aplicado a UAVs FPV

El sistema de posicionamiento global (GPS) es un componente esencial en los UAV, ya que permite obtener datos precisos de ubicación como latitud, longitud, altitud y velocidad, garantizando una navegación estable y segura. Su integración posibilita funciones como mantenimiento de posición, retorno automático al punto de origen, registro de trayectorias y planificación de rutas autónomas. En UAVs FPV, el GPS complementa el control manual mediante telemetría en tiempo real, mejorando la seguridad operativa ante posibles fallos de señal o condiciones adversas [31].

En la Tabla 3 se presenta una comparación de las características técnicas de tres módulos GPS disponibles en el mercado, considerando parámetros como precisión, número de satélites soportados, compatibilidad con el controlador de vuelo, tiempo de adquisición de señal y peso del dispositivo.

Tabla 3. Características de los GPS [31].

	GPS Matek Systems M10Q05883	GPS GLONASS Beitian Dual BN-880	TBS M8.2 GPS GLONASS
Características			
Dimensión	20 * 20 * 12.4 mm	22 *20 * 6 mm	20 * 22 *6 mm
Peso	8 g	5.3 g	5.2 g
Conector	Conector JST-GH-6P (SM06B-GHS-TB) con un paso de 1.27 mm	1.25 mm entre el parche de 6 pines	JST-GH de 6 pines (1.25 mm)
Conjunto de chips	Módulo GNSS u- blox SAM-M10Q- 00B y la brújula magnética QMC5883L.	NA	Ublox UBX-M8030
Formato de recepción	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS y SBAS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS y SBAS	GPS, GLONASS, y SBAS
Canales	72	72	72
Sensibilidad de seguimiento/adquisición	-167 dBm/ -148 dBm a -155 dBm	Traza -167 dBm	-164 dBm/-159 dBm
Sensibilidad de arranque en frío/caliente	-146 dBm. / -157 dBm.	avg25s/avg26s	-147 dBm/promedio 1seg
Nivel de datos	TTL	TTL	TTL
Protocolo de datos	UBX y NMEA	NMEA-0183	NMEA y UBX
Voltaje de operación	4.0 V - 9.0 V	3.6 V - 5.5 V	3.3 V - 5.0 V

1.3.10 Emisor y receptor de vuelo

El sistema de radio control está conformado por un emisor (transmisor) y un receptor, los cuales permiten la comunicación inalámbrica entre el piloto y el UAV.

El emisor es el dispositivo operado por el usuario y se encarga de enviar comandos de control relacionados con el movimiento del vehículo, tales como inclinación (roll), cabeceo (pitch), guiñada (yaw) y aceleración (throttle). Estas señales se transmiten mediante radiofrecuencia en bandas comúnmente utilizadas como 2,4 GHz [32].

El receptor, instalado a bordo del UAV, capta dichas señales y las convierte en pulsos eléctricos que son enviados al controlador de vuelo. A partir de esta información, el controlador procesa las órdenes y ajusta la velocidad de los motores mediante los controladores electrónicos de velocidad (ESC), permitiendo ejecutar las maniobras solicitadas [32].

La comunicación estable entre el emisor y el receptor es fundamental para garantizar un vuelo seguro, preciso y con baja latencia, especialmente en aplicaciones donde el UAV transporta sensores adicionales, como cámaras térmicas para detección de personas [32].

En la Figura 10 se presenta un ejemplo de un modelo de emisor junto con su receptor correspondiente.



Figura 10. Emisora T-pro y Receptor asociado [32].

El sistema de radiocontrol constituye un elemento fundamental para la comunicación entre el operador en tierra y la plataforma UAV, ya que permite transmitir comandos de vuelo de manera remota y mantener el control del vehículo a distancias considerables [33].

Este sistema garantiza la ejecución precisa de maniobras, la respuesta inmediata ante cambios en el entorno y la seguridad operativa durante la misión.

En la Tabla 4 se presenta un análisis comparativo de los radiocontroles considerados para el desarrollo del sistema, evaluando características como alcance, frecuencia de operación, número de canales, compatibilidad con el controlador de vuelo y estabilidad del enlace de comunicación.

Tabla 4. Características de los radios controles [33].

	Fly Sky FSI6S FS i6s	Fly Sky FS-i6XB	T-pro
Características			
Rango de RF	2.4055 GHz - 2.475 GHz	2.408 GHz - 2.475 GHz	2,4 GHz - 2,5 GHz
Potencia de RF	<20 dBm	<20 dBm	<20 dBm
Canales	6	8	16
Certificado	CE0678, FCC	CE, FCC	CE, FCC
Estándar	AFHDS 2 ^a	AFHDS 3	ExpressLRS
Alcance aproximado	~500 m – 1 km	~1 km	> 2 km (según módulo ELRS)
Voltaje de operación	6 – 8.4 V	4.8 – 8.4 V	6 – 8.4 V

1.3.11 Fuente de alimentación para UAV

Los UAVs, especialmente aquellos que utilizan tarjetas controladoras compatibles con software como Betaflight o Mission Planner, requieren una fuente de alimentación

externa que garantice estabilidad, autonomía y un suministro adecuado de energía a todos sus componentes electrónicos. En este sentido, las baterías de polímero de litio (LiPo) son las más empleadas debido a su alta densidad energética, bajo peso, tamaño compacto y capacidad para entregar altos niveles de corriente en cortos periodos de tiempo, lo que resulta fundamental en aplicaciones donde la relación peso–potencia es crítica. Además, estas baterías son recargables y deben utilizar cargadores específicos con sistema de balanceo, el cual regula la tensión entre celdas, evita sobrecargas y contribuye a mantener la seguridad operativa y prolongar la vida útil del sistema [34].

La Tabla 5 presenta un análisis comparativo de las especificaciones técnicas de baterías LiPo disponibles en el mercado ecuatoriano, con el objetivo de seleccionar la alternativa más adecuada para la alimentación del UAV en función de criterios como capacidad (mAh), voltaje nominal, tasa de descarga (C), peso y autonomía estimada.

Tabla 5. Baterías LiPo [34].

	LIPO TURNIGY NANO-TECH	LIPO TATTU FUNFLY	TATTU R-LINE
Características			
Dimensiones	71x19x35 mm	72x35x36 mm	62x31x36 mm
Peso aproximado	93 g	168 g	116 g
Capacidad mínima	1000 mAh	1550 mAh	650 mAh
Configuración	3 S1P / 11.1 V	4 S1P / 14.8 V	6 S1P / 22.2 V
Tasa de descarga	45 C	100 C	95 C
Velocidad máxima de descarga de ráfaga	90 C	200 C	190 C
Enchufe de carga	JST-XH	JST-XHR	ST-XHR-7P
Enchufe de descarga	XT-60	XT-60	XT-30

1.3.12 Motor Karearea TOA LITE 2306

El Motor Karearea TOA LITE 2306, como se muestra en la Figura 11, es un motor brushless de alto rendimiento diseñado para drones multirrotor de tamaño medio que utilizan hélices de 5 a 6 pulgadas. Presenta una configuración interna 12N14P, eje de titanio TC4 semi-hueco y un peso aproximado de 31,2 g sin cables, lo que le permite mantener un equilibrio entre resistencia y ligereza. Incorpora imanes N52SH y es compatible con baterías LiPo de 2S a 8S, según su variante de KV (1850, 2250, 2450 o 2650 KV), ofreciendo buena respuesta dinámica, eficiencia energética y estabilidad en vuelo [35].

En cuanto a su capacidad de empuje, aunque no siempre se especifica directamente el peso que soporta, motores de la categoría 2306 pueden generar aproximadamente entre 700 g y 1000 g de empuje por unidad, dependiendo de la batería y las hélices utilizadas. En un dron con cuatro motores, esto permitiría levantar entre 2,8 kg y 4 kg en condiciones óptimas. Para un vuelo seguro y maniobrable, se recomienda que el empuje total sea al menos el doble del peso del dron, criterio fundamental para justificar técnicamente la capacidad de carga en el diseño del proyecto [35].



Figura 11. Motor Karearea TOA LITE 2306 [35].

1.3.13 Permiso para volar UAVs en Ecuador

En Ecuador, el uso de vehículos aéreos no tripulados está regulado por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), entidad responsable de establecer las disposiciones normativas para su operación. El reglamento vigente, detallado en el Anexo A, se aplica a drones con un peso entre 0,25 kg y 150 kg. Según la normativa, los UAV deben registrarse oficialmente y contar con un seguro de responsabilidad civil cuyo valor varía entre USD 3.000 y USD 12.000, dependiendo del peso de la aeronave [36].

En cuanto a las condiciones de operación, los drones no deben superar una altura máxima de 122 metros sobre el nivel del terreno y deben evitar zonas restringidas como aeropuertos, instalaciones estratégicas y áreas de seguridad. Además, las operaciones deben realizarse en horario diurno y bajo condiciones meteorológicas adecuadas. Los operadores deben ser mayores de 18 años, dominar el idioma español, haber culminado la educación media y aprobar un curso teórico-práctico de pilotaje en los últimos 24 meses. Para actividades recreativas con drones de hasta 25 kg no se exige seguro obligatorio, aunque el operador asume la responsabilidad civil por cualquier daño ocasionado [36].

1.3.14 Reglamento de radiocomunicaciones

La normativa que regula el uso del espectro radioeléctrico en Ecuador se fundamenta en la Constitución de la República del Ecuador, al constituir la máxima jerarquía jurídica del país. A partir de este marco constitucional, se han establecido leyes y reglamentos complementarios orientados a regular el sector de las telecomunicaciones, entre ellos el Plan Nacional de Frecuencias [37].

Este instrumento normativo tiene como finalidad organizar y optimizar el uso del espectro radioeléctrico, promoviendo una gestión eficiente, ordenada y técnicamente

controlada de los servicios de radiocomunicación en el territorio nacional. Su aplicación permite evitar interferencias y garantizar la correcta operación de los distintos sistemas que dependen de radiofrecuencia [37].

Dentro de este marco regulatorio, se autoriza la operación de sistemas de radiocomunicaciones en determinadas bandas de frecuencia, entre las cuales se destacan en la Tabla 6.

Tabla 6. Bandas de frecuencia asignadas en Ecuador [37].

Banda [MHz]	Asignación
902 – 928	ICM
2400 – 2483.5	ICM
5150 – 5250	INI
5250 – 5350	INI
5470 – 5725	INI
5725 – 5850	ICM, INI

Las bandas ICM (Industrial, Científica y Médica) e INI (Infraestructura Nacional de Información) son consideradas bandas no licenciadas, por lo que su utilización no requiere autorización individual, siempre que se respeten los parámetros técnicos establecidos [38].

Las frecuencias comprendidas entre 902 y 928 MHz, 2400 y 2483.5 MHz, así como 5725 y 5850 MHz, están destinadas principalmente a aplicaciones de carácter industrial, científico y médico, incluyendo controles remotos y sistemas de monitoreo inalámbrico. Por su parte, las bandas asignadas a la Infraestructura Nacional de Información permiten la transmisión de datos y video, siendo comúnmente utilizadas en redes de comunicación entre dispositivos electrónicos [38].

En el contexto del presente proyecto, estas disposiciones resultan fundamentales, ya que determinan las frecuencias habilitadas para la comunicación entre el radio control

y el UAV, así como para la transmisión en tiempo real del video capturado durante las operaciones de monitoreo. De esta manera, se garantiza que el sistema propuesto opere dentro del marco legal vigente y minimice riesgos de interferencia electromagnética [38].

1.3.15 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético comprende el conjunto de radiaciones que se propagan en el espacio en forma de ondas electromagnéticas. Este abarca desde ondas de baja frecuencia y menor energía, como las ondas de radio y microondas, hasta radiaciones de alta frecuencia y elevada energía, como los rayos X y los rayos gamma [39].

La representación general del espectro se muestra en la Figura 12. A partir de esta clasificación se identifican regiones de especial interés tecnológico, particularmente aquellas relacionadas con la captura de imágenes en formato RGB y la detección térmica. Estas corresponden al espectro visible y al espectro infrarrojo, respectivamente, los cuales se describen a continuación [39].

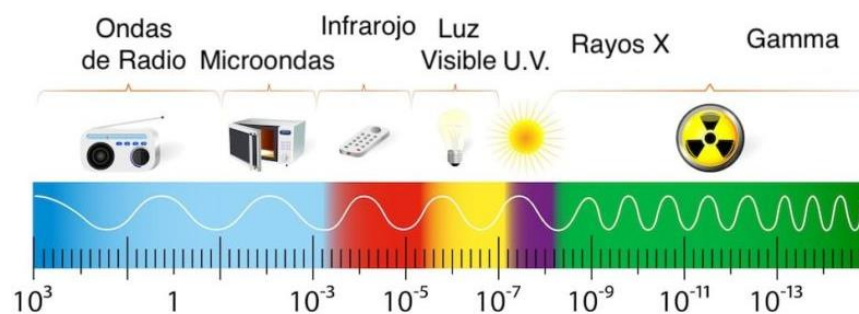


Figura 12. Espectro electromagnético

a) Espectro Visible

El espectro visible corresponde a la franja del espectro electromagnético perceptible por el ojo humano y por la mayoría de cámaras convencionales tipo RGB. Este intervalo comprende longitudes de onda aproximadas entre 400 nanómetros (nm), asociadas al color violeta, y 750 nm, correspondientes al color rojo. Las cámaras RGB capturan la información dentro de este rango utilizando sensores sensibles a las bandas roja, verde y azul, lo que permite reconstruir imágenes similares a la percepción visual humana. En la Figura 13 se ilustran las principales radiaciones electromagnéticas y sus respectivos intervalos de longitud de onda [39].

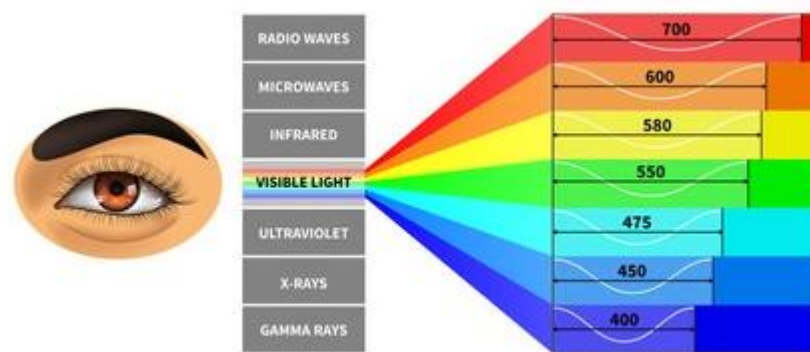


Figura 13. Espectro visible

b) Espectro infrarrojo

El espectro infrarrojo se ubica inmediatamente después del espectro visible, en la región de mayores longitudes de onda. En aplicaciones de termografía, resulta especialmente relevante el rango comprendido aproximadamente entre 7 μm y 14 μm , conocido como infrarrojo lejano, donde se detecta la radiación térmica emitida naturalmente por los cuerpos [40].

Este espectro se subdivide en diferentes bandas según su longitud de onda como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7. Banda espectral del espectro infrarrojo [40].

Subdivisión de los espectros		Banda espectral
SIR	Short infrared (Infrarrojo corto)	0.9 – 1.7 μm
MIR	Middle infrared (Infrarrojo medio)	3 - 5 μm
FIR	Far infrared (Infrarrojo lejano)	7 – 14 μm

El infrarrojo medio y lejano son particularmente importantes en sistemas de monitoreo térmico, ya que permiten identificar variaciones de temperatura en superficies, vegetación y focos de calor, incluso en condiciones de baja iluminación [40].

1.3.16 Fundamentos de la radiación térmica aplicada a la obtención de imágenes TIR

Diversos estudios señalan que todos los cuerpos con temperatura superior al cero absoluto emiten energía en forma de radiación electromagnética. En el caso de los seres vivos, esta emisión se manifiesta principalmente en el rango del infrarrojo térmico (TIR). La intensidad de la radiación emitida está directamente relacionada con la temperatura del objeto, de acuerdo con los principios de la física térmica [5], [6].

Para organismos con temperaturas corporales promedio como en el caso de los seres humanos y otros animales de sangre caliente la emisión de energía se concentra predominantemente en longitudes de onda comprendidas entre 8 y 14 micrómetros ($8 \times 10^{-6} - 14 \times 10^{-6} \text{ m}$), región correspondiente al infrarrojo térmico. Esta característica convierte al TIR en una banda espectral adecuada para la detección de seres vivos mediante cámaras termográficas.

La relación entre la luminosidad emitida (L) y la temperatura del cuerpo (T) se describe mediante la ley de Stefan-Boltzmann, expresada en la Ecuación 1:

$$L = A\sigma T^4 \quad (1)$$

donde:

- σ corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann,
- A representa el área de emisión en metros cuadrados (m²),
- T es la temperatura absoluta del cuerpo expresada en Kelvin [7].

Esta relación evidencia que la energía radiada aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura, lo que explica por qué pequeñas variaciones térmicas pueden generar diferencias detectables en sistemas de imagen infrarroja [41].

No obstante, la luminosidad registrada por una cámara termográfica puede verse influenciada por múltiples factores externos, entre ellos: las condiciones meteorológicas, el contraste térmico entre el objeto y el entorno, la distancia entre el sensor y el objetivo, el campo de visión (Field of View, FOV), la absorción atmosférica y el oscurecimiento provocado por vegetación u obstáculos físicos. Asimismo, en el caso de fauna silvestre, las propiedades del pelaje pueden modificar la emisión térmica detectada [41].

Comprender estos factores resulta fundamental para interpretar adecuadamente las imágenes térmicas y minimizar errores en la detección, especialmente en aplicaciones de monitoreo ambiental y prevención de incendios forestales.

a. Campo de visión (FOV) y altura del UAV

Para obtener datos térmicos confiables de un ser vivo homeotérmico, es fundamental considerar variables como el tamaño del objeto, su temperatura corporal y las condiciones del entorno, ya que estos factores influyen directamente en la calidad de la información registrada por la cámara termográfica. Para garantizar mediciones precisas, el objeto de interés debe ocupar un tamaño mínimo dentro del campo de visión (FOV) del sensor, debido a que cada píxel de la matriz térmica capta la radiación infrarroja promedio del área que cubre. Si en un mismo píxel coinciden superficies con distintas temperaturas, el valor obtenido será una combinación de ellas, fenómeno conocido como mezcla térmica o efecto de promedio espacial [42].

Por ello, se recomienda que el objeto analizado cubra completamente varios píxeles del sensor y no solo una fracción ya que, a mayor cantidad de píxeles ocupados, menor será el error asociado y mayor la precisión en la estimación de temperatura. Además, el tamaño proyectado del objeto dentro del FOV depende de la altura de vuelo del UAV: a mayor altura aumenta el área de cobertura, pero disminuye la resolución térmica efectiva; mientras que a menor altura el objeto ocupa más píxeles, mejorando la precisión térmica, pero reduciendo el área total observada, como se muestra en la Figura 14 [42].

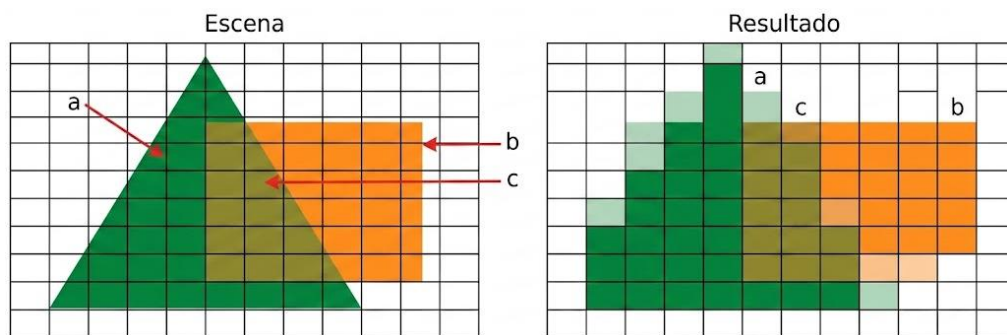


Figura 14. Ilustración de un campo de visión.

Siendo una representación esquemática del campo de visión (FOV) de un sensor térmico, donde el detector se encuentra dividido en una cuadrícula que simboliza la matriz de píxeles. En dicha ilustración, el área verde corresponde al objeto de interés,

el área naranja representa un elemento que genera oclusión parcial, y el fondo blanco constituye la superficie triangular [42].

Cada cámara térmica posee una escala angular intrínseca por píxel, la cual define el ángulo de cobertura que corresponde a cada elemento del sensor. Esta relación puede expresarse mediante la Ecuación 2:

$$\frac{\theta}{N_{\text{píxeles}}} = \rho_a \quad (2)$$

donde:

- ρ_a representa la escala angular total del sistema óptico,
- θ corresponde al campo de visión (FOV) en grados,
- $N_{\text{píxeles}}$ es el número total de píxeles del detector térmico (TIR) [7].

Generalmente, la escala angular por píxel es aproximadamente equivalente en los ejes horizontal (x) y vertical (y), lo que permite asumir una distribución uniforme en ambas direcciones [41].

A partir de esta relación angular, es posible definir la escala física de píxel ($\rho\rho$), entendida como la longitud real en metros que cada píxel cubre sobre la superficie terrestre. Esta escala depende directamente de la altura de vuelo del UAV (h) y se determina mediante la Ecuación 3:

$$h \tan(\rho_a) = \rho\rho \quad (3)$$

Esta expresión permite calcular el tamaño del área proyectada por cada píxel en el terreno, considerando la altura del sensor respecto al objetivo.

En consecuencia, el FOV proyectado sobre el suelo se obtiene multiplicando la escala física de píxel por el número total de píxeles del detector. Con esta relación geométrica es posible:

- Determinar la altura necesaria para cubrir un área mínima específica.
- Estimar la longitud o el ancho efectivo del terreno capturado.
- Calcular el área total cubierta en función de la altura de operación.

La Figura 15 presenta un ejemplo ilustrativo donde se analiza una configuración angular determinada, suponiendo que la escala de píxel deseada se ubica en el centro del campo de visión. En este caso, la altura requerida se expresa como R_M , correspondiente a la distancia mínima necesaria para cumplir con la resolución espacial establecida [41].

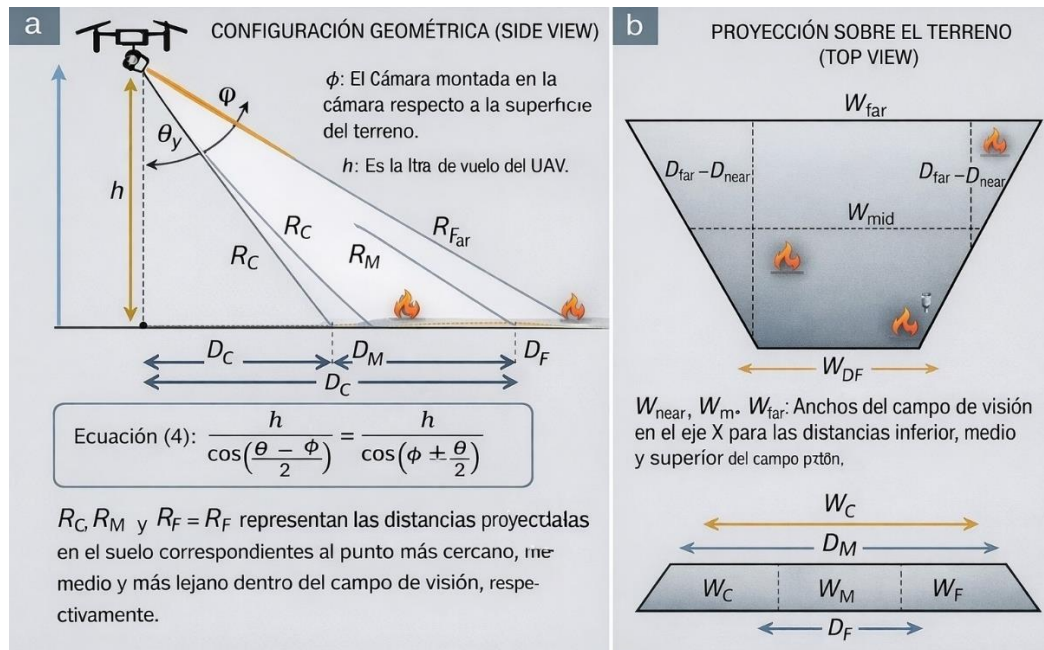


Figura 15. Ejemplo de escala de píxeles deseada.

En la Figura 15 se presenta la configuración geométrica de una cámara térmica instalada en un UAV con inclinación respecto al suelo.

En el literal (a) se muestra la cámara montada en ángulo, donde:

- ϕ representa el ángulo de inclinación de la cámara respecto a la superficie del terreno.
- θ_y corresponde al campo de visión angular de la cámara en el eje vertical (eje y).
- h es la altura de vuelo del UAV.
- D_C, D_M y D_F representan las distancias proyectadas en el suelo correspondientes al punto más cercano, medio y más lejano dentro del campo de visión.
- R_C, R_M y R_F son las distancias directas entre la cámara y los puntos inferior, medio y superior del campo de visión, respectivamente.

En el literal (b) se ilustra la proyección del campo de visión sobre el terreno, mostrando el área cubierta por la cámara bajo esta configuración angular. En este caso:

- W_C, W_M y W_F corresponden a los anchos del campo de visión en el eje X para las distancias cercana, media y lejana a lo largo del eje Y.

La relación geométrica entre la altura de vuelo del UAV y la distancia al punto medio del campo de visión se expresa mediante la Ecuación 4:

$$h = R_M \cos \left(\phi - \frac{\theta_y}{2} \right) \quad (4)$$

donde:

- ϕ es el ángulo de inclinación de la cámara respecto al suelo,
- θ_y es el campo de visión angular en el eje vertical,
- R_M es la distancia entre la cámara y el punto central del FOV proyectado en el terreno.

Esta expresión permite determinar la altura óptima de vuelo en función del ángulo de inclinación de la cámara y su apertura angular, parámetros fundamentales para definir el área cubierta y la resolución espacial efectiva del sistema de monitoreo [43].

En aplicaciones como la detección temprana de incendios forestales, el ajuste adecuado del ángulo ϕ y de la altura h resulta crítico, ya que influye directamente en la capacidad del sensor para identificar anomalías térmicas en distintas zonas del terreno (parte cercana, media o lejana del campo visual) [43].

b. Absorción por medio intermitente

Para efectuar mediciones térmicas confiables de objetos o fauna, es indispensable considerar las condiciones bajo las cuales se realiza la observación. La radiación infrarroja emitida por la fuente debe atravesar un medio antes de ser registrada por el detector, por lo que las características físicas de dicho medio influyen directamente en la señal que finalmente recibe la cámara térmica, tal como se ilustra en la Figura 16. En este contexto, $I_{\nu 0}$ representa la intensidad de radiación infrarroja emitida por la fuente, mientras que I_{ν} corresponde a la intensidad de radiación TIR detectada por la cámara tras recorrer una distancia S a través de un medio con coeficiente de absorción k_{ν} [44].

En consecuencia, cualquier variación en las propiedades del medio de propagación puede generar atenuación de la señal original, afectando la precisión de la medición térmica realizada por el sistema [44].

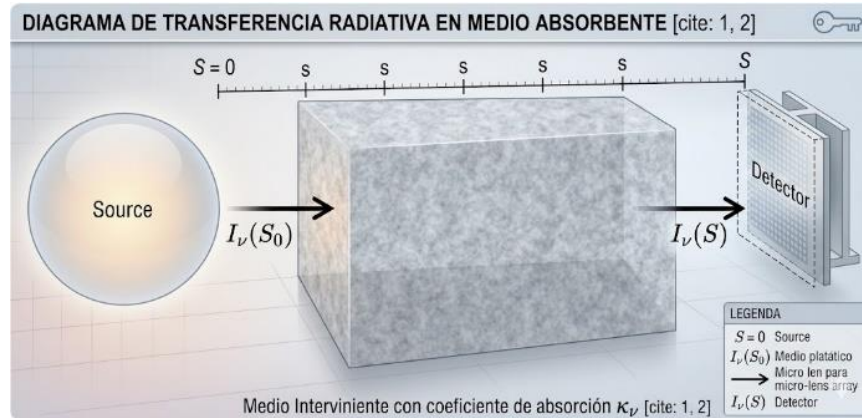


Figura 16. Medio absorbente y medio detector.

La emisión y absorción de radiación por parte de las moléculas presentes en la atmósfera está determinada por parámetros físicos como la presión, la temperatura y la concentración relativa de cada especie molecular. En la tropósfera inferior predominan principalmente el nitrógeno, el oxígeno y el vapor de agua, siendo este último altamente variable en función de la humedad ambiental [44].

c. El efecto de la niebla

Cuando la luz visible atraviesa la niebla, sufre una dispersión considerable debido a que su longitud de onda es comparable al tamaño de las gotas. En cambio, la radiación térmica infrarroja (8–14 μm), al tener mayor longitud de onda, experimenta menor dispersión. Por esta razón, los sistemas TIR permiten observar objetos a mayores distancias en comparación con el espectro visible [45].

En la Figura 17 se muestra un ejemplo del efecto de la niebla en la transmisión radioactiva. En el literal (a) se analiza la fracción de radiación transmitida para diferentes longitudes de onda, donde 0,6–0,9 μm corresponde al rango visible y 8–14 μm al infrarrojo térmico. En el literal (b) se presenta la variación de la temperatura observada de un objeto con temperatura real $T_s = 25^\circ\text{C}$ hasta una distancia de 40 m, bajo condiciones de humedad relativa $H = 100\%$ y presión $P = 110 \text{ kPa}$, evidenciando que la medición térmica no se ve significativamente afectada dentro de estos parámetros [45].

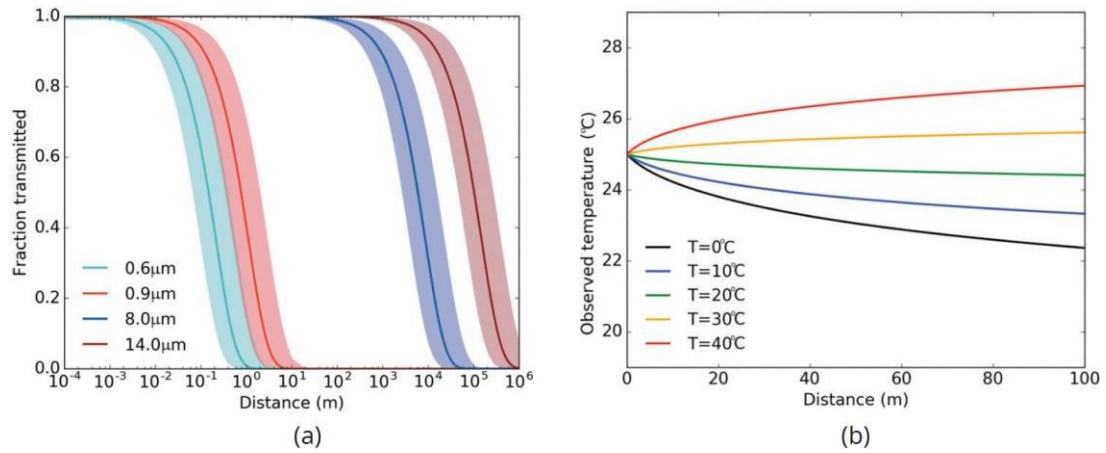


Figura 17. (a) Fracción de la radiación emitida por las fuentes transmitida a través de aire húmedo. (b) Variación de la temperatura observada respecto a la temperatura real, como resultado de los procesos de absorción y emisión producidos por la niebla [45].

d. Radiación óptica

Las cámaras termográficas permiten generar imágenes de animales o personas incluso cuando estos presentan temperaturas inferiores a las de su entorno. No obstante, en la mayoría de los casos, los seres vivos exhiben una mayor pérdida de calor radiante en comparación con el fondo, lo que facilita su detección térmica [46].

La energía emitida por la superficie de un organismo no depende únicamente de su temperatura, sino también de sus propiedades superficiales. En animales, factores como el tipo de piel o pelaje influyen en la emisividad; en el caso de los humanos, la vestimenta modifica significativamente la emisividad efectiva del cuerpo. Este parámetro resulta fundamental en la formación de imágenes térmicas, ya que determina la cantidad de radiación emitida en relación con la temperatura real [46].

Las cámaras termográficas operan principalmente en dos bandas específicas del infrarrojo: la banda de onda media (MWIR), que abarca de 3 a 5 μm , y la banda de onda larga (LWIR), que cubre aproximadamente de 8 a 12 μm , como se muestra en la Figura 18 [46].

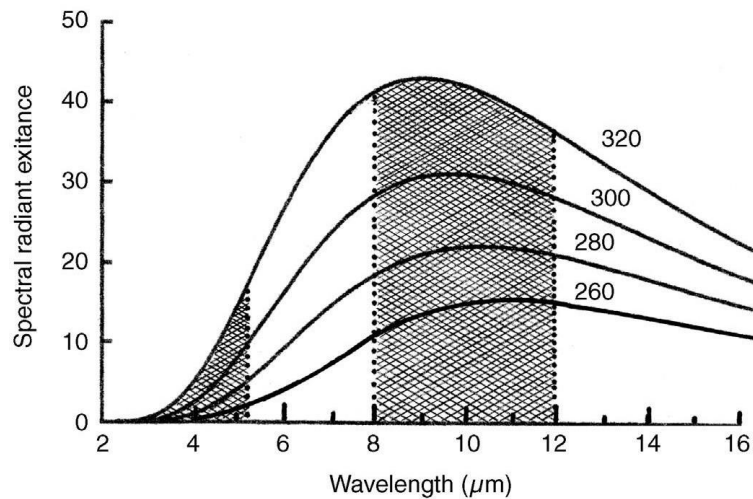


Figura 18. Bandas MWIR y LWIR relativas a las ventanas atmosféricas [46].

e. Emisividad

La emisividad es la propiedad física que describe la capacidad de un cuerpo para emitir energía en forma de radiación térmica. La correcta captura de esta radiación mediante cámaras termográficas depende de diversos parámetros que pueden variar continuamente, entre ellos la temperatura del objeto, el ángulo de visión del sensor y las características superficiales del material, como suciedad, humedad, condensación, vestimenta o irregularidades estructurales [47].

El ángulo de observación influye directamente en la emisividad efectiva registrada por la cámara. A medida que el ángulo de visión se aproxima a 90° , la emisividad aparente tiende a disminuir, fenómeno que se ilustra en la Figura 19. Por esta razón, la geometría de captura es un factor crítico en la precisión de la medición térmica [47].

Los materiales con emisividades superiores a 0,9 se consideran buenos emisores (y absorbentes eficientes), mientras que aquellos con valores inferiores a 0,2 se comportan principalmente como reflectores. En el caso de los mamíferos, la emisividad suele ser mayor a 0,9, lo que favorece su detección mediante cámaras térmicas. De acuerdo con [47], la piel humana presenta una emisividad aproximada de

0,98, lo que la convierte en un emisor térmico casi ideal dentro del espectro infrarrojo [47].

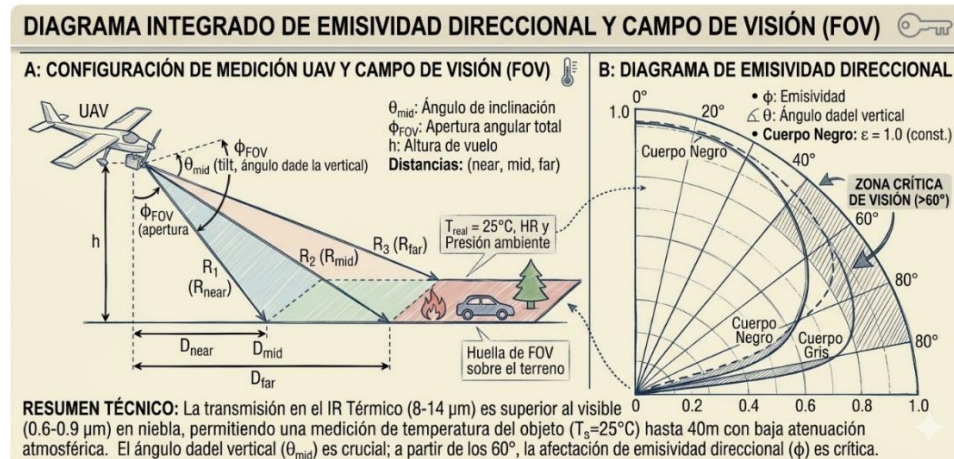


Figura 19. Emisividad y FOV [47].

1.3.17 Cámaras térmicas

Todo cuerpo cuya temperatura sea superior al cero absoluto ($-273,15^\circ\text{C}$) emite radiación infrarroja, fenómeno conocido como firma térmica [24]. En una cámara térmica, cada píxel del sensor responde a la energía infrarroja incidente y genera una señal eléctrica proporcional a la intensidad de dicha radiación [48].

Posteriormente, el procesador interno del dispositivo analiza la información proveniente de cada píxel y realiza cálculos matemáticos para construir un mapa térmico de la escena observada. En este mapa, los valores de temperatura son representados mediante escalas cromáticas, donde cada color corresponde a un rango térmico específico, como se ilustra en la Figura 20 [48].

THERMAL PALETTES

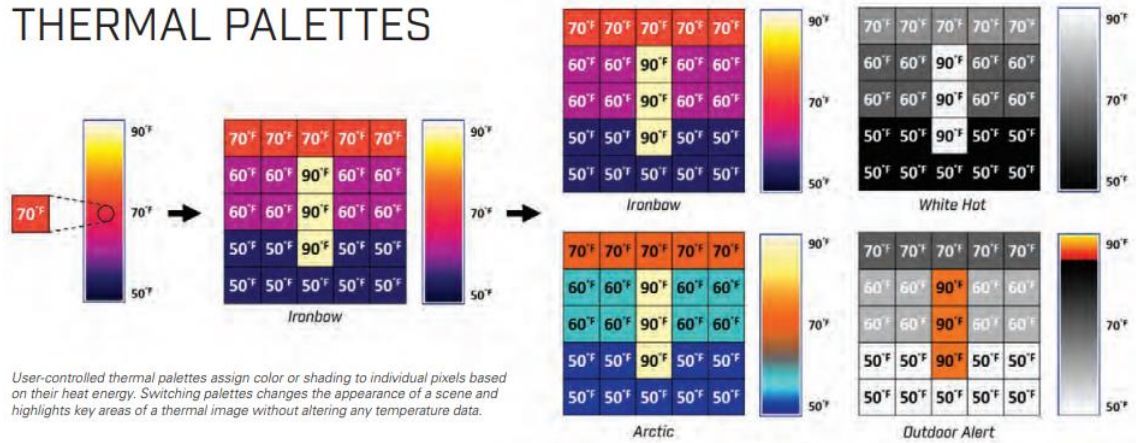


Figura 20. Paleta de colores térmicos [48].

Para optimizar la interpretación visual, estas cámaras incorporan distintas paletas de color que permiten resaltar contrastes térmicos y facilitar la identificación de anomalías. Dichas paletas asignan tonalidades específicas a intervalos de temperatura determinados, como se visualiza en la Figura 21, mejorando la detección de puntos críticos sin perder información global de la escena [48].



Figura 21. Ejemplos de cada una de las principales paletas térmicas.

Entre las principales paletas térmicas se encuentran:

a) White Hot (Blanco caliente)

En esta configuración, las áreas de mayor temperatura se representan en tonos blancos, mientras que las zonas más frías aparecen en tonalidades oscuras. Es una de las escalas más utilizadas debido a su claridad y facilidad de interpretación, especialmente en entornos con variaciones térmicas dinámicas [48].

b) Sepia

La paleta Sepia deriva del esquema White Hot, incorporando tonalidades cálidas y doradas. Esta configuración reduce la fatiga visual en observaciones prolongadas, siendo adecuada para tareas de vigilancia continua o monitoreo extendido [48].

c) Rainbow HC (Arcoíris de alto contraste)

La escala Rainbow HC emplea una amplia gama de colores para resaltar diferencias térmicas mínimas. Es especialmente útil cuando se requiere identificar variaciones sutiles de temperatura en escenarios de bajo contraste térmico, permitiendo detectar cambios poco perceptibles [48].

d) Black Hot (Negro caliente)

Esta paleta representa las zonas más calientes en tonos oscuros y las áreas frías en tonos claros, constituyendo una inversión del esquema White Hot. Es ampliamente utilizada en aplicaciones de seguridad y vigilancia debido a la nitidez con la que resalta fuentes de calor corporal [48].

e) Outdoor Alert (Alerta exterior)

Basada en el esquema Black Hot, esta configuración resalta aproximadamente el 10 % de las áreas con mayor temperatura en tonos llamativos como naranja y amarillo. Está diseñada para facilitar la detección rápida de fuentes térmicas en ambientes con alto contraste, especialmente en condiciones nocturnas [48].

f) Arctic (Ártico)

La paleta Arctic combina tonos dorados para zonas calientes y azules para áreas frías, permitiendo una visualización clara en entornos de bajo contraste. Su diseño facilita la identificación de fuentes térmicas y variaciones graduales de temperatura [48].

g) Ironbow (Arco de hierro)

La escala Ironbow utiliza una transición de colores que va desde tonalidades oscuras para áreas frías hasta colores cálidos y brillantes para zonas de mayor temperatura. Es particularmente eficaz para la detección rápida de anomalías térmicas y análisis detallado de distribución de calor [48].

1.3.18 Sensor térmico MLX90640

El MLX90640 es un sensor térmico infrarrojo sin contacto ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo térmico, detección de calor y visión térmica de bajo costo. Este sensor fue desarrollado por la empresa Melexis y funciona mediante la detección de radiación infrarroja emitida naturalmente por los objetos. A diferencia de los sensores de temperatura tradicionales que miden en un solo punto, el MLX90640 incorpora una matriz de 32×24 píxeles térmicos, lo que permite generar una imagen térmica bidimensional del entorno. Cada píxel actúa como un sensor independiente capaz de medir la temperatura de una pequeña área dentro del campo de visión, permitiendo obtener mapas térmicos en tiempo real [49].

Desde el punto de vista técnico que se presenta en la Figura 22, el MLX90640 puede medir temperaturas aproximadas en un rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una precisión típica cercana a $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en condiciones controladas. El sensor se comunica con microcontroladores mediante el protocolo I²C, lo que facilita su integración con plataformas embebidas como ESP32, Arduino o sistemas de procesamiento de datos.

Además, el dispositivo permite diferentes tasas de refresco (desde 0.5 Hz hasta 64 Hz), lo que posibilita ajustar el equilibrio entre velocidad de actualización y consumo energético. Gracias a su bajo consumo y tamaño compacto, este sensor resulta adecuado para sistemas portátiles y plataformas aéreas no tripuladas [49].

IR Array Thermal Imaging Camera

MLX90640, 32×24 IR Array

Small Size, Non-Contact, Low Cost



Specifications	
Operating voltage	3.3V/5V
Field of view (FOV)	55° × 35°
Communication bus	I2C (0x33 by default)
Current	< 23mA
Absolute accuracy	±2°C (ambient temp. 0 ~ 50°C)
Refresh rate	0.5~64Hz (0.25~32FPS)
Target temperature range	-40 ~ 300°C
Dimensions	28 × 16mm
Operating temperature	-40 ~ 85°C
Mounting hole size	2.0mm

Figura 22. Características del Sensor térmico MLX90640 [49].

En aplicaciones de vehículos aéreos no tripulados (UAV), el sensor MLX90640 permite implementar sistemas de detección térmica aérea, los cuales pueden utilizarse para identificar fuentes de calor, localizar personas o animales, detectar incendios incipientes o analizar variaciones térmicas en el terreno. Integrado con un módulo de procesamiento como el ESP32, el sensor puede transmitir los datos térmicos hacia una estación de monitoreo, donde se procesan para generar visualizaciones térmicas. Esta capacidad resulta especialmente útil en proyectos de monitoreo autónomo, ya que complementa la información visual obtenida por cámaras RGB, proporcionando una capa adicional de análisis basada en temperatura [49].

1.3.19 Cámaras RGB

Las cámaras RGB son dispositivos ópticos diseñados para captar radiación dentro del espectro visible y descomponerla en sus tres componentes fundamentales: rojo (Red), verde (Green) y azul (Blue). A partir de la captación de estas tres bandas, el sistema genera una imagen digital mediante la combinación aditiva de colores, proceso que permite reproducir una amplia gama cromática similar a la percepción visual humana [50].

El sensor de la cámara registra la intensidad luminosa en cada uno de estos canales, y posteriormente un procesador integra la información para conformar la imagen final. Este principio de mezcla aditiva constituye la base de los sistemas de captura digital convencionales, tal como se ilustra en la Figura 23 [50].

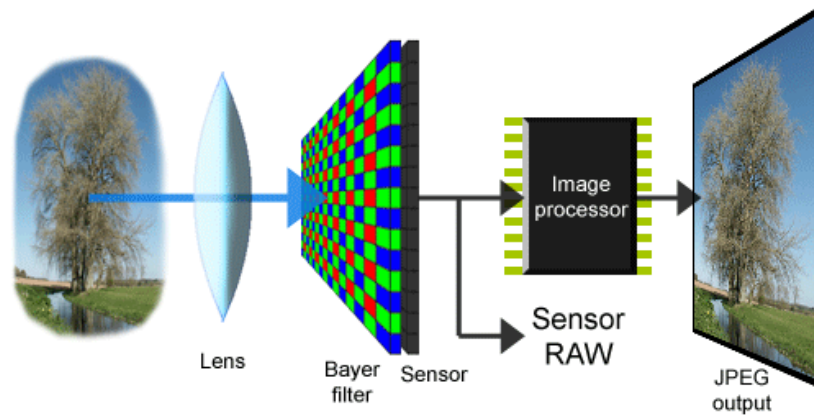


Figura 23. Sistema de captura digital.

1.3.20 Sistemas FPV

Los sistemas de visión en primera persona (First Person View, FPV) permiten la transmisión de imágenes en tiempo real desde una cámara instalada en el UAV hacia un monitor o gafas especializadas. Esta tecnología facilita el control y la navegación remota, especialmente en aplicaciones que requieren maniobrabilidad precisa o inspección visual en campo [51].

Actualmente, la mayoría de los UAV comerciales operan mediante radiofrecuencia en la banda de 2,4 GHz para el control remoto. No obstante, cuando se integra un sistema FPV, se recomienda utilizar la banda de 5,8 GHz u otras frecuencias que ofrezcan mayor ancho de banda, lo que permite transmitir video con menor interferencia y a mayores velocidades de datos [51].

a. Cámara FPV

Las cámaras FPV están diseñadas para ofrecer latencia mínima, característica fundamental para vuelos en tiempo real. Además, suelen contar con amplio rango dinámico (WDR), lo que les permite adaptarse eficazmente a variaciones de iluminación en entornos naturales. Estas cámaras son generalmente dispositivos analógicos optimizados para eficiencia y rapidez de transmisión, aunque normalmente no permiten grabación en alta definición (HD) [52].

La cámara es responsable de capturar el flujo de video conforme a parámetros previamente establecidos, como resolución en píxeles y velocidad de fotogramas (fps). En la Tabla 8 se presentan las características técnicas de cámaras utilizadas en drones FPV disponibles en el mercado. Entre ellas, los modelos CADDXFPV Ratel y CMOS Orange disponen de salida analógica, lo que las hace compatibles con sistemas tradicionales de transmisión FPV [52].

Tabla 8. Características técnicas de cámaras para drones [52].

Características	CADDXFPV Ratel	CMOS Orange
		
Tamaño	19x19x20 mm	25x25x30 mm
Sensor	1/1.8" Starlight HDR CMOS	CMOS
Píxeles	1200 TVL	1200 TVL
Peso	8 g	9.5 g
Sistema de señal	PAL/NTSC	PAL/NTSC
Salida de video	CVBS (analógica)	CVBS (analógica)
Lente	2.1 mm	2.5 mm
Campo de Visión (FOV)	125 grados	120 grados
Voltaje de Funcionamiento	DC 4.5 V-27 V	DC 5 V-12 V

b. Video transmisor y receptor VTX/VRX

El transmisor de video (VTX) es un componente fundamental dentro de un sistema FPV, ya que se encarga de enviar la señal de video capturada por la cámara hacia un receptor de video (VRX). Este proceso permite que las imágenes sean visualizadas en tiempo real mediante un monitor o gafas FPV, como se muestra en la Figura 24 [53].

El VTX convierte la señal proveniente de la cámara en una señal de radiofrecuencia que se transmite de forma inalámbrica hasta el VRX, el cual la decodifica para su visualización. Estos dispositivos pueden operar en distintas bandas de frecuencia, tales como 1,2 GHz, 2,4 GHz y 5,8 GHz. No obstante, la banda de 5,8 GHz es la más utilizada en sistemas FPV debido a que permite emplear antenas de menor tamaño y reduce la probabilidad de interferencia con el sistema de control del UAV, que comúnmente opera en 2,4 GHz [53].

La selección adecuada de la frecuencia y la potencia de transmisión del VTX influye directamente en el alcance, la estabilidad de la señal y la calidad del enlace de video durante el vuelo [53].



Figura 24. Sistema de transmisión.

En la Tabla 9 se detalla las características técnicas de 3 tipos de transmisores de video que se pueden incorporar a un UAV.

Tabla 9. Características de transmisores de video.

Características	Eachine - TX1200	Eachine - TX5258	Eachine - TX801
			
Peso	9 g	8.25 g	7.3 g
Dimensiones	36 * 36 * 5 mm	31.88 * 22.90 * 5 mm	28 * 20 * 8 mm
Canal de frecuencia	5.8 GHz – 40 canales	5.8 GHz – 72 canales	5.8 GHz – 72 canales
Potencia de salida	25/200/600/1000 mW	25/200/500/800 mW	0.01/5/25/50/100 200/400/600 mW
Alcance	3 km	2.5 km	3km
Voltaje de operación	DC 7 V- 26 V	DC 7 V – 24 V	DC 7 V- 24 V
Salida de voltaje	5 V	5 V	5 V
Impedancia de video	75 Ω	10 K Ω	10 K Ω
Ancho de banda	18 MHz	18 MHz	18 MHz
Formato de video	NTSC/PAL	NTSC/PAL	NTSC/PAL
Conector de antena	MMCX	BR-SMA	BR-SMA

La comparación entre dos receptores de video disponibles en el mercado se muestra en la Tabla 10, donde se analiza las características técnicas, con el objetivo de seleccionar el más adecuado en términos de calidad de imagen.

Tabla 10. Características de receptores de video.

Características	Eachine - ROTG01	Eachine - RC305
		
Peso	28 g	43 g
Dimensiones	61 * 33 * 0.9 mm	61 * 52 * 13 mm
Rango de frecuencias	5645 MHz – 5945 MHz	5705 MHz- 5945 MHz
Canal de frecuencia	5.8 GHz-150 canales	5.8 GHz-8 canales
Sensibilidad	- 90 dBm	- 90 dBm
Potencia	1000 mW	350 mW
Voltaje de operación	200 mA / 5 V	DC 5 V – 12 V
Conector de antena	Rp-SMA Hembra	Rp-SMA Hembra
Conector de salida	Micro USB	Jack 3.5 mm

1.3.21 Distancia de muestreo en el suelo (GSD)

En telemetría y teledetección, la distancia de muestreo en el suelo (Ground Sample Distance, GSD) se refiere a la resolución espacial de una imagen adquirida desde una plataforma aérea o satelital. En términos prácticos, el GSD representa la distancia real en el terreno que corresponde a cada píxel de la imagen. Cuanto menor sea el GSD, mayor será el nivel de detalle capturado [54].

Para determinar este parámetro, primero es necesario calcular el ancho físico del sensor, el cual puede obtenerse mediante la Ecuación 5 [54]:

$$\text{Ancho del senso} = \text{Resolución} \times \text{distancia entre píxeles} \quad (5)$$

Una vez conocido el tamaño físico del sensor, el cálculo del GSD requiere considerar parámetros adicionales como: la longitud del sensor (mm), la altura de vuelo (m), la distancia focal de la cámara (mm) y el ancho de la imagen en píxeles (px). Con estos valores, el GSD puede determinarse mediante la Ecuación 6 [54]:

$$GSD = \frac{\text{Ancho del sensor} * \text{Altura}}{\text{Distancia focal de la cámara} * \text{Ancho de imagen}} \quad (6)$$

donde:

- H es la altura de vuelo,
- f es la distancia focal,
- el ancho del sensor se expresa en milímetros,
- el ancho de la imagen se expresa en píxeles.

Este parámetro resulta fundamental para definir la capacidad del sistema de identificar objetos pequeños en el terreno, ya que determina el tamaño mínimo detectable dentro de la escena capturada.

1.3.22 Herramientas para el procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes constituye un componente fundamental en los sistemas de monitoreo basados en vehículos aéreos no tripulados (UAV), ya que permite analizar la información visual capturada por sensores o cámaras instaladas en estas plataformas. A través de técnicas de visión por computadora es posible detectar patrones específicos en imágenes o videos, como la presencia de humo, cambios de temperatura o focos de calor asociados a incendios forestales. Estas herramientas facilitan el análisis en tiempo real de grandes volúmenes de datos visuales, lo que

contribuye a mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias y apoyar las labores de monitoreo ambiental y prevención de incendios [55].

Para el desarrollo de sistemas de análisis de imágenes se utilizan diversas bibliotecas y lenguajes de programación especializados, los cuales permiten implementar algoritmos de detección, clasificación y seguimiento de objetos. Entre las herramientas más utilizadas en el campo de la visión artificial y el aprendizaje automático se encuentran OpenCV, Python y PyTorch, que proporcionan funciones avanzadas para el procesamiento de imágenes, entrenamiento de modelos y desarrollo de aplicaciones inteligentes [55].

a. OpenCV

OpenCV, acrónimo de Open Source Computer Vision, es una biblioteca de código abierto orientada al procesamiento de imágenes y visión por computadora. Fue desarrollada inicialmente por Intel en 1999 y actualmente cuenta con el aporte de una amplia comunidad de desarrolladores que han contribuido a su evolución y optimización para múltiples aplicaciones tecnológicas [56].

Entre las principales funcionalidades de OpenCV se encuentran la adquisición y procesamiento de imágenes en tiempo real mediante cámaras, la aplicación de filtros y algoritmos de análisis visual, así como la detección y clasificación de objetos dentro de una escena. En el contexto del monitoreo de incendios mediante UAVs, esta herramienta permite analizar imágenes aéreas para identificar indicios de fuego o humo, detectar cambios en el entorno y mejorar la precisión de los sistemas de vigilancia ambiental. Además, OpenCV facilita la corrección de distorsiones en las imágenes y el ajuste de parámetros de calibración de la cámara, lo que contribuye a obtener información visual más precisa para el análisis [56].

b. Python

Python es uno de los lenguajes de programación más utilizados en el desarrollo de aplicaciones de visión por computadora y análisis de datos debido a su sintaxis sencilla, flexibilidad y amplia disponibilidad de bibliotecas especializadas. En el ámbito del procesamiento de imágenes y la detección de objetos, Python permite integrar herramientas como OpenCV, TensorFlow y Keras, que facilitan el desarrollo de algoritmos de análisis visual y aprendizaje automático [57].

En sistemas de monitoreo con UAVs, Python se utiliza para procesar las imágenes capturadas por las cámaras del dron, ejecutar modelos de detección de patrones y analizar datos en tiempo real. Su amplia comunidad de desarrolladores y la constante actualización de sus bibliotecas lo convierten en una herramienta clave para la implementación de soluciones tecnológicas orientadas a la prevención y gestión de riesgos, como la detección temprana de incendios forestales [57].

c. PyTorch

PyTorch es una biblioteca de aprendizaje automático desarrollada por el laboratorio de investigación en inteligencia artificial de Facebook (FAIR), presentada en 2016 por Adam Paszke, Sam Gross, Soumith Chintala y Gregory Chanan. Esta herramienta se ha convertido en una de las plataformas más utilizadas para el desarrollo de modelos de deep learning debido a su flexibilidad y eficiencia en el manejo de grandes volúmenes de datos [58].

Entre sus principales características se encuentra la capacidad de realizar cálculos con tensores multidimensionales de manera acelerada, aprovechando el procesamiento en unidades gráficas (GPU). Además, PyTorch permite construir redes neuronales profundas mediante un sistema de diferenciación automática que registra las operaciones matemáticas realizadas durante el entrenamiento del modelo. En aplicaciones relacionadas con el monitoreo de incendios mediante UAVs, PyTorch puede emplearse para entrenar modelos de detección que identifiquen patrones

asociados al fuego o al humo en imágenes aéreas, contribuyendo así a mejorar la precisión y rapidez de los sistemas de alerta temprana [58].

1.3.23 Detección temprana de focos de calor en áreas forestales

La detección temprana de focos de calor en áreas forestales es un proceso clave para la prevención y control de incendios, ya que permite identificar anomalías térmicas que pueden indicar el inicio de procesos de combustión en la vegetación. Un foco de calor se caracteriza por la presencia de temperaturas superiores a las del entorno, generadas por la quema de material vegetal, condiciones climáticas extremas o actividades antrópicas. La identificación oportuna de estos puntos térmicos permite activar mecanismos de respuesta rápida que reducen la propagación del fuego y minimizan los impactos ambientales, ecológicos y socioeconómicos asociados a los incendios forestales [59].

En la actualidad, la detección de focos de calor se apoya en tecnologías de teledetección como sensores infrarrojos y cámaras termográficas, capaces de captar la radiación térmica emitida por los cuerpos y representarla en imágenes que evidencian variaciones de temperatura. Integradas en vehículos aéreos no tripulados (UAVs), estas herramientas permiten realizar monitoreo aéreo en tiempo real sobre áreas extensas o de difícil acceso, facilitando la localización precisa de puntos de alta temperatura. Además, mediante técnicas de procesamiento de imágenes y análisis computacional es posible identificar patrones térmicos anómalos y generar alertas tempranas, fortaleciendo los sistemas de vigilancia ambiental y el apoyo operativo a instituciones de respuesta ante emergencias, como el Cuerpo de Bomberos de Ambato [59].

1.3.24 Red convolucional YOLO

YOLO (You Only Look Once) es un sistema de detección de objetos en tiempo real basado en redes neuronales convolucionales (CNN). A diferencia de otros enfoques que realizan la detección en múltiples etapas, YOLO procesa la imagen completa en una sola pasada a través de la red, lo que le permite alcanzar altas velocidades de inferencia [60].

El modelo divide la imagen de entrada en una cuadrícula y, para cada región, predice múltiples cajas delimitadoras (bounding boxes) junto con la probabilidad de pertenencia a cada una de las clases entrenadas. Cada caja delimitadora incluye parámetros como coordenadas, dimensiones y nivel de confianza. En la Figura 25 se muestra un ejemplo de ejecución del sistema sobre una imagen de entrada [60].

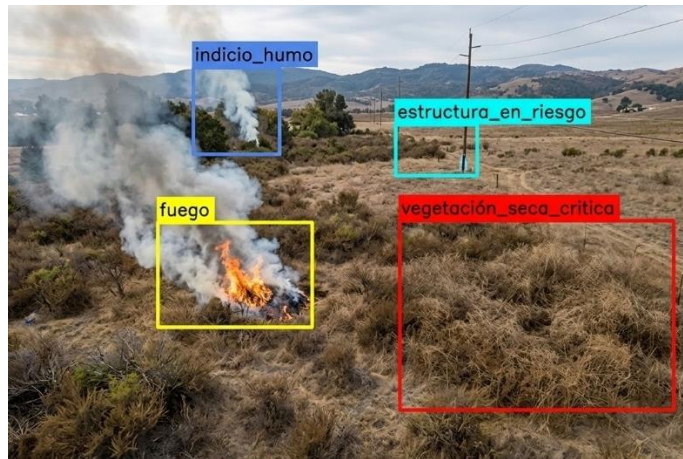


Figura 25. Detección de indicio de incendio con YOLO.

a. YOLOv8

YOLOv8 constituye una de las versiones más recientes de la familia de detectores YOLO, desarrollada por la organización Ultralytics. Esta versión incorpora mejoras arquitectónicas y optimizaciones que incrementan tanto la precisión como la velocidad de detección en comparación con versiones anteriores [61].

Lanzado en enero de 2023, YOLOv8 fue presentado como una evolución respecto a YOLOv5, mejorando su desempeño en el conjunto de datos COCO (Common Objects in Context). El modelo en su configuración mediana alcanza aproximadamente un 50,2 % de mean Average Precision (mAP) evaluado sobre dicho conjunto de datos, como se observa en la Figura 26 [61].

Además, YOLOv8 introduce una estructura de implementación más organizada mediante su distribución como paquete instalable mediante PIP, lo que facilita su integración en proyectos de visión por computadora y aplicaciones de detección en tiempo real [61].

En el contexto de detección de personas mediante imágenes térmicas capturadas por UAV, YOLOv8 resulta una alternativa adecuada debido a su equilibrio entre precisión, velocidad de procesamiento y facilidad de implementación.

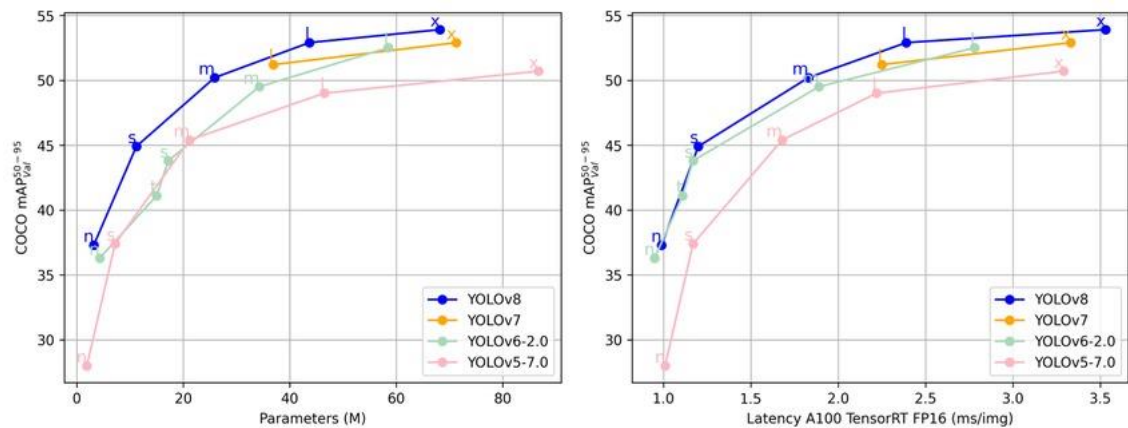


Figura 26. mAP COCO vs número de Parámetros (pesos y sesgos) – YOLOv8 [61].

b. mAP (mean Average Precision):

Métrica utilizada para evaluar el rendimiento de modelos de detección de objetos. Representa el promedio de precisión calculado en diferentes niveles de recall, indicando la capacidad del modelo para detectar correctamente los objetos presentes. Un mayor valor de mAP refleja mejor desempeño en precisión y detección [62].

c. Parámetros (M) en millones:

Indica el número total de parámetros entrenables del modelo, expresados en millones. Un mayor número permite modelar relaciones más complejas, aunque incrementa el consumo de memoria, el tiempo de entrenamiento y los requerimientos computacionales.

1.3.25 Plataformas de servicios en la nube

Las plataformas de servicios en la nube proporcionan infraestructura y recursos computacionales accesibles a través de Internet, permitiendo ejecutar aplicaciones, almacenar información y procesar datos sin requerir instalación local de software o hardware especializado. Estos servicios facilitan la gestión remota de sistemas y el acceso a capacidades de procesamiento escalables. En la Tabla 11 se presentan algunas de las principales plataformas de computación en la nube, con el fin de analizar y comparar sus características y especificaciones técnicas.

Tabla 11. Características de plataformas con servicios en la nube [63].

Características	Microsoft Azure	AWS	Google Cloud Platform
Alcance Global	Presencia en múltiples regiones y zonas de disponibilidad en todo el mundo	La red más extensa de centros de datos y zonas de disponibilidad a nivel mundial	Infraestructura en crecimiento con centros de datos en diversas regiones globales
Integración	Excelente con productos y servicios de Microsoft, ideal para entornos Windows	Amplia compatibilidad con diversas tecnologías y sistemas operativos	Fuerte integración con servicios de Google y herramientas de código abierto
Precios	Estructura de precios competitiva, con opciones de pago por uso y descuentos por compromiso	Amplia variedad de opciones de precios, con modelos de pago por uso y reservas a largo plazo	Ofrece precios competitivos, con descuentos por uso prolongado y facturación por segundos

Características	Microsoft Azure	AWS	Google Cloud Platform
Facilidad de Uso	Interfaz intuitiva y herramientas de gestión basadas en la web	Requiere una inversión significativa para dominar sus herramientas y conocimientos técnicos	Considerado asequible en términos de administración, con una curva de aprendizaje moderada
Seguridad y Cumplimiento	Ofrece medidas de sólidas y cumplimiento con múltiples estándares y regulaciones	Amplias certificaciones de seguridad y cumplimiento en diversas industrias	Proporciona seguridad robusta y cumple con numerosos estándares internacionales

1.3.26 Equipo computacional para programación

El equipo computacional para programación corresponde al hardware utilizado como plataforma de soporte para el desarrollo, ejecución y depuración de software. Este tipo de equipo debe contar con especificaciones técnicas adecuadas que permitan ejecutar entornos de desarrollo, procesar grandes volúmenes de datos y garantizar un rendimiento eficiente durante la implementación de aplicaciones y sistemas informáticos.

Una computadora portátil permite la ejecución de lenguajes de programación y herramientas necesarias para la recepción y procesamiento de datos multimedia, como video capturado por sistemas de monitoreo, así como el análisis mediante algoritmos de detección y reconocimiento. Además, es compatible con diversos programas utilizados en el desarrollo del sistema, incluyendo entornos de programación, software de configuración de vuelo para UAVs y herramientas de grabación y análisis de video. En la Tabla 12 se presenta una comparación técnica de los equipos computacionales propuestos para su implementación dentro del sistema [64].

Tabla 12. Características de ordenadores portátiles [64].

	Lenovo IdeaPad L340	Dell G5 15 Gaming Laptop	HP Pavilion Gaming 15
Características			
Procesador (CPU)	Intel Core i7-8565U (8ª Gen, 4 núcleos, 1.80 GHz, Turbo hasta 4.60 GHz)	AMD Ryzen 7 4800H (8 núcleos, 2.9 GHz, Turbo hasta 4.2 GHz)	Intel Core i7-8750H (6 núcleos, 2.2 GHz, Turbo hasta 4.1 GHz)
Gráficos	Intel UHD Graphics 620 (integrado)	AMD Radeon RX 5600M (GPU dedicada)	NVIDIA GeForce GTX 1060 (GPU dedicada, 6 GB GDDR5)
Memoria RAM	8 GB DDR4	8 GB DDR4	8 GB DDR4
Almacenamiento	1.36 TB	512 GB PCIe SSD	1 TB HDD + 16 GB Intel Optane
Pantalla	15.6" FHD (1920x1080)	15.6" FHD (1920x1080), 144 Hz	15.6" FHD (1920x1080)
Sistema Operativo	Windows 11 Home (64 bits)	Windows 10 Home (64 bits)	Windows 10 Home (64 bits)
Conectividad	Wi-Fi, Bluetooth, HDMI, USB-C	Wi-Fi 6, USB-C, HDMI, Bluetooth	Wi-Fi, HDMI, Bluetooth
Peso Aprox.	2.2 kg	2.5 kg	2.4 kg

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Desarrollar un sistema de monitoreo de incendios en el cerro Casigana mediante UAVS para el apoyo operativo del cuerpo de bomberos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar sistemas de monitoreo de incendios con UAV viables al entorno del Cerro Casigana.
- Diseñar la arquitectura del sistema de monitoreo y alertas en tiempo real.
- Implementar una interfaz web de monitoreo y gestión de alertas de incendios en el Cerro Casigana.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

A lo largo de este proyecto de investigación, se emplearon diferentes dispositivos y materiales con el objetivo de desarrollar un sistema de monitoreo de indicios de incendio forestal. En la Tabla 13 se presenta un listado detallado de los materiales utilizados para alcanzar este propósito.

Tabla 13. Materiales y dispositivos [65].

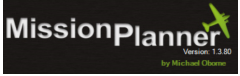
Materiales	Descripción	Imagen
Cámara CMOS Orange	Utilizada para obtener video en tiempo real facilitando la adquisición de imágenes de los vehículos.	
Cuadricóptero SpeedyBee F405 V3	Empleado como soporte de la cámara FPV con el propósito de sobrevolar las trayectorias establecidas.	
Batería LiPo 4S 14.8 V-16.8 V	Alimentación del UAV	

Materiales	Descripción	Imagen
TBS M8.2 GPS GLONASS	Proporciona navegación precisa y transmisión de telemetría para la operación de UAVs en misiones autónomas.	
Cargador balanceador imax B6AC	Permite cargar la batería LiPo 4S	
Video receptor (VRX ROTG01)	Usado para recibir en tiempo real el video emitido por el transmisor.	
Antena Foxxer Lollipop	Permite la comunicación entre transmisor y receptor.	
Lenovo IdeaPad L340	Realiza el procesamiento computacional de imágenes y la comunicación de datos hacia la base de datos.	
Video transmisor (VTX 801)	Utilizado para transmitir en tiempo real el video emitido por la cámara.	

Materiales	Descripción	Imagen
Video transmisor (VTX1200)	Transmite en tiempo real la señal de video del UAV hacia la estación en tierra.	
Cámara térmica fpv 256 4mm	Captura imágenes térmicas para detectar variaciones de temperatura en tiempo real.	
Radio control (Jumper T-pro)	Utilizado para el control del UAV.	

En la Tabla 14 se describen las herramientas de software y servicios utilizados durante el desarrollo del proyecto. Estas aplicaciones abarcan soluciones para la creación de interfaces, gestión de bases de datos, desarrollo web y sistemas de comunicación, además de plataformas destinadas al entrenamiento de modelos de inteligencia artificial y manejo de información visual. La selección de cada herramienta se realizó en función de sus capacidades técnicas y funcionalidades, las cuales contribuyen al correcto desarrollo e implementación de los procesos planteados en el proyecto.

Tabla 14. Softwares y servicios de aplicación [66].

Materiales	Descripción	Imagen
Python	Lenguaje de programación utilizado para gestionar la base de datos y desarrollar la interfaz gráfica.	
Matlab	Utilizado para la simulación y análisis de trayectorias.	
HTML	Utilizado para la estructura y diseño de páginas web.	
JavaScript	Utilizado para implementar interactividad y funcionalidades dinámicas en el sitio web.	
CSS	Utilizado para definir el estilo, la apariencia visual y el diseño de la página web.	
Mission Planner	Utilizado para programar trayectorias de vuelo mediante puntos de latitud, longitud y altitud sobre mapas.	

Materiales	Descripción	Imagen
Azure	Plataforma en la nube utilizada para implementar una máquina virtual destinada a recibir, almacenar y transmitir información.	
Visual Studio Code	Editor de código utilizado para el desarrollo y gestión de proyectos en múltiples lenguajes de programación.	

2.2 Métodos

La metodología de investigación constituye el pilar fundamental del presente trabajo, se abordará la problemática del monitoreo de incendios en el Cerro Casigana. Esta sección establece el camino a seguir, a través de una serie de operaciones y reglas preestablecidas, con el fin de alcanzar los resultados propuestos y desarrollar un sistema eficaz. Se describirán detalladamente los enfoques de investigación, las técnicas de recolección y procesamiento de datos, y los materiales a utilizar para asegurar la fiabilidad y validez de los hallazgos.

2.2.1 Modalidad de la investigación

Para el desarrollo del presente proyecto titulado “Sistema de monitoreo de incendios en el Cerro Casigana mediante UAVs para el apoyo operativo del Cuerpo de Bomberos Ambato”, se aplicarán cuatro modalidades de investigación que se complementan entre sí para alcanzar los objetivos propuestos.

Posteriormente, se desarrollará la investigación aplicada, ya que el proyecto se orienta a resolver una problemática concreta del entorno: la detección temprana de incendios forestales en el Cerro Casigana. A partir del conocimiento obtenido en la

fase documental, se propondrá una solución tecnológica basada en el uso de drones equipados con cámaras térmicas, permitiendo generar alertas oportunas para el Cuerpo de Bomberos Ambato y otros organismos de respuesta ante emergencias.

En primer lugar, se utilizará la investigación bibliográfica, que servirá como sustento teórico y técnico del proyecto. Esta modalidad permitirá recopilar, analizar y sintetizar información relevante proveniente de libros, artículos científicos, documentación técnica de fabricantes, normas internacionales y estudios previos relacionados con UAVs, cámaras térmicas, sensores, sistemas de monitoreo ambiental y plataformas IoT. Esta fase permitirá contextualizar el estado del arte y establecer los fundamentos necesarios para el diseño del sistema.

Adicionalmente, se llevará a cabo una investigación de campo, que consistirá en la recolección de datos directamente en el entorno natural del Cerro Casigana. Se realizarán vuelos de prueba, visitas técnicas y levantamientos geoespaciales para validar aspectos como la cobertura del monitoreo, el comportamiento del dron en condiciones reales, la detección efectiva de focos de calor y la operatividad del sistema ante factores ambientales.

Finalmente, se aplicará la investigación experimental, orientada a la construcción y validación de un prototipo funcional del sistema. En esta etapa se manipularán variables como la altura de vuelo del UAV, la resolución térmica, los algoritmos de detección y los protocolos de transmisión de datos. Estas pruebas permitirán analizar el rendimiento del sistema bajo condiciones controladas y reales, evaluar su eficacia y realizar los ajustes necesarios para su optimización.

Estas cuatro modalidades de investigación se articulan de manera integral para garantizar un enfoque riguroso, práctico y contextualizado, combinando el análisis teórico con la validación empírica en el entorno de aplicación real.

2.2.2 Recolección de información

Para llevar a cabo el desarrollo del sistema de monitoreo y detección temprana de incendios forestales en el Cerro Casigana, se plantea una estrategia metodológica de recolección de información basada en fuentes bibliográficas, recursos digitales y observaciones de campo. Esta planificación contempla el uso de UAVs equipados con sensores, el análisis de documentación técnica, y la recopilación de datos experimentales durante las fases del proyecto. La estructura de este proceso se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15. Recolección de Información.

Criterio	Descripción
¿Para qué?	Para desarrollar un sistema de monitoreo y detección temprana de incendios forestales en el Cerro Casigana mediante el uso de UAVs.
¿De qué personas u objetos?	De sensores instalados en drones (como cámaras térmicas y GPS), del entorno natural del Cerro Casigana, y de fuentes bibliográficas sobre tecnología UAV, incendios forestales y monitoreo ambiental.
¿Cómo?	Mediante vuelos experimentales con UAVs para captar datos en tiempo real, observaciones directas en campo y análisis documental de investigaciones previas.
¿Con qué?	Con drones equipados con cámaras térmicas, sensores de geolocalización, software de adquisición de datos, estación base de monitoreo y fuentes de información secundaria como libros, artículos científicos y proyectos académicos.
¿Cuándo?	Durante la fase inicial del proyecto, en la etapa de diseño y pruebas experimentales del sistema.
¿Dónde?	En el Cerro Casigana para los vuelos de prueba y recolección directa; y de manera digital desde bases de datos, bibliotecas virtuales y repositorios académicos.

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos se desarrollará mediante las siguientes etapas, orientadas a transformar la información recopilada en conocimiento útil para el monitoreo y respuesta ante incendios:

- Recolección de datos térmicos, coordenadas GPS y telemetría durante los vuelos de monitoreo realizados por los UAVs sobre el Cerro Casigana.
- Preprocesamiento de datos para garantizar precisión en las lecturas de temperatura y geolocalización.
- Almacenamiento de la información en bases de datos estructuradas, compatibles con los módulos de análisis y visualización del sistema.
- Aplicación de algoritmos para la detección de focos de calor y generación de alertas georreferenciadas en tiempo real.
- Integración de los resultados con componentes de Internet de las Cosas (IoT) y pruebas funcionales del sistema para validar la arquitectura propuesta.
- Visualización de los datos procesados mediante una interfaz web dinámica, con mapas térmicos, indicadores gráficos y alertas accesibles para el Cuerpo de Bomberos.
- Registro y respaldo de la información procesada para futuras evaluaciones, seguimiento de eventos y mejoras del sistema de monitoreo.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo de la propuesta

Para el desarrollo del sistema de monitoreo de incendios en el Cerro Casigana mediante UAVs, se plantea una serie de actividades enfocadas en el diseño, implementación y validación de una solución tecnológica que permita la detección temprana de focos de calor y la emisión de alertas en tiempo real. Este sistema busca apoyar las operaciones del Cuerpo de Bomberos mediante la integración de tecnologías como cámaras térmicas, geolocalización, UAVs e interfaz web. A continuación, se detallan las actividades propuestas para alcanzar los objetivos específicos:

- Evaluación de sistemas actuales de monitoreo de incendios forestales que emplean UAVs, analizando sus ventajas, limitaciones y aplicabilidad al contexto del Cerro Casigana.
- Identificar las condiciones topográficas y ambientales del Cerro Casigana para determinar los requisitos técnicos y operativos del sistema.
- Selección de los UAVs, cámaras térmicas y módulos GPS adecuados para la captura precisa de datos en tiempo real.
- Diseño de la arquitectura del sistema de monitoreo, incluyendo los módulos de captura, procesamiento, transmisión y visualización de datos.
- Determinar los algoritmos para la detección de focos de calor, georreferenciación y generación de alertas automáticas.
- Implementación de una base de datos estructurada para el almacenamiento seguro y accesible de imágenes térmicas, coordenadas geográficas y registros de vuelo.
- Diseño de una interfaz web para la visualización dinámica de mapas, gráficos de temperatura y alertas visuales/sonoras.
- Realización de pruebas de funcionamiento del sistema en escenarios controlados, evaluando la precisión de detección, la estabilidad de transmisión de datos y la facilidad de uso de la interfaz.

- Validación del funcionamiento del sistema con el apoyo del Cuerpo de Bomberos Ambato, verificando su utilidad en situaciones reales o simuladas.
- Ajustes en el sistema en base a los resultados obtenidos en pruebas y validaciones, corrigiendo errores e incorporando mejoras funcionales.
- Documentación de todo el proceso de desarrollo, pruebas y resultados, elaborando un informe final que incluya recomendaciones para futuras implementaciones o mejoras.

3.1.1 Análisis de sistemas de monitoreo de incendios con UAVs

En los últimos años, los sistemas de monitoreo de incendios forestales mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV's) han experimentado un crecimiento significativo debido al avance de tecnologías como sensores térmicos, sistemas de posicionamiento global, transmisión de datos en tiempo real y procesamiento de imágenes. Estas tecnologías permiten realizar vigilancia aérea en zonas de difícil acceso, facilitando la detección temprana de focos de incendio y mejorando la capacidad de respuesta ante emergencias ambientales.

Los UAV's se han convertido en herramientas eficientes para la gestión de riesgos naturales, especialmente en el monitoreo de incendios forestales, ya que permiten cubrir grandes extensiones de terreno en menor tiempo en comparación con los métodos tradicionales de vigilancia terrestre. Existen diferentes tipos de sistemas utilizados para la detección y monitoreo de incendios mediante UAV's, cada uno diseñado para cumplir funciones específicas dependiendo del tipo de sensor o tecnología implementada.

A continuación, se presentan los sistemas más utilizados para el monitoreo de incendios forestales mediante UAV's:

a. Sistemas de monitoreo mediante cámaras RGB

Los sistemas de monitoreo mediante cámaras RGB instaladas en UAV's permiten capturar imágenes y video del área monitoreada, facilitando la identificación de indicios de incendios forestales como presencia de humo, cambios en la vegetación o zonas afectadas por el fuego. Estas cámaras funcionan captando luz en el espectro visible a través de los canales rojo, verde y azul, generando imágenes similares a la visión humana. Diversos estudios señalan que este tipo de cámaras es ampliamente utilizado en drones debido a su bajo peso, bajo consumo energético y facilidad de integración con sistemas de procesamiento de imágenes. Además, mediante técnicas de visión por computadora como en la Figura 27, es posible analizar automáticamente las imágenes capturadas para detectar señales tempranas de incendios forestales [67].

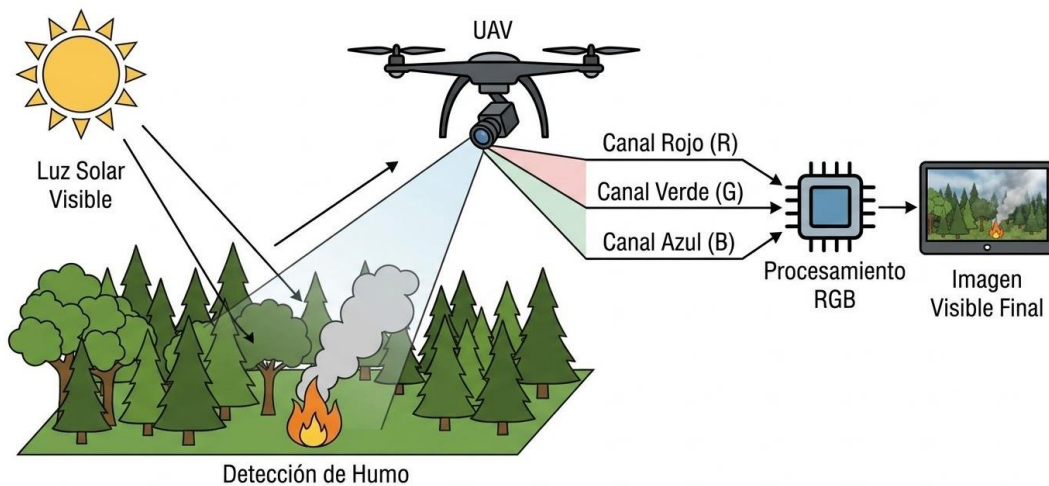


Figura 27. Diseño de un sistema de monitoreo RGB.

b. Sistemas de posicionamiento y navegación

Los sistemas de posicionamiento y navegación permiten que los UAV's realicen misiones de monitoreo de manera precisa mediante el uso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y sensores de navegación. Estas tecnologías permiten conocer la ubicación del dron en tiempo real y mantener una trayectoria estable durante el vuelo. En aplicaciones de monitoreo ambiental se utilizan softwares como Mission Planner, que permiten programar rutas de vuelo mediante puntos de navegación sobre mapas digitales. En la Figura 28, el UAV puede recorrer zonas específicas de interés

de forma autónoma, optimizando el monitoreo del área y facilitando la obtención de datos georreferenciados [68].

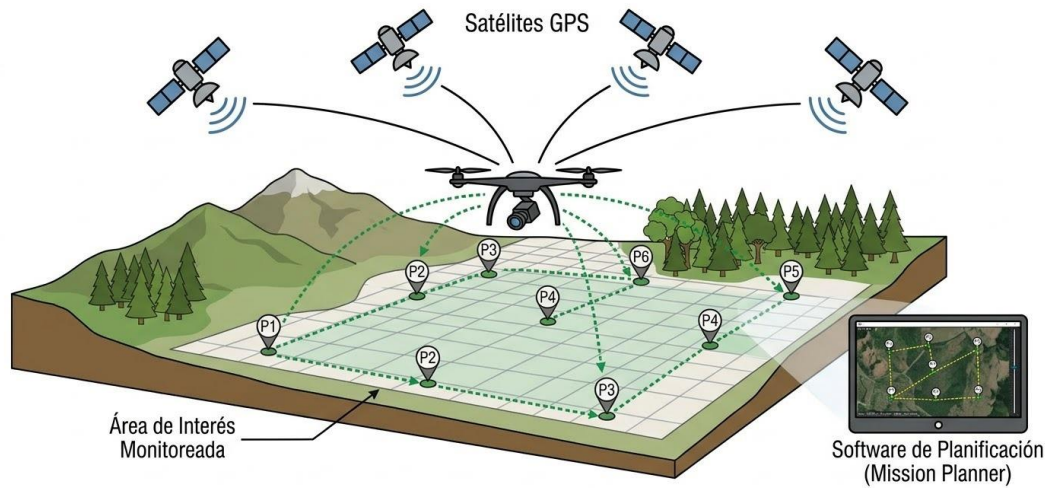


Figura 28. Sistemas de posicionamiento y navegación.

c. Sistemas de detección térmica

Los sistemas de detección térmica son una de las tecnologías más utilizadas para el monitoreo de incendios forestales mediante UAV's, ya que permiten detectar diferencias de temperatura en el entorno mediante sensores infrarrojos. Estas cámaras captan la radiación térmica emitida por los objetos y generan imágenes que muestran variaciones de temperatura mediante escalas de colores o grises. Este tipo de tecnología permite identificar focos de calor incluso en condiciones de baja visibilidad, presencia de humo o durante la noche como se presenta en la Figura 29. Sensores térmicos compactos como el MLX90640 permiten generar mapas térmicos del terreno y detectar anomalías de temperatura asociadas a posibles incendios [67].

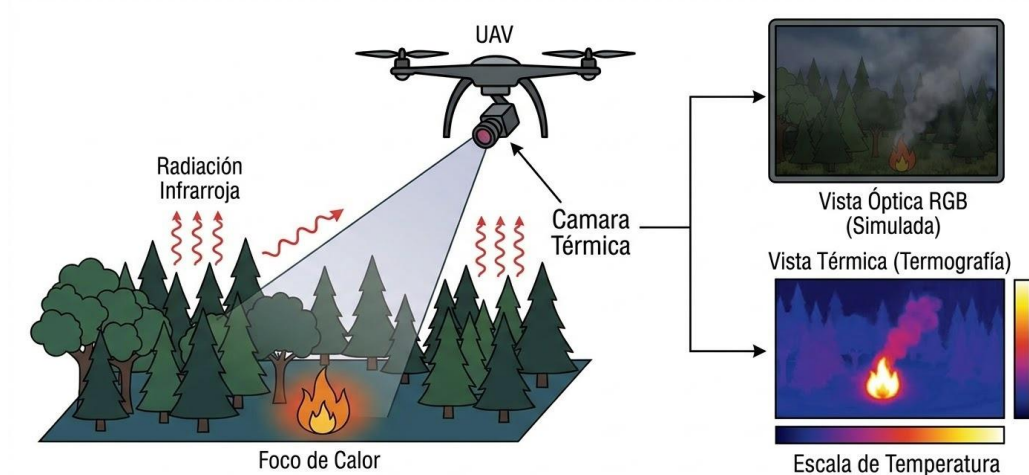


Figura 29. Detección térmica.

d. Sistemas de monitoreo mediante sensores ambientales

Los sensores ambientales integrados en UAV's permiten medir variables meteorológicas que influyen en la ocurrencia y propagación de incendios forestales, como temperatura ambiente, humedad relativa o velocidad del viento. Estos datos permiten evaluar las condiciones del entorno y determinar el nivel de riesgo de incendio en determinadas zonas. La recopilación de esta información contribuye a mejorar los sistemas de prevención y alerta temprana. Además, los datos pueden ser transmitidos o almacenados para su análisis posterior, complementando la información obtenida por cámaras visuales y sensores térmicos como se muestra en la Figura 30 [58].

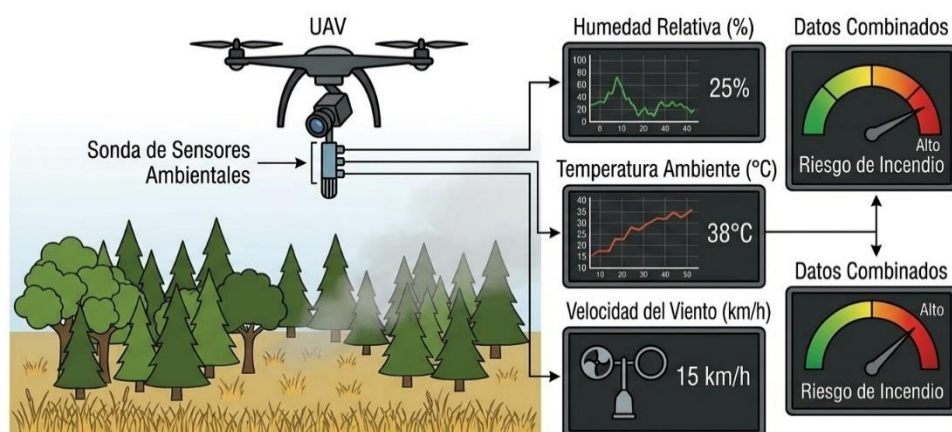


Figura 30. Monitoreo ambiental.

e. Sistemas de comunicación y transmisión de datos

Los sistemas de comunicación permiten transmitir en tiempo real la información capturada por los sensores del UAV hacia una estación de control terrestre. Entre los datos transmitidos se encuentran imágenes, video, información térmica, coordenadas GPS y parámetros de vuelo del dron. Estos sistemas utilizan enlaces de comunicación inalámbrica basados en radiofrecuencia o transmisión digital, permitiendo mantener la conexión entre el UAV y el operador. En la Figura 31, se muestra la transmisión de datos en tiempo real es fundamental para detectar posibles incendios y facilitar una respuesta rápida por parte de los equipos de emergencia [69].



Figura 31. Sistema de comunicación.

3.1.2 Caracterización del entorno del Cerro Casigana

El Cerro Casigana constituye un enclave geográfico estratégico al sur del área urbana de Ambato, provincia de Tungurahua. Su relevancia radica no solo en su función como mirador natural y espacio recreativo, sino en su complejidad biofísica, la cual demanda estrategias de vigilancia tecnológicamente avanzadas.

a. Ubicación y Contexto Geográfico

Geográficamente en la Figura 32, el área de estudio se circunscribe a las coordenadas aproximadas 1°15' S y 78°38' O, con una cota máxima de 2 900 m s.n.m. Esta altitud influye directamente en la densidad del aire y el rendimiento de los sistemas de

propulsión de los UAV, factor crítico para la planificación de misiones de monitoreo. Su proximidad a zonas densamente pobladas incrementa la vulnerabilidad de la interfaz urbano-forestal ante eventos ígneos [69].



Figura 32. Cerro Casigana.

b. Análisis Topográfico y Accesibilidad

Desde la perspectiva geomorfológica, el Casigana presenta una topografía accidentada con pendientes que exceden el 25 % de inclinación. Técnicamente, estas pendientes generan un "efecto chimenea" que acelera la propagación del fuego ladera arriba. Además, la irregularidad del terreno impone limitaciones severas al despliegue de brigadas terrestres y reduce la línea de visión (LOS) para sistemas de vigilancia fijos. En este escenario, el uso de UAV permite una superación de los obstáculos orográficos, garantizando una cobertura de puntos ciegos mediante una perspectiva cenital y oblicua sin riesgo para el personal humano [70].

c. Dinámica Climática

El régimen climático de la zona es templado interandino, con temperaturas que fluctúan entre los 12 °C y 18 °C. No obstante, el factor determinante para la gestión de riesgos es el marcado déficit hídrico entre los meses de junio y septiembre, donde la precipitación desciende por debajo de los promedios mensuales de 50 mm. Durante este periodo, la combinación de baja humedad relativa, alta radiación solar y vientos constantes actúa como un catalizador para la deshidratación del material vegetal, reduciendo su temperatura de ignición y aumentando la carga combustible disponible [71].

d. Caracterización de la Cobertura Vegetal y Combustible Forestal

La flora del cerro se categoriza principalmente como vegetación arbustiva y herbácea de tipo xerofítica, junto con rodales de especies introducidas (*Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*). Bajo un enfoque técnico de incendios, estas especies se clasifican como combustibles finos y medios, caracterizados por una alta relación superficie-volumen, lo que facilita una combustión rápida y una propagación intensa. La detección temprana mediante sensores térmicos es vital en este tipo de vegetación, ya que permite identificar anomalías térmicas en el subsuelo o entre el matorral antes de que el incendio sea visible mediante cámaras RGB convencionales [72].

e. Factores de Riesgo en la Comunicación de Telemetría y Control

El despliegue de sistemas aéreos no tripulados (UAV) para el monitoreo de incendios forestales en entornos periurbanos, como el Cerro Casigana, enfrenta desafíos críticos relacionados con la integridad del enlace de datos. La estabilidad de la comunicación en las bandas de 2.4 GHz (control) y 5.8 GHz (telemetría de video) se ve condicionada por la infraestructura preexistente, la cual introduce variables de riesgo que pueden derivar en la pérdida de la aeronave o la degradación del flujo de datos en tiempo real [73]. A continuación, se analizan los cuatro factores físicos predominantes en la zona de estudio:

- **Infraestructura de Hormigón Armado y Acero**

Los postes de concreto utilizados en la red eléctrica ecuatoriana (norma CNEC) no actúan únicamente como obstáculos físicos, sino como elementos de atenuación y difracción como se muestra en la Figura 33. Al poseer un núcleo de refuerzo de acero, estos postes se comportan como blindajes parciales que pueden obstruir la Primera Zona de Fresnel. En misiones autónomas, si la trayectoria de vuelo posiciona al UAV detrás de estas estructuras respecto a la estación base, se producen fenómenos de multitrayectoria (multipath) que desestabilizan el enlace de 5.8 GHz, caracterizado por su baja capacidad de penetración [74].



Figura 33. Postes de concreto utilizados en la red eléctrica.

- **Saturación por Nodos de Telecomunicaciones de Gran Escala**

Las torres de celosía que operan como estaciones base de telefonía y enlaces de microondas como se muestra en la Figura 34 representan la mayor fuente de ruido electromagnético. Aunque operen en bandas distintas, la elevada potencia de transmisión de estas estructuras genera una saturación en los receptores del UAV (Front-end saturation). Este fenómeno eleva el "piso de ruido" (noise floor), reduciendo drásticamente la relación señal-ruido (SNR). Como se evidenció en las pruebas de campo, la proximidad a estos nodos incrementa exponencialmente el riesgo

de pérdida de sincronismo en la telemetría RGB y térmica, críticos para la detección de incendios [75].



Figura 34. Torres de celosía.

- **Interferencia por Radiación de Líneas de Media y Alta Tensión**

En la Figura 35, si bien la frecuencia fundamental de la red eléctrica en Ecuador es de 60 Hz, la presencia de líneas de media tensión (13.8 kV) introduce riesgos indirectos. El ruido de radiofrecuencia generado por posibles arcos eléctricos o el efecto corona en aisladores defectuosos puede inducir interferencias en los componentes electrónicos sensibles del dron. Además, la interacción entre los campos magnéticos de las líneas de potencia y los sistemas de navegación (magnetómetro) del UAV puede provocar derivas en el vuelo autónomo, comprometiendo la precisión de las coordenadas GPS durante la captura de imágenes térmicas [74].



Figura 35. Líneas de Media y Alta Tensión.

- **Interferencia Electromagnética en Enlaces mediante Antenas sectoriales**

La operación en las cercanías de infraestructura de telecomunicaciones equipada con antenas sectoriales, como se visualiza en la Figura 36, representa un riesgo crítico para la integridad del enlace de datos en la banda de 5.8 GHz. Debido a que estas antenas proyectan un haz de alta potencia con una apertura de entre 60° y 120°, pueden generar una saturación en el receptor del sistema aéreo no tripulado (UAS), elevando drásticamente el piso de ruido y reduciendo la relación señal-ruido (SNR). Para una misión que requiere la transmisión de datos de alta sensibilidad, como el flujo de video de una cámara térmica, esta interferencia puede manifestarse en una degradación severa de la imagen, aumento de la latencia o la pérdida total del control de telemetría. Por tanto, es imperativo establecer zonas de exclusión física y realizar una gestión manual de canales para mitigar el impacto de estas emisiones en el espectro compartido [76].



Figura 36. Antenas sectoriales.

3.1.3 Requerimientos del sistema de monitoreo

A partir del análisis de los sistemas existentes y la caracterización del entorno del Cerro Casigana, se establecen los requerimientos técnicos y operativos que debe cumplir el sistema de monitoreo propuesto. Estos requerimientos responden a las necesidades reales del Cuerpo de Bomberos Ambato y a las condiciones particulares del área de estudio.

a. Requerimientos operativos

Los requerimientos operativos del sistema de monitoreo establecen las condiciones bajo las cuales la solución tecnológica debe funcionar para apoyar de manera efectiva la detección temprana de incendios forestales en el Cerro Casigana. Estos requerimientos se enfocan en la Figura 37, en definir aspectos relacionados con la cobertura geográfica del monitoreo, la frecuencia de operación del sistema, el tiempo de respuesta ante posibles alertas y la facilidad de uso por parte del personal del Cuerpo de Bomberos Ambato. La definición de estos parámetros permite garantizar que el sistema se adapte a las necesidades reales de vigilancia del área y que su implementación contribuya a mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias forestales.

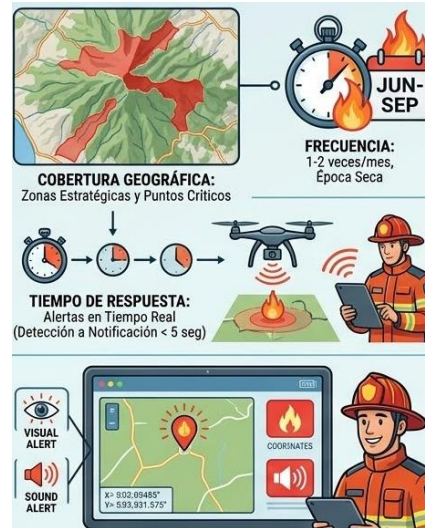


Figura 37. Requerimientos operativos.

b. Cobertura geográfica

El sistema debe enfocar su monitoreo en zonas estratégicas del Cerro Casigana identificadas como de alto riesgo por el Cuerpo de Bomberos Ambato. De acuerdo con información proporcionada por la institución, existen al menos dos puntos críticos en el cerro donde históricamente se han registrado incendios forestales con mayor frecuencia y donde las condiciones topográficas y de vegetación favorecen la propagación del fuego. Estos puntos corresponden a áreas de fácil acceso para visitantes y con presencia de material combustible seco durante las épocas de estiaje. Por lo tanto, no se requiere cubrir la totalidad del cerro en esta fase del proyecto, sino focalizar las operaciones de monitoreo en estos sectores prioritarios, lo que optimiza los recursos y el tiempo de vuelo disponible.

c. Frecuencia de monitoreo

Considerando la estacionalidad de los incendios forestales en la región andina, particularmente en la provincia de Tungurahua donde los meses críticos comprenden junio a septiembre, se establece una frecuencia de monitoreo de una a dos veces por mes. Esta periodicidad permite realizar seguimiento a las condiciones térmicas y de vegetación en los puntos críticos durante la época seca, sin generar una carga operativa excesiva para el personal del Cuerpo de Bomberos. Durante los meses de mayor riesgo,

podrían programarse vuelos adicionales según la evaluación de condiciones climáticas o alertas previas.

d. Tiempo de respuesta ante alertas

El sistema debe ser capaz de generar alertas en tiempo real, es decir, en el mismo instante en que se detecta una anomalía térmica que pueda corresponder a un foco de incendio. Dado que el objetivo es apoyar las labores del Cuerpo de Bomberos, la información debe estar disponible de forma inmediata para que los equipos de respuesta puedan activarse sin demora. En términos prácticos, se busca que el tiempo transcurrido entre la detección del foco de calor por parte del sensor y la notificación en la interfaz web sea inferior a 5 segundos, considerando las condiciones de transmisión y procesamiento.

e. Capacitación y usabilidad

Actualmente, el Cuerpo de Bomberos Ambato no dispone de sistemas tecnológicos específicos para el monitoreo de incendios forestales, más allá de las capacitaciones teóricas sobre manejo y respuesta ante este tipo de eventos. Por lo tanto, el sistema debe ser diseñado con una interfaz intuitiva y de fácil comprensión, que no requiera conocimientos técnicos avanzados para su operación. La visualización de alertas debe ser clara, mediante indicadores visuales y sonoros que permitan a los bomberos identificar rápidamente la ubicación del posible incendio y las condiciones térmicas del área afectada.

f. Requerimientos técnicos

Los requerimientos técnicos del sistema de monitoreo determinan las características y especificaciones tecnológicas necesarias para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable durante las operaciones de vigilancia del Cerro Casigana. En la Figura 38, incluyen aspectos relacionados con la precisión en la detección térmica de posibles focos de incendio, la georreferenciación de las alertas detectadas, la transmisión de datos en tiempo real hacia la estación de control y la visualización integrada de información térmica y visual. Asimismo, se consideran parámetros asociados a la autonomía de vuelo y la capacidad de carga del UAV, elementos fundamentales para

asegurar que el sistema pueda operar adecuadamente en un entorno montañoso y cumplir con las tareas de monitoreo establecidas



Figura 38. Requerimientos técnicos.

g. Precisión en la detección térmica

El sistema debe ser capaz de detectar variaciones de temperatura en el rango esperado para incendios incipientes, considerando que los focos de calor pueden presentar temperaturas superiores a $50\text{--}60^\circ\text{C}$ en etapas iniciales, mientras que el entorno del cerro en condiciones normales oscila entre 12°C y 25°C . Se requiere una precisión de al menos $\pm 2^\circ\text{C}$ en las mediciones para diferenciar entre falsos positivos (como superficies calentadas por el sol) y verdaderos focos de incendio.

h. Georreferenciación de alertas

Cada detección de anomalía térmica debe ir acompañada de coordenadas geográficas precisas (latitud, longitud) que permitan al Cuerpo de Bomberos localizar el punto exacto del posible incendio. Para ello, el sistema debe integrar un módulo GPS con precisión submétrica (error inferior a 2 metros) y capacidad de operar en entornos montañosos donde la recepción satelital puede verse afectada.

i. Transmisión de datos en tiempo real

Los datos capturados por el sensor térmico (temperaturas y coordenadas) deben ser transmitidos desde el UAV hacia la estación en tierra y posteriormente a la interfaz web sin interrupciones. El sistema de comunicación debe operar en bandas de frecuencia autorizadas por la normativa ecuatoriana (como 2.4 GHz o 5.8 GHz) y garantizar un alcance mínimo de 500 metros en condiciones de línea de vista, considerando las distancias de operación en el Cerro Casigana.

j. Visualización dual (RGB y térmica)

La interfaz web debe permitir visualizar simultáneamente la transmisión de video proveniente de la cámara RGB (para verificación visual del entorno) y los datos térmicos procesados (mapas de calor, gráficos de temperatura). Esta funcionalidad facilita a los bomberos contrastar la información térmica con la imagen real del terreno, mejorando la toma de decisiones.

k. Autonomía y peso del UAV

Considerando que el UAV debe transportar los sensores, cámara, microcontrolador y sistema de transmisión, se requiere que la plataforma aérea tenga capacidad de carga útil suficiente para soportar al menos 500 gramos adicionales a su peso base, manteniendo una autonomía de vuelo mínima de 10 minutos para cubrir los puntos críticos identificados.

3.1.4 Selección de tecnologías para el sistema

A partir de los requerimientos establecidos y considerando los recursos disponibles, los cuales fueron facilitados por el tutor de investigación, así como las limitaciones presupuestarias del proyecto, se procede a justificar la selección de cada componente tecnológico del sistema.

a. Plataforma UAV (Dron)

Se seleccionó el cuadricóptero armable tipo SpeedyBee F405 V3, el cual fue facilitado por el tutor de investigación, como se visualiza en la Figura 39, cuyas características técnicas incluyen:

- Controlador de vuelo compatible con firmware Betaflight y Ardupilot.
- Estructura en fibra de carbono y PLA, ofreciendo rigidez y peso reducido.
- Capacidad para operar con baterías LiPo de 3S a 5S (11.1 V a 18.5 V).
- Dimensiones compactas (135×165×40 mm) y peso aproximado de 600 g.
- Velocidad máxima de 20 km/h y altura de vuelo máxima de 120 m.

Este dron permite la personalización necesaria para integrar los sensores requeridos, a diferencia de los drones comerciales que presentan limitaciones de hardware y software. Además, su compatibilidad con Mission Planner facilita la programación de rutas autónomas sobre los puntos críticos del Cerro Casigana.



Figura 39. Cuadricóptero armable tipo SpeedyBee F405 V3.

b. Sensor térmico

En la Figura 40, Para la fase de pruebas iniciales se seleccionó el sensor MLX90640, cuyas características principales son:

- Matriz de 32×24 píxeles (768 puntos de medición).
- Rango de medición: -40 °C a 300 °C.

- Precisión típica: ± 1 °C en condiciones controladas.
- Comunicación mediante protocolo I²C.
- Bajo consumo energético y tamaño compacto.

Reconociendo las limitaciones de este sensor para la detección de incendios en áreas extensas, se ha gestionado la adquisición de una cámara térmica FPV de 256×192 píxeles con lente de 4 mm, que proporcionará mayor resolución espacial y capacidad de detección. Esta cámara térmica, una vez recibida, constituirá el sensor principal del sistema.



Figura 40. Sensor MLX90640.

c. Cámara FPV analógica

Se utiliza una cámara analógica FPV RunCam Micro Swift de 5.8 GHz, como se visualiza en la Figura 41, como fuente de video en espectro visible, complementada con un sistema de transmisión FPV que incluye:

- **Video transmisor (VTX):** Modelo Eachine TX801 o TX1200, que operan en la banda de 5.8 GHz con potencias de salida configurables (hasta 600 mW) y alcance de hasta 3 km en condiciones óptimas.
- **Video receptor (VRX):** Modelo Eachine ROTG01, con capacidad de recepción en 5.8 GHz y 150 canales, sensibilidad de -90 dBm.
- **Antena Foxxer Lollipop 5.8 GHz:** Mejora la calidad del enlace y reduce interferencias [77].

La selección de la banda de 5.8 GHz se fundamenta en la normativa ecuatoriana que la clasifica como banda ICM no licenciada, y en la necesidad de evitar interferencias con el sistema de control del UAV que opera en 2.4 GHz [77].



Figura 41. Cámara analógica FPV RunCam Micro Swift de 5.8 GHz.

d. Sistema de posicionamiento y navegación

Se seleccionó el módulo GPS TBS M8.2 GLONASS, Figura 42, cuyas características incluyen:

- Compatibilidad con sistemas GPS, GLONASS y SBAS.
- 72 canales de recepción.
- Sensibilidad de seguimiento: -164 dBm.
- Protocolos de datos NMEA y UBX.
- Voltaje de operación: 3.3 V a 5.0 V.
- Peso reducido de 5.2 g.

Este módulo proporciona la precisión necesaria para georreferenciar los focos de calor detectados y permite la ejecución de misiones autónomas programadas en Mission Planner [17].



Figura 42. GPS TBS M8.2 GLONASS.

e. Microcontrolador y procesamiento embebido

Se emplea el microcontrolador ESP32, Figura 43, para la lectura del sensor MLX90640 y transmisión de datos térmicos. Sus ventajas incluyen:

- Procesador dual-core de 32 bits.
- Conectividad WiFi y Bluetooth integrada.
- Múltiples interfaces de comunicación (I²C, SPI, UART).
- Bajo consumo energético (aproximadamente 40 g de peso).
- Amplio soporte de librerías y comunidad de desarrollo.

Este microcontrolador permite enviar los datos térmicos procesados hacia la estación en tierra (laptop Lenovo IdeaPad L340) para su visualización en la interfaz web.



Figura 43. microcontrolador ESP32.

f. Sistema de alimentación

En la Figura 44, se utiliza una batería LiPo 4S de 14.8 V (1550 mAh, 100C) como fuente de energía del UAV, complementada con un cargador balanceador Imax B6AC que garantiza la carga segura y prolonga la vida útil de las baterías mediante balanceo de celdas.



Figura 44. Batería LiPo 4S de 14.8 V (1550 mAh, 100C).

g. Estación en tierra y procesamiento

La laptop Lenovo IdeaPad L340 (Intel Core i7-8565U, 8 GB RAM, 1.36 TB almacenamiento) constituye la estación de procesamiento donde se ejecutan los algoritmos de detección, visualización y comunicación con la base de datos [78].

h. Software y herramientas de desarrollo

El sistema integra múltiples herramientas de software:

- Mission Planner: Configuración de vuelos autónomos y monitoreo de telemetría.
- Arduino IDE: Programación del ESP32 para lectura del sensor MLX90640.
- Python: Desarrollo de scripts de procesamiento de datos.
- HTML/CSS/JavaScript/PHP: Construcción de la interfaz web de monitoreo.
- MySQL: Almacenamiento estructurado de datos (temperaturas, coordenadas, timestamps).
- Visual Studio Code: Entorno integrado de desarrollo.
- Matlab: Simulaciones de trayectorias y análisis complementarios.
- Roboflow: Preparación de datasets para futuras implementaciones de detección con IA.
- Microsoft Azure: Plataforma en la nube planificada para almacenamiento histórico y escalabilidad.

i. Control remoto

Se utiliza el radio control Jumper T-pro con protocolo ExpressLRS, que ofrece:

- 16 canales de control.
- Alcance superior a 2 km (según módulo ELRS).
- Compatibilidad con receptores de baja latencia.
- Operación en bandas de frecuencia autorizadas (2.4 GHz).

3.1.5 Esquema general del sistema

El sistema inicial se realizó con el sensor térmico MLX6xxx y cámara RGB mediante la comunicación inalámbrica Wifi para el sensor y para la cámara RGB por 5.8GHz, pero en base a pruebas físicas realizadas el alcance de comunicación del sensor con la interfaz web por medio del wifi fue a un alcance de 10 m como máximo y por la velocidad del dron su comunicación fue ineficiente, en base a la cámara su comunicación fue de largo alcance pero su calidad de imagen fueron baas, por ende, el sistema de monitoreo de incendios queda de la siguiente estructura en tres etapas principales: adquisición y transmisión de video, recepción y procesamiento de la información, y visualización y gestión de datos, como se muestra en la Figura 45. Estas etapas permiten la captura, transferencia, análisis y almacenamiento de la información obtenida mediante la cámara térmica FPV instalada en el UAV.

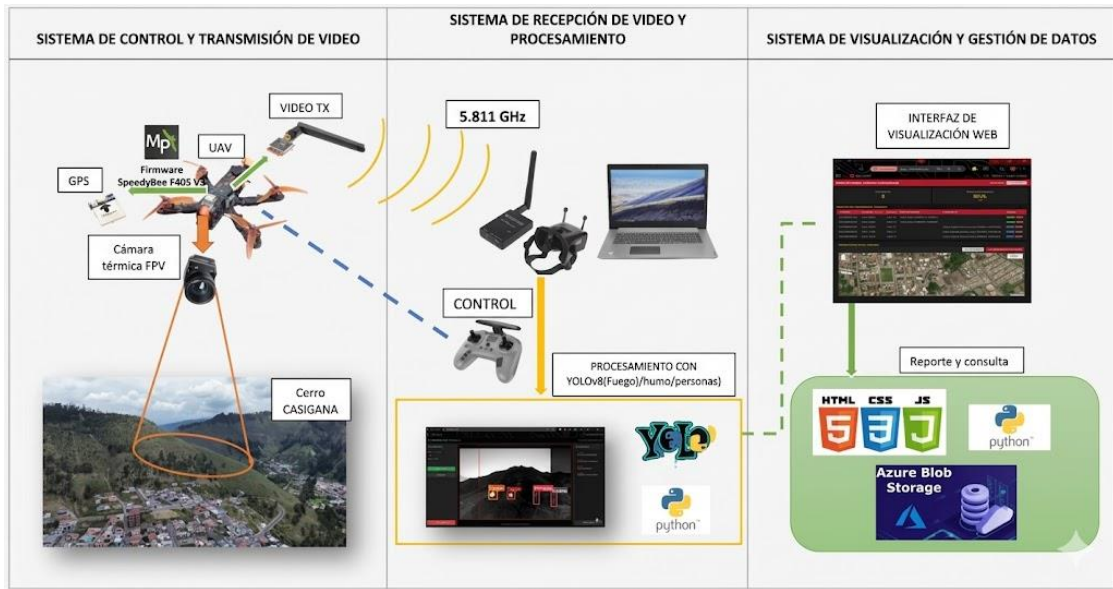


Figura 45. Esquema general del sistema de monitoreo mediante UAV.

En la primera etapa, la cámara térmica FPV captura el video en tiempo real, el cual es enviado a un transmisor de video (Video TX) que opera a 5.811 MHz, permitiendo su envío hacia la estación terrestre mediante radiofrecuencia. El UAV cuenta con una controladora de vuelo configurada en Mission Planner (SpeedyBee F405 V3) y un módulo GPS para georreferenciación. El control del dron se realiza mediante radio control.

En la segunda etapa, la señal es recibida por un receptor tipo ROTG01, que convierte el video analógico a digital para su procesamiento en un computador. Se emplea el modelo YOLOv8 para la detección de posibles indicios de fuego y humo. Los datos obtenidos, junto con la imagen y ubicación, son enviados a una base de datos.

En la tercera etapa, la información de los reportes generados es enviada desde la interfaz web hacia una base de datos MySQL alojada en Azure, donde se almacena y organiza para su análisis. A partir de estos datos, se evalúa la trayectoria del UAV permitiendo identificar zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de incendios.

3.1.6 Diseño de conexiones electrónicas del sensor térmico MLX90640 con ESP32

En la Figura 46, representa el esquema de interconexión entre el sensor térmico MLX90640 y una placa de desarrollo ESP32, utilizando el protocolo de comunicación I2C. En este diseño, el pin SCL (reloj) del sensor se conecta al GPIO 22 (D22) de la ESP32, mientras que el pin SDA (datos) se enlaza al GPIO 21 (D21), permitiendo la transmisión bidireccional de información. Asimismo, el sensor es alimentado mediante el pin VCC conectado a 3.3V y el pin GND a tierra, garantizando un funcionamiento adecuado y seguro del sistema.

Este tipo de configuración permite la captura de datos térmicos sin contacto, facilitando su procesamiento en la ESP32 para aplicaciones como monitoreo de temperatura, visión térmica o sistemas de detección en tiempo real, siendo una solución eficiente y de bajo consumo energético para proyectos electrónicos y de investigación aplicada.

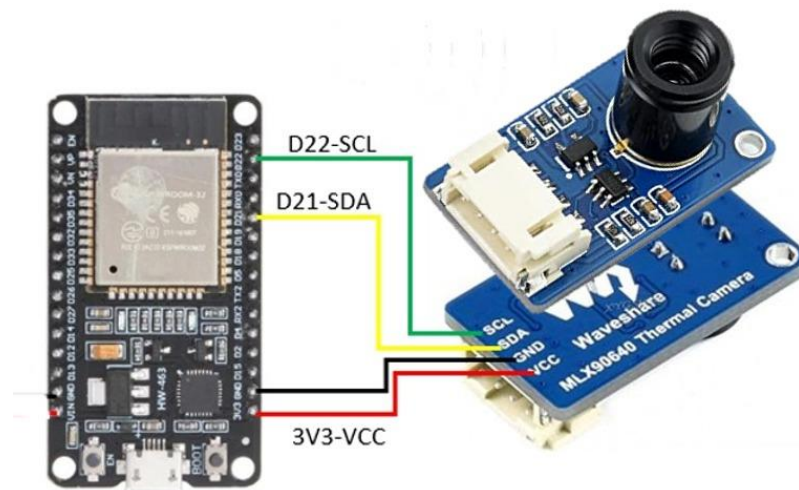


Figura 46. Diagrama de conexión Sensor MLX90640 y ESP32.

3.1.7 Diseño del sistema de transmisión de datos del sensor

El sistema de transmisión de datos del sensor térmico MLX90640 se basa en una arquitectura integrada que combina comunicación cableada y transmisión inalámbrica. Inicialmente, el sensor MLX90640 capta la información térmica del entorno en forma de matriz de datos infrarrojos, los cuales son enviados al microcontrolador ESP32 mediante el protocolo de comunicación I2C, utilizando las líneas SDA (D21) y SCL (D22). El ESP32 actúa como unidad de procesamiento central, donde recibe, interpreta y prepara los datos térmicos para su transmisión. Posteriormente, gracias a su módulo WiFi integrado, el ESP32 establece una red inalámbrica (en este caso identificada como “ESP32 TÉRMICA”) que permite la transmisión en tiempo real de la información hacia un dispositivo externo, como una computadora. Finalmente, en el equipo receptor, los datos son visualizados a través de una interfaz web desarrollada en Python, la cual permite procesar y representar las lecturas térmicas en forma de imágenes en tiempo real, facilitando el monitoreo remoto de manera eficiente, dinámica y sin necesidad de conexiones físicas adicionales como se muestra en la Figura 47.

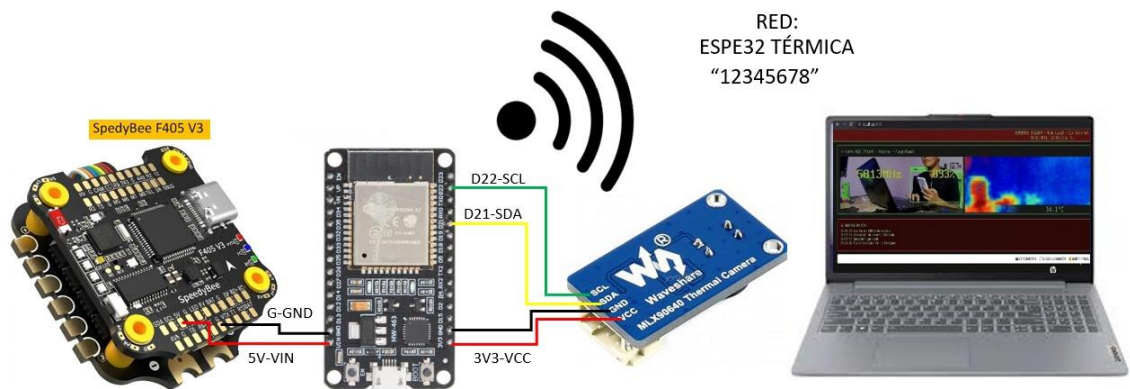


Figura 47. Sistema de transmisión de datos del sensor térmico MLX90640.

3.1.8 Diseño del sistema de captura y transmisión de video RGB

El sistema de captura y transmisión de video RGB se fundamenta en la integración de una cámara CMOS con un sistema de transmisión inalámbrica en frecuencia de 5.8 GHz. En primer lugar, la cámara RGB se encarga de capturar imágenes en tiempo real del entorno, generando una señal de video analógica que es enviada a la controladora de vuelo a través del puerto CAM-VIN. La controladora actúa como intermediaria, permitiendo la gestión y estabilización de la señal de video, la cual posteriormente es dirigida hacia el transmisor de video mediante la salida VIDEO-VTX. Este transmisor, se encarga de emitir la señal de video de forma inalámbrica en la banda de 5.8 GHz. Finalmente, la señal es recibida por un módulo receptor (RX) conectado a una computadora, donde se visualiza en tiempo real mediante una interfaz web desarrollada en Python, facilitando el monitoreo remoto continuo sin necesidad de conexiones físicas directas como se muestra en la Figura 48.

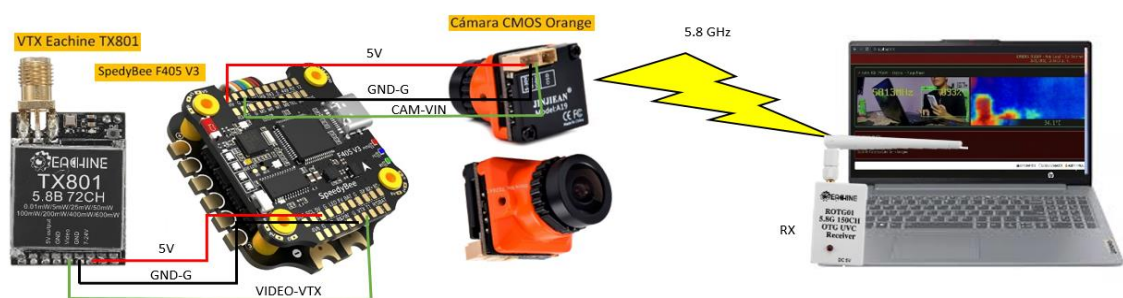


Figura 48. Sistema de captura y transmisión de video RGB.

3.1.9 Diseño del sistema de captura y transmisión de CÁMARA TÉRMICA FPV

En la Figura 49, muestra el sistema de visión que se fundamenta en una arquitectura de transmisión analógica de baja latencia y procesamiento digital en tiempo real. La captura se realiza mediante una cámara térmica FPV de 256, configurada en un gradiente de escala de grises para optimizar el contraste térmico de los focos de calor. La señal de video (CVBS) es enviada a través de un transmisor de video (VTX) de 5.8 GHz, permitiendo una recepción fluida en la estación base.

La etapa de recepción integra un receptor OTG UVC conectado a una computadora portátil, donde se despliega una interfaz web personalizada desarrollada en Python. Esta plataforma centraliza el flujo de video y ejecuta un algoritmo de inteligencia artificial basado en YOLOv8, el cual ha sido pre-entrenado para la detección específica de humo y fuego en entornos forestales. Mediante la integración de librerías especializadas en visión computacional, el sistema no solo visualiza la señal térmica, sino que analiza la vigilancia al identificar patrones de incendio sobre el video en blanco y negro, facilitando una respuesta rápida ante posibles emergencias.

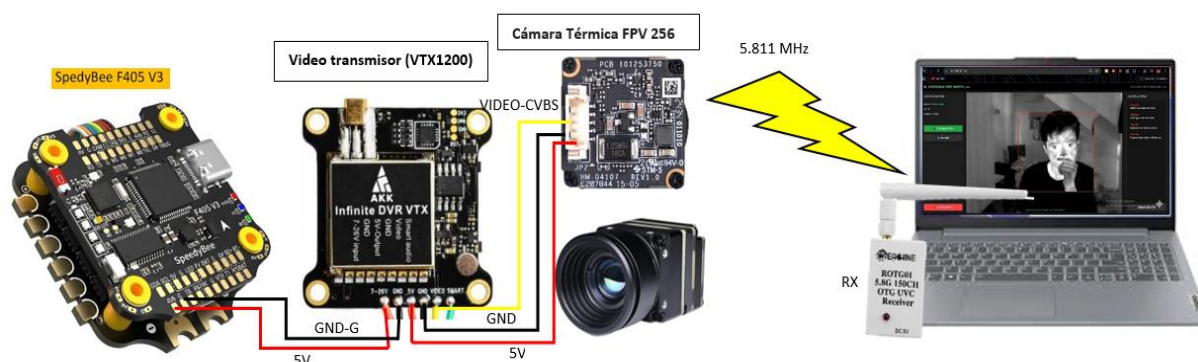


Figura 49. Sistema de captura y transmisión de CÁMARA TÉRMICA FPV.

3.1.10 Diseño de conexiones electrónicas del módulo GPS

El diseño de conexiones electrónicas del módulo GPS que se visualiza en la Figura 50 se implementa con el objetivo de habilitar el vuelo automático del sistema, ya que sin la incorporación de un GPS no es posible ejecutar misiones autónomas ni establecer rutas de navegación precisas. En este caso, se utiliza un módulo GPS TBS M8.2 GLONASS (DY-220TTL), el cual se conecta directamente a la controladora de vuelo SpeedyBee F405 V3 mediante comunicación serial (UART). Este sistema permite que la controladora reciba información en tiempo real sobre la ubicación, altitud y velocidad, facilitando funciones como navegación por waypoints, retorno automático al punto de origen y estabilidad en el vuelo, elementos fundamentales para el desarrollo de operaciones autónomas eficientes.

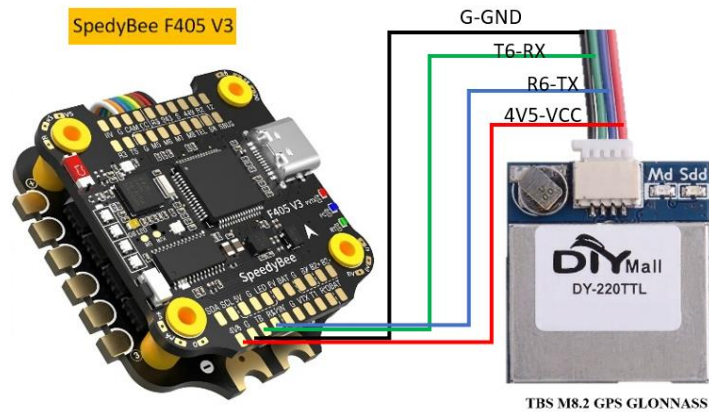


Figura 50. Conexiones electrónicas del módulo GPS.

3.1.11 Diseño de la interfaz web de monitoreo remota

La interfaz de usuario (UI) ha sido diseñada bajo un esquema de Dashboard de Control Crítico, donde la prioridad es la centralización de datos provenientes del UAV en una sola vista. La estructura se divide en módulos independientes como en la Figura 51 que permiten al operador gestionar la emergencia sin cambiar de pantalla.

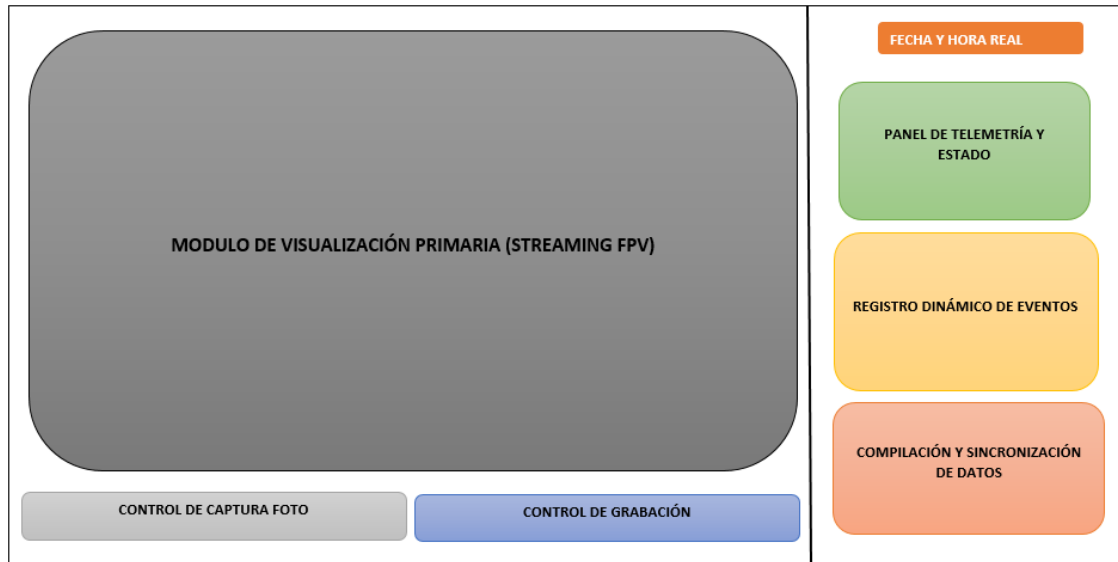


Figura 51. Esquema de la Interfaz web de monitoreo remota.

Módulo de Visualización Primaria (Streaming FPV)

Es el componente central de la arquitectura. Su función es renderizar el flujo de video térmico en tiempo real procesado por el dron.

- **Control de Captura:** Permite al operador interactuar con el flujo mediante la toma de evidencias fotográficas o el inicio de grabaciones de video ante una detección positiva de incendio [67].

Panel de Telemetría y Estado del Enlace

Ubicado en la sección lateral superior, este bloque monitorea la salud del sistema. Sus funciones principales son:

- **Estado de Conexión:** Valida la estabilidad del enlace de radiofrecuencia (5.8GHz).
- **Umbral Térmico:** Muestra la temperatura máxima detectada por la cámara del dron, permitiendo al capitán confirmar puntos de calor mediante datos numéricos.
- **Rendimiento (FPS):** Indica la fluidez de la transmisión, asegurando que la monitorización sea efectiva [67].

Registro Dinámico de Eventos (Log de Alertas)

Este módulo funciona como una bitácora automática. Registra cada vez que los algoritmos de detección identifican un riesgo en el Cerro Casigana, permitiendo al operador tener una trazabilidad de los hallazgos durante el vuelo [79].

Capa de Servicios y Respaldo (Sincronización)

Es el puente entre la operación local y la arquitectura en la nube:

- **Generador de Reportes:** Función que compila los datos de la misión en formato PDF.
- **Sincronizador de Datos:** Permite la transferencia masiva de la información local hacia Azure Blob Storage, cumpliendo con el requisito de persistencia de datos y acceso remoto global definido en la arquitectura del sistema [80].

3.1.12 Diseño de la interfaz web de visualización de los datos en Azure

Mientras que la interfaz anterior se enfoca en la operación táctica (el "ahora"), esta interfaz constituye la capa de persistencia y análisis forense del sistema. En la Figura 52 su arquitectura permite al capitán gestionar los datos almacenados en la nube tras las misiones.

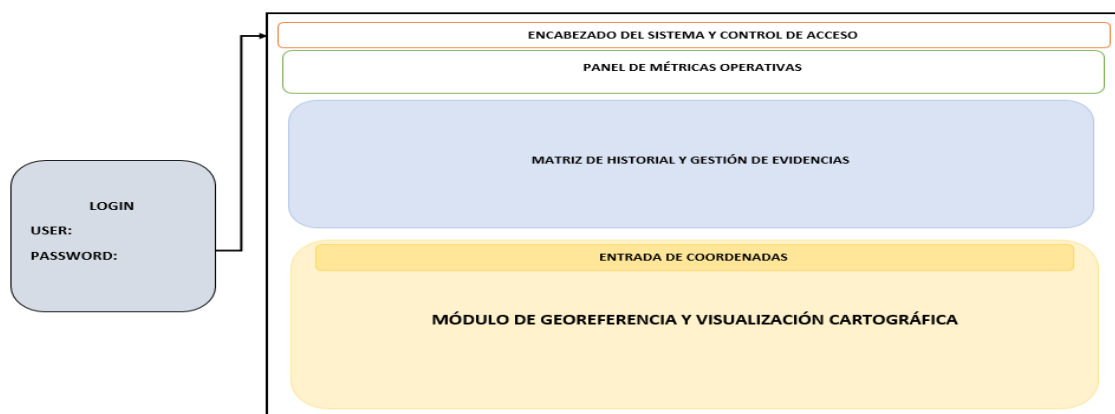


Figura 52. Esquema de la interfaz web de visualización de los datos en Azure.

Indicadores de Gestión (KPIs)

En la parte superior, la arquitectura presenta dos tarjetas de resumen de datos extraídos en tiempo real:

- **Reportes Hoy:** Contador dinámico que refleja la actividad diaria.
- **Almacenamiento Azure:** Un indicador crítico que muestra el porcentaje de uso del Blob Storage. Esto es vital en la arquitectura para prevenir la saturación del repositorio en la nube.

Matriz de Historial Térmico (Data Table)

Es el núcleo de este módulo. Estructura los metadatos de las misiones en una tabla relacional:

- **Trazabilidad:** Clasifica la información por fecha, sector del Cerro Casigana y número de dron.
- **Vinculación de Objetos:** La arquitectura conecta directamente cada fila con un archivo físico en Azure. Si hay un video (.avi) o un informe (.pdf), el sistema genera dinámicamente los botones de acción ("Ver Video" o "Ver PDF").

Módulo de Georreferenciación (Mapa de Calor/Ubicación)

En la base de la interfaz se integra un mapa interactivo.

- **Función Arquitectónica:** Permite traducir las coordenadas enviadas por el dron en una representación visual sobre el terreno.
- **Interacción:** El operador puede ingresar coordenadas manualmente o ver los marcadores de las detecciones recientes, facilitando la localización exacta de focos de incendio.

3.1.13 Estructura de la base de datos para almacenamiento

En la Figura 53, la arquitectura de datos del sistema de almacenamiento y visualización de los datos se fundamenta en un modelo de Persistencia Multimodelo. Este enfoque permite gestionar distintos tipos de datos (estructurados, no estructurados y geoespaciales) utilizando el servicio más eficiente para cada uno, optimizando así los recursos de la plataforma Microsoft Azure.

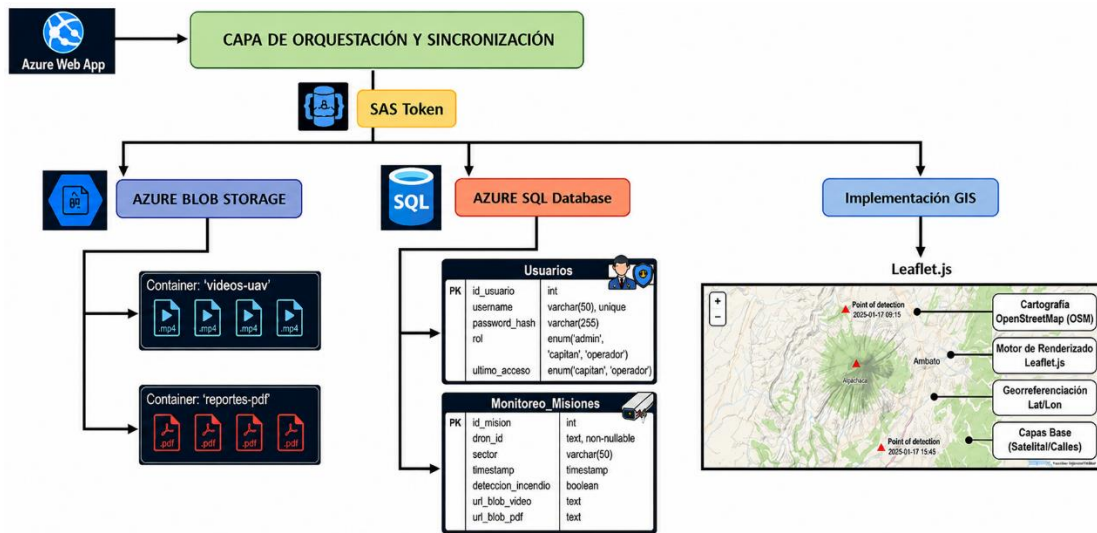


Figura 53. Arquitectura de datos del sistema de almacenamiento y visualización.

- **Capa de Orquestación y Sincronización (Middleware):** La Azure Web App desarrollada en Python/Flask actúa como el núcleo de orquestación del sistema, encargándose de la gestión de eventos y del flujo de datos entre los distintos servicios. Implementa SAS Tokens (Shared Access Signatures) para generar accesos temporales con permisos de solo lectura, garantizando la protección de la evidencia digital frente a accesos no autorizados. Además, permite la sincronización asíncrona de videos y reportes, evitando bloqueos en la interfaz durante la transferencia de archivos pesados.
- **Almacenamiento de Objetos – Azure Blob Storage:** Se utiliza Azure Blob Storage para el manejo de datos no estructurados de gran volumen, proporcionando alta escalabilidad y durabilidad de la información. El contenedor videos-uav almacena los videos capturados por el dron UAV E988, mientras que el contenedor reportes-pdf guarda la documentación técnica generada después de

cada misión. Esta separación optimiza el rendimiento del sistema y evita la saturación de la base de datos relacional.

- **Persistencia Relacional – Azure SQL Database:** Azure SQL Database administra los metadatos y registros estructurados del sistema. La tabla Usuarios controla las credenciales hasheadas y los roles de acceso, como Capitán y Operador. Por otro lado, la tabla Monitoreo_Misiones almacena las URLs asociadas a los archivos en Blob Storage, junto con estados de detección de incendios, coordenadas y marcas temporales (timestamps), permitiendo la trazabilidad completa de cada misión.
- **Implementación GIS (Sistema de Información Geográfica):** La visualización cartográfica se implementa mediante Leaflet.js y OpenStreetMap (OSM), proporcionando una solución flexible y de bajo costo. Esta capa permite la georreferenciación de los focos de calor detectados por el UAV mediante coordenadas de latitud y longitud, mostrando la ubicación exacta de los incidentes sobre el mapa de Ambato.
- **Seguridad y Control de Acceso:** La arquitectura incorpora mecanismos de seguridad basados en SAS Tokens y control de roles para proteger la información crítica del sistema. Los accesos a archivos se generan de manera temporal y restringida, mientras que las credenciales se almacenan mediante técnicas de hash, fortaleciendo la protección de los datos y la integridad de las evidencias registradas.

3.1.14 Implementación del sensor térmico MLX90640 y ESP32 en el UAV

En la implementación del sistema se realizaron las interconexiones necesarias entre el módulo transmisor de video VTX Eachine TX801, la antena Foxeer Lollipop y la controladora de vuelo SpeedyBee F405 V3. De igual manera, se estableció la conexión entre la cámara FPV y la mencionada placa, la cual también proporciona alimentación al módulo ESP32. Posteriormente, el ESP32 se enlaza con el sensor térmico MLX90640. En la Figura 54 se presenta el esquema eléctrico correspondiente al sistema integrado en el UAV.



Figura 54. Implementación del sensor térmico MLX90640 y ESP32 en el UAV.

3.1.15 Implementación del sistema de transmisión de video 5.8GHz

Para la implementación del sistema de transmisión de video en tiempo real del UAV se integraron los componentes principales: cámara FPV, transmisor VTX Eachine TX801, antena Foxeer Lollipop y la controladora de vuelo SpeedyBee F405 V3, encargados de la captura, procesamiento y transmisión de señal en frecuencia de 5.8 GHz. La cámara FPV se conectó a la controladora para enviar la señal de video al transmisor, mientras que la antena optimiza la estabilidad y alcance de comunicación hacia la estación receptora. Como se observa en la Figura 55, todos los módulos fueron montados sobre la estructura central del dron con una distribución compacta, garantizando transmisión estable de video en tiempo real para el monitoreo remoto durante las operaciones del sistema.

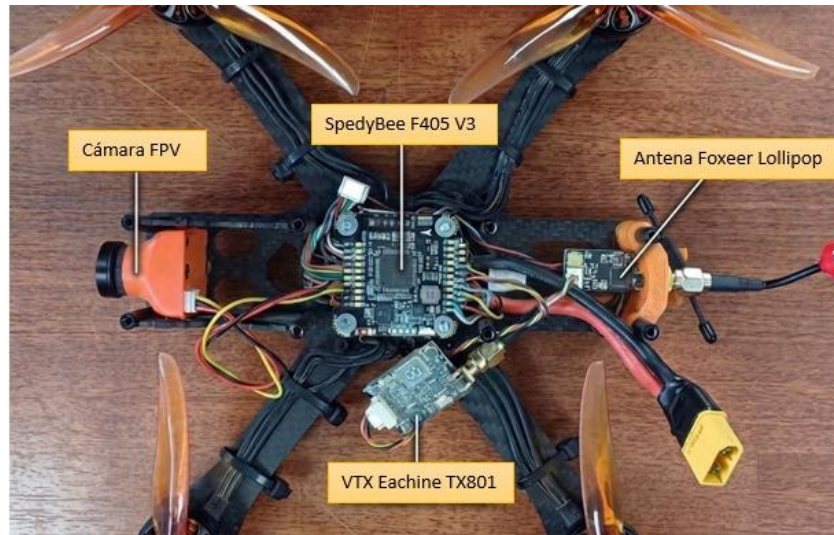


Figura 55. Implementación del sistema de transmisión de video 5.8GHz.

3.1.16 Implementación del sistema de transmisión de video CÁMARA TÉRMICA FPV

Para la implementación del sistema de transmisión de video con cámara térmica FPV se integraron los componentes principales: cámara térmica FPV, cámara FPV, transmisor de video VTX1200 y antena Foxeer, permitiendo la captura y transmisión simultánea de imágenes térmicas y visuales en tiempo real. La cámara térmica fue ubicada en la parte frontal superior del UAV para la detección de variaciones de temperatura. Asimismo, el transmisor VTX1200 y la antena Foxeer garantizan una transmisión estable y de largo alcance en frecuencia de 5.8 GHz hacia la estación receptora. Como se observa en la Figura 56, el montaje se realizó de manera compacta sobre la estructura del UAV, optimizando el campo visual, distribución de peso y estabilidad operativa durante las misiones de monitoreo y detección.

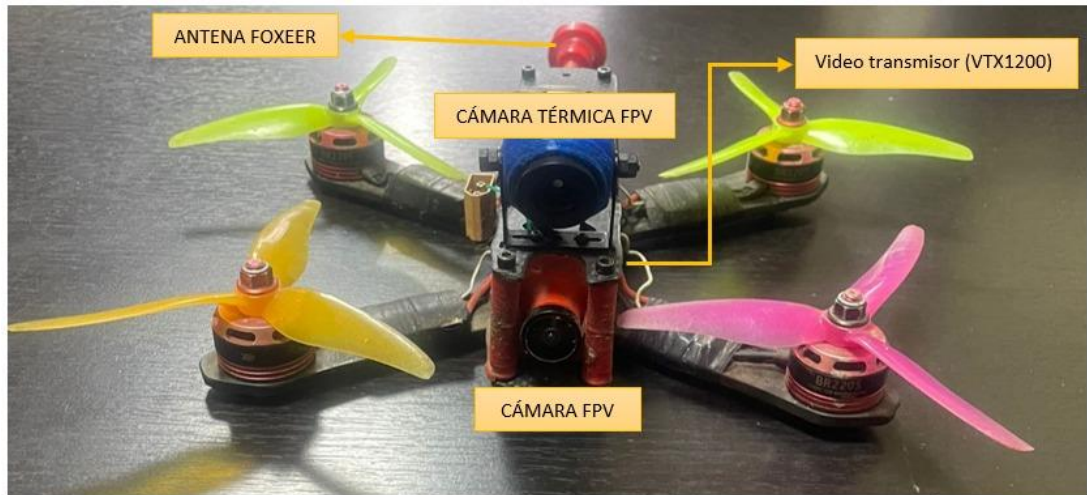


Figura 56. Implementación del sistema de transmisión de video con cámara térmica FPV.

3.1.17 Verificación del peso total del UAV

Es fundamental determinar con precisión el peso total del UAV, especialmente considerando las restricciones establecidas para este tipo de aeronaves no tripuladas y la correcta distribución de sus componentes. Para ello, se utilizó una balanza digital, como se observa en la Figura 57, obteniendo un peso total de 587 g, valor que confirma que el sistema mantiene una estructura ligera y adecuada para su operación.



Figura 57. Peso total del UAV.

3.1.18 Consumo de energía y tiempo de vuelo estimado

El análisis del consumo energético de los componentes del UAV se realizó considerando las especificaciones técnicas de cada elemento integrado en el sistema. Este procedimiento permitió determinar y seleccionar una batería LiPo adecuada, conforme a los requerimientos y recomendaciones técnicas establecidas para el correcto funcionamiento del UAV. En la Tabla 16 correspondiente se detallan las características principales de la batería, facilitando su análisis y validación.

Tabla 16. Características de la batería LiPo.

Características	Valor
Número de celdas	4 S
Voltaje por celda	3.7 V – 4.2 V
Voltaje total	14.8 V – 16.8 V
Potencia	22.94 Wh
Corriente	1550 mAh
Tasa de descarga	100 C

La Ecuación 7 describe la capacidad de la batería LiPo, donde (Q) corresponde a la capacidad nominal, (E) representa la energía de almacenamiento expresada en watts-hora y V indica el voltaje nominal de la batería.

$$Q = \frac{E}{V} \quad (7)$$
$$Q = \frac{22.94}{14.8}$$
$$Q = 1.55 \text{ Ah}$$

La corriente máxima de descarga continua (I_{max-DC}) se calcula a partir de la capacidad nominal de la batería, correspondiente a 1550 mAh, junto con su tasa de descarga de 100 C, utilizando para ello la Ecuación 8.

$$C = \frac{I_{max-DC}}{Q} \quad (8)$$

$$100 = \frac{I_{max-DC}}{1.55}$$

$$I_{max-DC} = 100 * 1.55$$

$$I_{max-DC} = 155 A$$

La batería seleccionada posee una capacidad de descarga continua máxima de 155 A, resultado de combinar una capacidad nominal de 1550 mAh con una tasa de descarga de 100 C. Estas características la convierten en una opción adecuada para aplicaciones que demandan altos niveles de potencia instantánea, como UAVs, vehículos eléctricos y sistemas de alto rendimiento energético.

Considerando que el peso total del UAV es de 587 g, equivalente aproximadamente a 5.76 N, el sistema de propulsión debe generar al menos un empuje igual o superior a este valor para mantener el vuelo. Al tratarse de una configuración cuadricóptero, este empuje se distribuye entre los cuatro motores, requiriendo aproximadamente 1.44 N por motor en condiciones mínimas de sustentación.

Para la estimación del tiempo de vuelo se emplea la Ecuación 9, donde (Q) representa la capacidad nominal de la batería e (I_A) la corriente consumida por cada motor. En esta configuración, equipada con hélices de 5 pulgadas y motores de 2300 KV, el consumo energético de cada motor oscila entre 2 A y 5 A, dependiendo de las exigencias de vuelo. Durante condiciones de vuelo estacionario, sin maniobras bruscas o aceleraciones elevadas, el consumo promedio por motor se reduce a un intervalo aproximado de 2 A a 3 A.

$$t = \frac{Q}{I_A * 4} \quad (9)$$

$$\text{Con } I_A = 2A$$

$$t = \frac{1.55 \text{ Ah}}{(2 * 4) A} = 0.193 \text{ h} = 11.62 \text{ minutos}$$

$$\text{Con } I_A = 3A$$

$$t = \frac{1.55 \text{ Ah}}{(3 * 4) A} = 0.129 \text{ h} = 7.74 \text{ minutos}$$

El tiempo de vuelo estimado se determina a partir del consumo total de corriente generado por los motores, parámetro que depende directamente del peso del UAV y de las condiciones ambientales durante la operación. Bajo condiciones normales de funcionamiento, se obtuvo un intervalo aproximado de autonomía entre 7.74 minutos y 11.62 minutos. Sin embargo, en escenarios con presencia de ráfagas de viento o variaciones climáticas adversas, los motores demandan una mayor cantidad de energía para estabilizar la aeronave y contrarrestar las perturbaciones externas, ocasionando una disminución considerable en el tiempo total de vuelo.

3.1.19 Configuración del UAV

a. Parámetros iniciales

El control y la coordinación de los componentes electrónicos del UAV dependen directamente del software, el cual funciona como el cerebro del sistema. Este se encarga de recopilar los datos provenientes de los sensores, procesarlos y emitir las instrucciones necesarias para asegurar el funcionamiento eficiente de los distintos dispositivos. Asimismo, permite mantener la estabilidad del UAV durante el vuelo, facilitando la ejecución adecuada de las maniobras requeridas.

La configuración del sistema dio inicio con la obtención e instalación del software Mission Planner 1.3.83 desde la página oficial de Ardupilot, como se evidencia en la Figura 58.



Figura 58. Interfaz principal del software Mission Planner de ArduPilot.

Una vez iniciado el software, se realizó la conexión entre el UAV y el equipo de cómputo. Posteriormente, dentro del menú SETUP, se configuró el tipo de estructura del dron, seleccionando un frame de cuatro rotores con disposición en X, conforme se ilustra en la Figura 59.

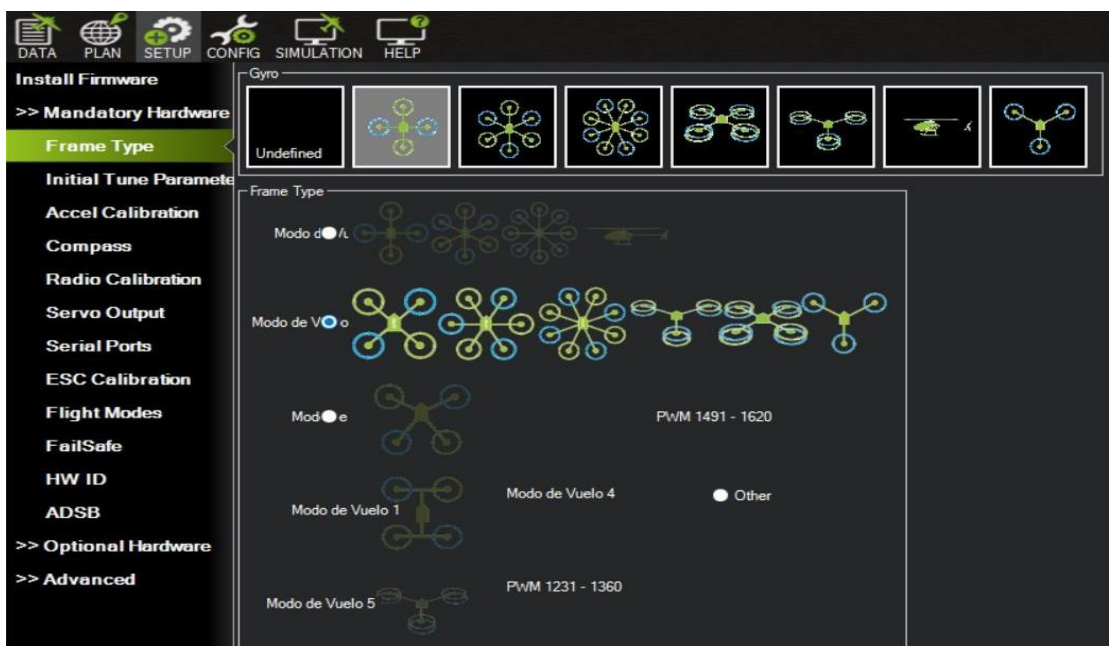


Figura 59 Tipo de frame del UAV.

b. Calibración del acelerómetro

Es un proceso esencial para ajustar correctamente la medición de la aceleración en los ejes del UAV, lo que mejora la estabilidad y precisión del control de vuelo. Para ello, el dron se colocó inicialmente sobre una superficie plana y sin vibraciones, asegurando condiciones adecuadas para el procedimiento. Luego, se lo ubicó en distintas orientaciones horizontal, inclinaciones laterales, con la parte frontal hacia arriba y hacia abajo, y finalmente en posición invertida con el fin de que el sistema reconozca correctamente cada eje y optimice su desempeño.

c. Calibración de la brújula

Permite ajustar con precisión la orientación y el rumbo del UAV, asegurando un vuelo estable. Para ello, el procedimiento se realizó en un área sin interferencias magnéticas y, desde la sección Compass, se ejecutó la calibración moviendo el UAV de forma continua en diferentes direcciones hasta completar el ajuste.

d. Calibración del radio control

Se realiza mediante el software Mission Planner, conectando previamente la controladora de vuelo a la computadora y encendiendo el radio control. Dentro de la opción Radio Calibration, se verifica el correcto funcionamiento de cada canal, asegurando que los sticks alcancen sus valores máximos y mínimos sin restricciones. Posteriormente, al iniciar la calibración, se desplazan todos los controles en sus diferentes direcciones para registrar con precisión los rangos operativos del sistema, garantizando una adecuada respuesta del UAV durante el vuelo, como se muestra en la Figura 60.



Figura 60. Radio control (Jumper T-pro).

3.1.20 Planos de vuelo autónomos

a. Puntos de la trayectoria de vuelo

Zona 1

En la Figura 61, mediante el software Mission Planner, se configuró una trayectoria automatizada correspondiente a la zona 1, compuesta por ocho puntos de navegación sobre el Cerro Casigana. El plan de vuelo define un polígono de monitoreo (puntos 2 al 7), conectado mediante una ruta de aproximación y retorno desde una zona de despegue segura (puntos 1 y 8), lo que permite una recolección sistemática de datos visuales y térmicos, optimizando la autonomía del UAV. Esta configuración garantiza la repetibilidad de la misión en la zona 1, facilitando el análisis y la gestión de riesgos ante posibles incidentes ambientales.

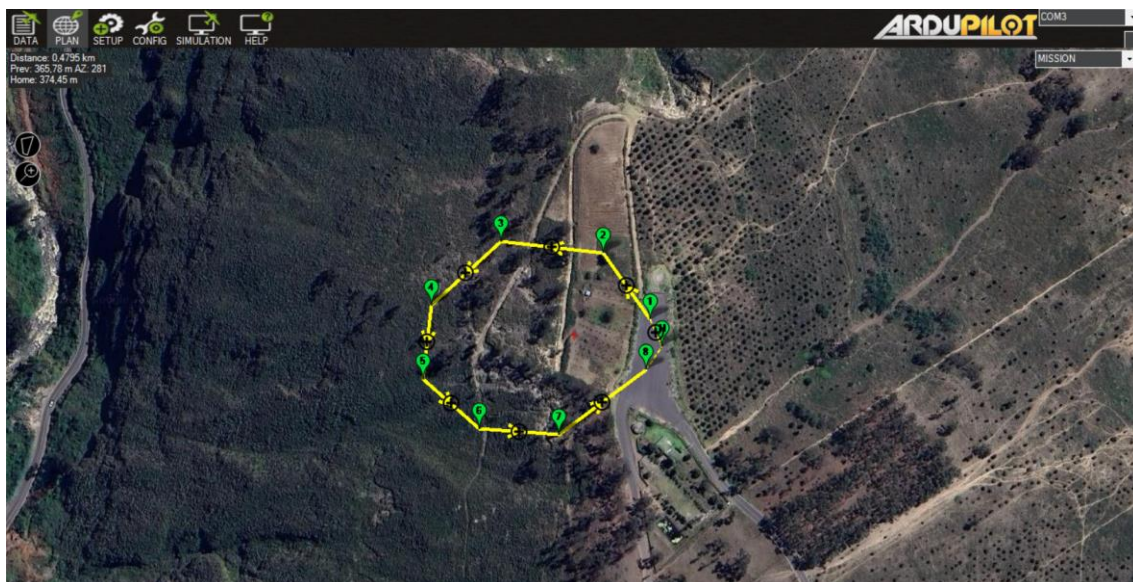


Figura 61. Trayectoria automatizada correspondiente a la Zona 1.

La Figura 62, muestra la configuración de la misión de vuelo de la Zona 1 automatizada en el software Mission Planner, donde se establecen distintos puntos de navegación (waypoints) mediante coordenadas geográficas. El recorrido inicia con el comando TAKEOFF, seguido de varios puntos intermedios que definen la trayectoria del UAV, y finaliza con la instrucción LAND. Esta planificación permite controlar de manera precisa la ruta, altura y dirección del dron durante la ejecución del vuelo autónomo.

	Command					Lat	Long	Alt (m)	Frame	Delete			Grad %	Angle	Dist	AZ
1	TAKEOFF	0	0	0	0	0	0	50	Relative	X			233.4	66.8	54.4	336
2	WAYPOINT	0	0	0	0	-1.2626389	-78.648414	50	Relative	X			63.6	32.5	93.2	328
3	WAYPOINT	0	0	0	0	-1.2625638	-78.6490685	50	Relative	X			0.0	0.0	73.2	277
4	WAYPOINT	0	0	0	0	-1.2629714	-78.6495137	50	Relative	X			0.0	0.0	67.1	228
5	WAYPOINT	0	0	0	0	-1.2634433	-78.6495674	50	Relative	X			0.0	0.0	52.8	186
6	WAYPOINT	0	0	0	0	-1.2637598	-78.6492079	50	Relative	X			0.0	0.0	53.3	131
7	WAYPOINT	0	0	0	0	-1.2637973	-78.6486983	50	Relative	X			0.0	0.0	56.8	94
8	LAND	0	0	0	0	-1.2633844	-78.6481404	0	Relative	X			-64.8	-32.9	91.9	53

Figura 62. Configuración de la misión de vuelo de la Zona 1 automatizada.

Zona 2

De manera similar, en la Figura 63, mediante el software Mission Planner se definió una trayectoria automatizada correspondiente a la zona 2, igualmente compuesta por ocho puntos de navegación. El plan de vuelo establece un polígono de monitoreo que cubre un sector distinto del área de estudio, manteniendo una ruta de aproximación y retorno desde puntos de despegue y aterrizaje seguros. Esta planificación permite una cobertura eficiente del territorio, asegurando la captura sistemática de datos y la repetibilidad de la misión en la zona 2, contribuyendo al análisis comparativo y a la identificación de áreas con mayor riesgo de eventos.

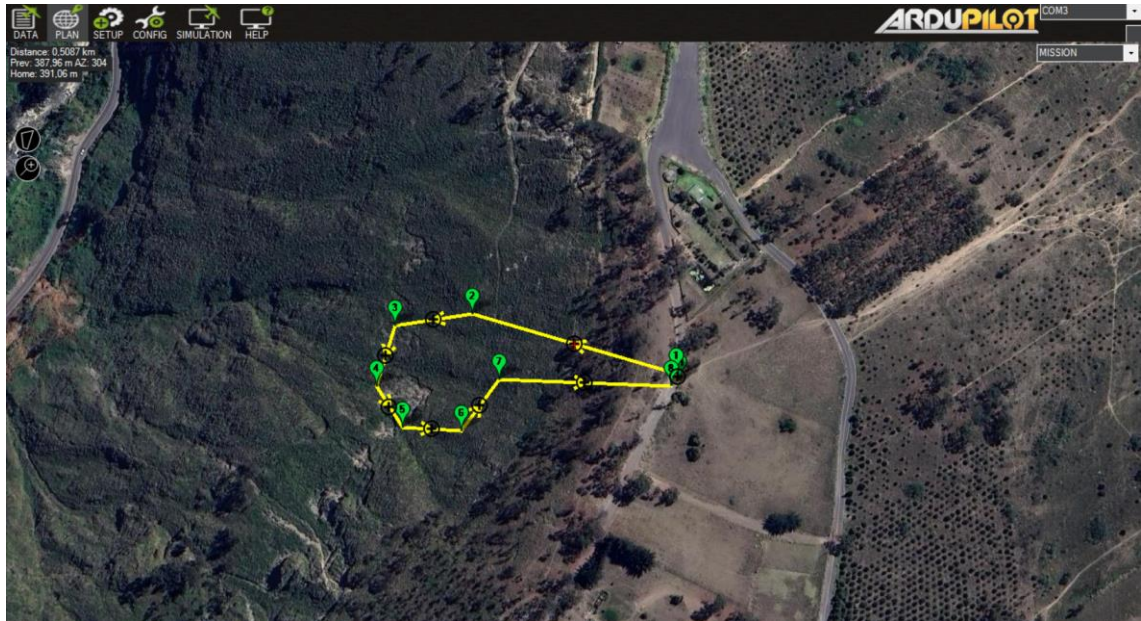


Figura 63. Trayectoria automatizada correspondiente a la Zona 2.

La Figura 64, presenta la programación de una segunda trayectoria de vuelo de la Zona 2 en Mission Planner, en la cual se definen múltiples puntos de navegación mediante coordenadas geográficas y una altitud constante de 50 metros en modo relativo. La secuencia inicia con el comando TAKEOFF, continúa con varios WAYPOINTS que estructuran la ruta del UAV, y concluye con la instrucción LAND. Esta configuración permite establecer un recorrido automatizado, asegurando precisión en la cobertura del área y control en la ejecución del vuelo autónomo.

	Command					Lat	Long	Alt (m)	Frame	Delete			Grad	Angle	Dist	AZ
1	TAKEOFF	0	0	0	0	0	0	50	Relative	X			192...	87,0	100,1	333
2	WAYPOINT	0	0	0	0	-1,2646340	-78,6494547	50	Relative	X			32,3	17,9	162,7	288
3	WAYPOINT	0	0	0	0	-1,2647064	-78,6499509	50	Relative	X			0,0	0,0	55,7	262
4	WAYPOINT	0	0	0	0	-1,2650952	-78,6500663	50	Relative	X			0,0	0,0	45,1	197
5	WAYPOINT	0	0	0	0	-1,2653580	-78,6499000	50	Relative	X			0,0	0,0	34,6	148
6	WAYPOINT	0	0	0	0	-1,2653821	-78,6495245	50	Relative	X			0,0	0,0	41,8	94
7	WAYPOINT	0	0	0	0	-1,2650523	-78,6492831	50	Relative	X			0,0	0,0	45,4	36
8	LAND	0	0	0	0	-1,2650945	-78,6481847	0	Relative	X			-40,9	-22,3	132,0	92

Figura 64. Configuración de una segunda trayectoria de vuelo de la Zona 2.

3.1.21 Configuración del sistema de captura de datos del sensor MLX90640

Para la adquisición de datos térmicos se utilizó el sensor infrarrojo MLX90640 conectado a un microcontrolador ESP32 mediante el protocolo de comunicación I²C. Este sensor permite capturar una matriz térmica de 32 × 24 píxeles, equivalente a 768 puntos de medición de temperatura por cada frame adquirido.

Inicialmente, el sistema importa las librerías necesarias para el control del sensor térmico, comunicación WiFi y transmisión UDP, Figura 65:

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90640.h>
#include <WiFi.h>
#include <WiFiUdp.h>
```

Figura 65. Librerías para el control del sensor térmico, comunicación WiFi y transmisión UDP.

Posteriormente, en la Figura 66 se inicializa el sensor MLX90640 y se declara el arreglo que almacenará la matriz térmica capturada:

```
Adafruit_MLX90640 mlx;
float frame[768];
```

Figura 66. Declaración del objeto e inicialización de la matriz de datos para el sensor térmico MLX90640.

En la Figura 67 el ESP32 fue configurado para funcionar en modo Access Point (AP), permitiendo crear una red WiFi independiente para la transmisión de datos hacia la estación terrestre:

```
// ===== WiFi AP =====  
const char* ssid = "ESP32_TERMICA";  
const char* password = "12345678";
```

Figura 67. Definición del identificador de red (SSID) y contraseña para el modo Access Point.

Para la transmisión de datos térmicos se utilizó el protocolo UDP, como en la Figura 68 configurando una dirección broadcast y el puerto de comunicación correspondiente:

```
WiFiUDP udp;  
IPAddress broadcastIP(192, 168, 4, 255);  
const int udpPort = 5005;
```

Figura 68. Configuración del protocolo UDP, dirección IP de difusión y puerto de comunicación.

Durante la fase de inicialización, en la Figura 69 se configura la comunicación I²C utilizando los pines GPIO 21 y GPIO 22 del ESP32:

```
// I2C  
Wire.begin(21, 22);
```

Figura 69. Fase de inicialización.

A continuación, se realiza la inicialización y verificación del sensor MLX90640 como en la Figura 70:

```
// Inicializar MLX90640  
if (!mlx.begin(MLX90640_I2CADDR_DEFAULT, &Wire)) {  
  Serial.println("X No se detecta MLX90640");  
  while (1);  
}
```

Figura 70. Algoritmo de inicialización y control de excepciones para el sensor térmico MLX90640.

En la Figura 71 el sensor fue configurado utilizando el modo CHESS, resolución ADC de 18 bits y una frecuencia de actualización de 4 Hz, optimizando la estabilidad y precisión de las lecturas térmicas:

```
mlx.setMode(MLX90640_CHESS);  
mlx.setResolution(MLX90640_ADC_18BIT);  
mlx.setRefreshRate(MLX90640_4_HZ);
```

Figura 71. Ajuste de modo de lectura en ajedrez, resolución del ADC a 18 bits y frecuencia de muestreo de 4 Hz.

Posteriormente, en la Figura 72 el ESP32 crea el punto de acceso WiFi e inicia la comunicación UDP:

```
// Crear WiFi AP  
WiFi.softAP(ssid, password);  
delay(200);
```

Figura 72. Creación del punto de acceso WiFi.

Dentro del ciclo principal del programa, en la Figura 73 el sistema realiza la lectura continua de la matriz térmica:

```
if (mlx.getFrame(frame) != 0)
```

Figura 73. Lectura continua de la matriz térmica.

Debido al tamaño de la información generada por el sensor, los datos se dividen en tres paquetes UDP consecutivos para evitar pérdida de información durante la transmisión inalámbrica como en la Figura 74:

```
for (int p = 0; p < 3; p++)
```

Figura 74. Estructura de control iterativa para la ejecución cíclica de subtareas.

En la Figura 75 cada paquete contiene una parte de los 768 valores térmicos capturados y es enviado mediante broadcast UDP hacia la estación de monitoreo:

```
udp.beginPacket(broadcastIP, udpPort);  
udp.print(packet);  
udp.endPacket();
```

Figura 75. Secuencia de empaquetado y transmisión inalámbrica de datos vía UDP Broadcast.

Finalmente, en la Figura 76 se establece un retardo de 250 ms entre lecturas, obteniendo aproximadamente 4 FPS en la transmisión térmica en tiempo real:

```
delay(250);
```

Figura 76. Sentencia de temporización para el control de la tasa de refresco del sistema.

La implementación desarrollada permite la captura, procesamiento y transmisión eficiente de datos térmicos desde el sensor MLX90640 hacia la estación terrestre, constituyendo la base para la detección de focos de calor en el sistema UAV propuesto.

3.1.22 Simulación de planes de vuelo en Matlab

Para validar el comportamiento del UAV en un entorno controlado, se desarrolló un simulador en el software MATLAB, integrando el diseño mecánico exportado desde Fusion 360. Esta simulación permite verificar la respuesta del sistema ante planes de vuelo específicos antes de su implementación física.

a. Importación y Procesamiento del Modelo 3D

El primer paso consistió en la carga de la geometría del dron mediante el formato de archivo STL. Para que el software pueda manipular el modelo, se extrajeron las listas de conectividad y los vértices del objeto de triangulación, escalándolos a unidades métricas como en la Figura 77.

- **Carga del modelo:** Se utilizó la función `stlread` para obtener la malla del chasis, forzando la conversión a tipo `double` para asegurar la compatibilidad con las funciones gráficas de MATLAB.
- **Alineación:** El modelo fue centrado en el origen de coordenadas (0,0,0) para garantizar que las rotaciones se ejecuten sobre el eje de simetría del UAV, evitando efectos de órbita no deseados.

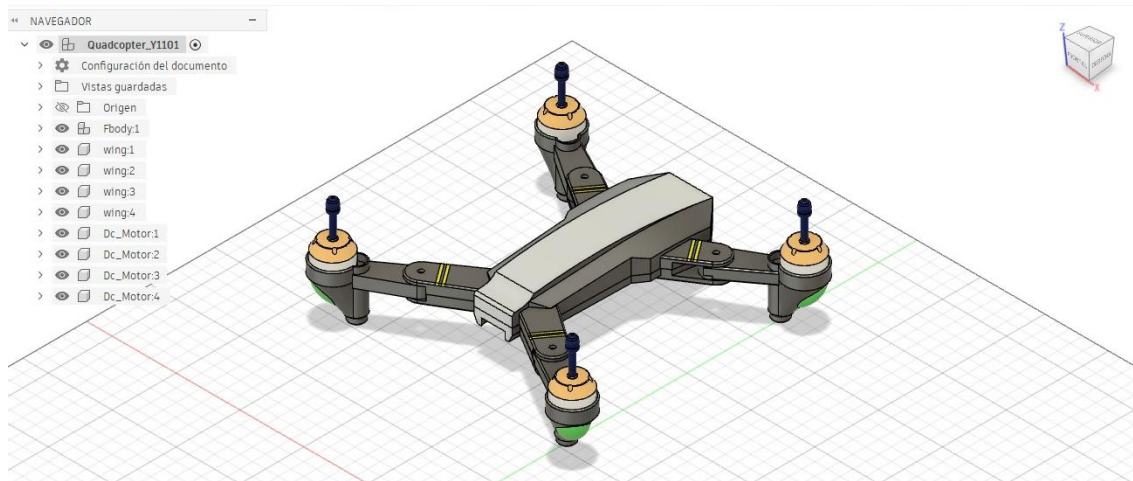
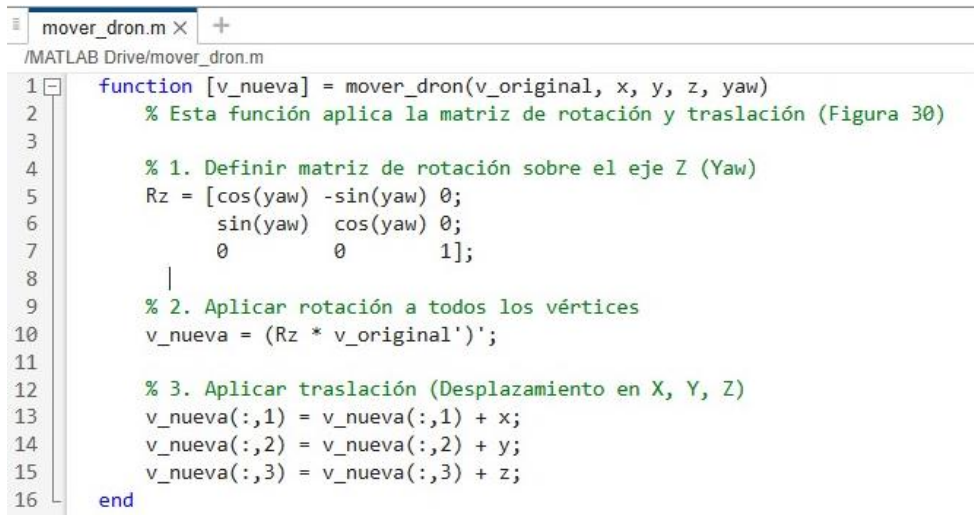


Figura 77. Diseño y modelado tridimensional del chasis del cuadricóptero (Quadcopter_Y1101).

b. Implementación del Algoritmo de Movimiento

En la Figura 78 se muestra la ejecución de los movimientos se basa en una función de transformación lineal que aplica matrices de rotación y vectores de traslación a cada vértice del modelo en cada instante de tiempo (t_s).



```

1 function [v_nueva] = mover_dron(v_original, x, y, z, yaw)
2     % Esta función aplica la matriz de rotación y traslación (Figura 30)
3
4     % 1. Definir matriz de rotación sobre el eje Z (Yaw)
5     Rz = [cos(yaw) -sin(yaw) 0;
6           sin(yaw)  cos(yaw) 0;
7           0         0       1];
8
9     % 2. Aplicar rotación a todos los vértices
10    v_nueva = (Rz * v_original)';
11
12    % 3. Aplicar traslación (Desplazamiento en X, Y, Z)
13    v_nueva(:,1) = v_nueva(:,1) + x;
14    v_nueva(:,2) = v_nueva(:,2) + y;
15    v_nueva(:,3) = v_nueva(:,3) + z;
16 end

```

Figura 78. Función de cálculo matricial para el desplazamiento dinámico de los vértices del UAV.

c. Ejecución y Resultados del Plan de Vuelo Circular

Como prueba de concepto para la validación del modelo, se programó un plan de vuelo que describe una trayectoria circular, simulando un patrullaje de monitoreo autónomo en el sector del Cerro Casigana. El sistema calcula en tiempo real la posición deseada (x_d , y_d , z_d) utilizando funciones trigonométricas, manteniendo un radio de curvatura de 4 metros y una altura constante de 5 metros para garantizar una cobertura visual óptima del terreno.

Para la ejecución de este movimiento, se implementó un bucle de control donde, en cada iteración, el dron ajusta su velocidad para reducir el error entre su posición actual y el punto objetivo de la trayectoria. Esta ley de control proporcional, configurada con una ganancia $K = 0.8$, permite una respuesta suave y precisa, actualizando visualmente el modelo 3D en el entorno de MATLAB mediante el comando `set(uav, 'Vertices', v_nueva)`.

La simulación demostró una convergencia estable hacia la trayectoria programada, evidenciando que el modelo cinemático responde correctamente a los comandos de navegación. La integración del historial de estados permitió generar gráficas temporales de las coordenadas X, Y y Z, las cuales validan la estabilidad cinemática

del vehículo y su capacidad para seguir planes de vuelo complejos como se muestra en la Figura 79 sin presentar oscilaciones críticas.

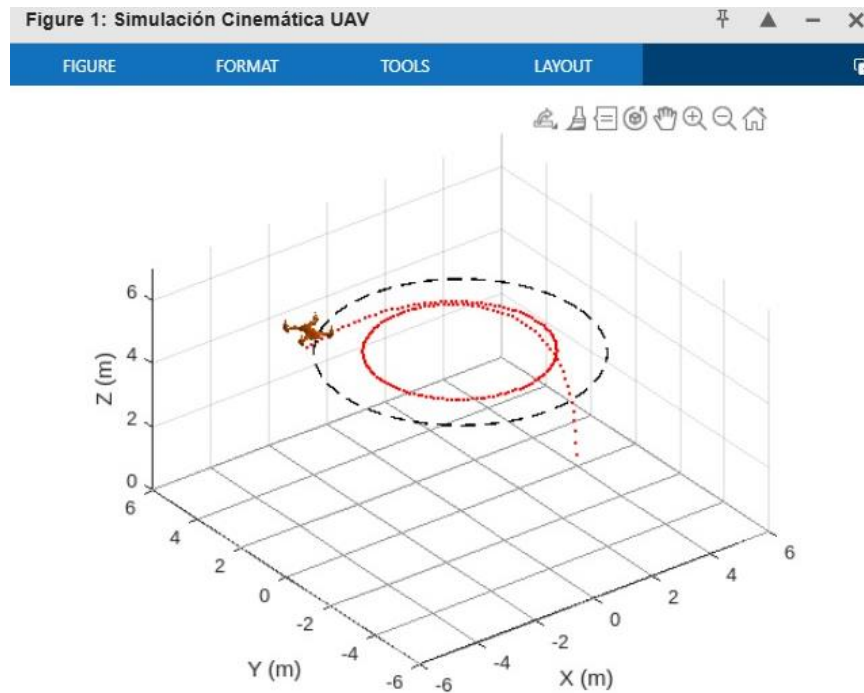


Figura 79. Resultados de la simulación tridimensional de la trayectoria cinemática del UAV en MATLAB.

3.1.23 Desarrollo del algoritmo para detección de focos de calor con el MLX90640

El algoritmo de la Figura 80 representa la detección de focos de calor se basó principalmente en el análisis de la temperatura máxima obtenida del sensor MLX90640. Se estableció un umbral térmico de 70 °C como indicador de posible foco de incendio, considerando que las temperaturas ambientales en el Cerro Casigana oscilan normalmente entre 12 °C y 25 °C.

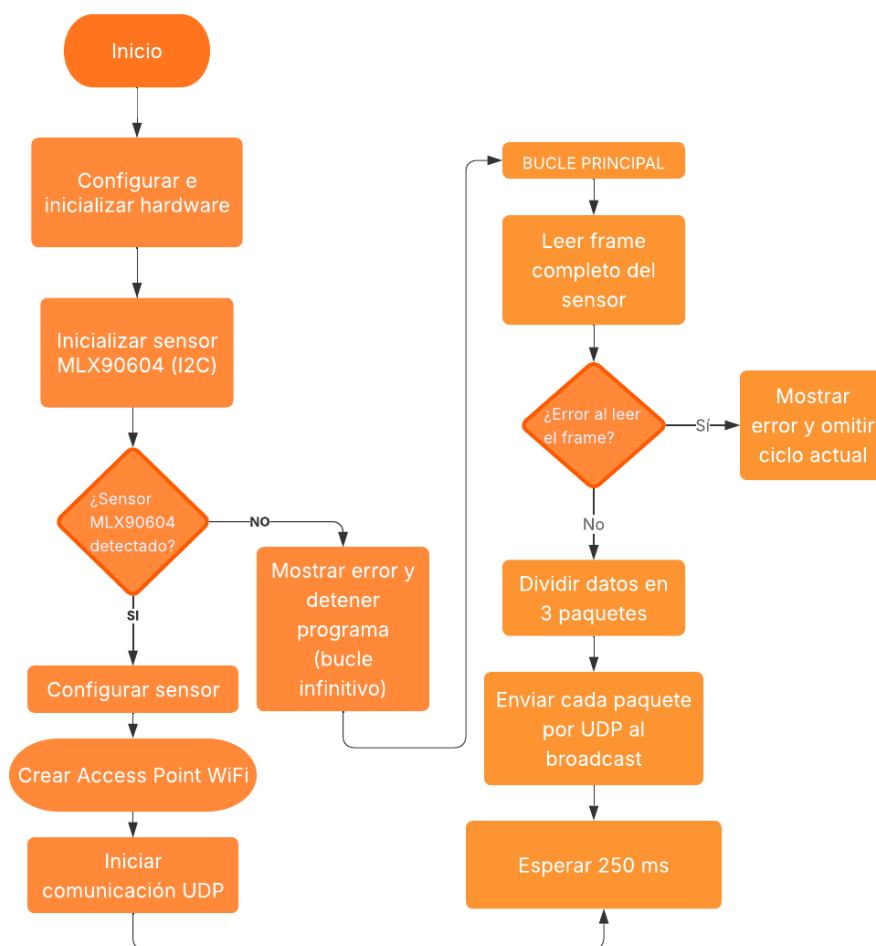


Figura 80. Diagrama de flujo del firmware para la inicialización, captura termográfica y transmisión inalámbrica UDP.

La lógica del algoritmo es la siguiente:

- Se recibe la matriz de 768 valores de temperatura.
- Se calcula la temperatura máxima del frame actual.
- Si la temperatura máxima supera los 70 °C, se genera una alerta automática.
- Se registra el timestamp, temperatura máxima y se guardan las imágenes correspondientes (RGB y térmica) como evidencia.
- Se activa una alarma sonora en la estación terrestre.

Este algoritmo, aunque simple, demostró ser efectivo para la detección temprana de anomalías térmicas. Sin embargo, presentó limitaciones al no diferenciar entre fuentes

de calor naturales (superficies calentadas por el sol) y reales focos de incendio, lo que generó algunos falsos positivos durante las pruebas diurnas.

3.1.24 Desarrollo del algoritmo para detección de focos de calor con la cámara térmica

El algoritmo propuesto en la Figura 81 emplea técnicas de procesamiento digital de imágenes, incluyendo segmentación por intensidad, análisis estadístico y filtrado espacial, priorizando la eficiencia computacional al prescindir de modelos de aprendizaje profundo para su aplicación en UAVs con sistemas embebidos.

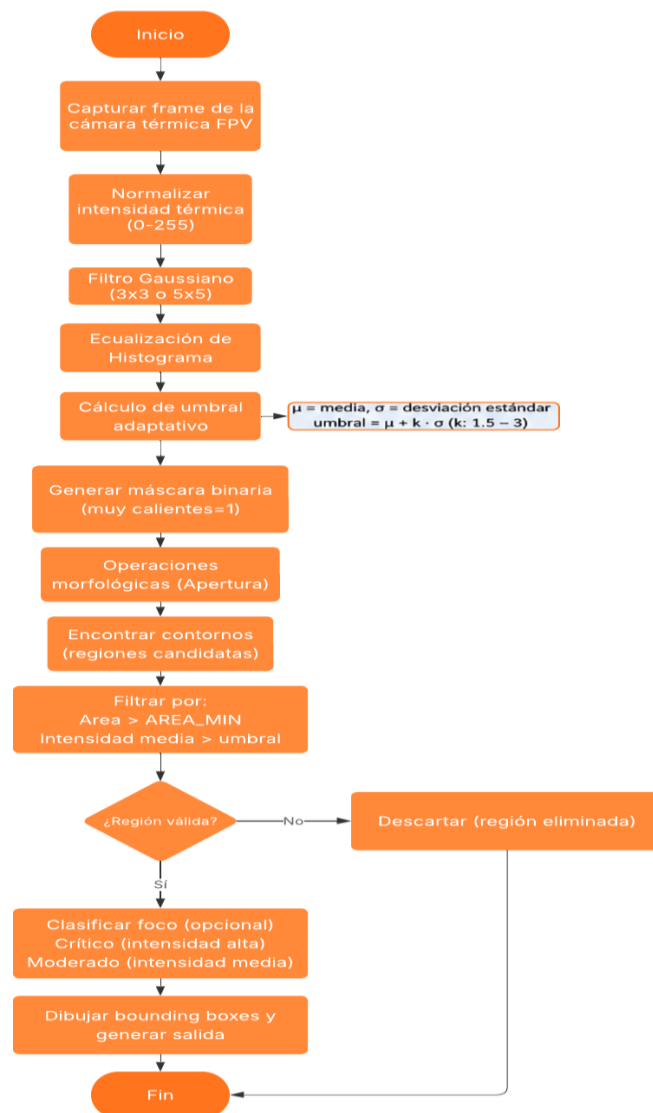


Figura 81. Diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento digital de imágenes para la segmentación y detección de focos térmicos.

El algoritmo de detección se fundamenta en la identificación de regiones térmicas con intensidades superiores al promedio de la escena. Para ello, se aplica una técnica de umbralización adaptativa, donde el valor umbral se calcula dinámicamente según las características estadísticas de cada frame, permitiendo mayor precisión en la detección.

Matemáticamente, el criterio de detección se expresa como en la siguiente Ecuación 10:

$$T(x, y) > \mu + k\sigma \quad (10)$$

Donde:

- $T(x,y)$: Intensidad térmica del píxel
- μ : Media de intensidades de la imagen
- σ : Desviación estándar
- k : Factor de sensibilidad ajustable

El algoritmo se estructura en una secuencia de etapas que permiten transformar la información cruda de la cámara térmica en detecciones confiables:

- **Adquisición de datos térmicos:** Se captura continuamente la señal de video proveniente de la cámara térmica FPV. Dependiendo del dispositivo, esta puede entregarse como imagen en escala de grises (mapa térmico) o como imagen pseudo-color.
- **Normalización de intensidad:** Los valores de intensidad térmica se ajustan a un rango estándar (0–255), facilitando su procesamiento y análisis posterior.
- **Reducción de ruido:** Se aplica un filtro Gaussiano para eliminar variaciones aleatorias sin afectar significativamente las regiones térmicas relevantes.
- **Realce de contraste:** Mediante ecualización de histograma se amplifican las diferencias entre zonas frías y calientes, mejorando la detectabilidad de focos térmicos.
- **Umbralización adaptativa:** Se segmenta la imagen en función del umbral calculado, generando una máscara binaria donde los píxeles calientes son identificados.

- **Procesamiento morfológico:** Se aplican operaciones como apertura o cierre para eliminar ruido residual y mejorar la coherencia de las regiones detectadas.
- **Detección de regiones (contornos):** Se identifican agrupaciones de píxeles calientes que representan posibles focos de calor.
- **Filtrado de falsos positivos:** Se descartan regiones que no cumplen criterios mínimos de área o intensidad promedio, reduciendo detecciones erróneas.
- **Clasificación del foco térmico:** Opcionalmente, los focos se clasifican según su nivel de intensidad en categorías como moderado o crítico.

3.1.25 Implementación del algoritmo para detección de fuego/humo con YOLO

La detección automática de fuego y humo se implementa mediante técnicas de visión por computadora basadas en aprendizaje profundo, utilizando el modelo YOLO por su eficiencia en detección de objetos en tiempo real como se muestra en la Figura 82. Este modelo realiza la predicción simultánea de ubicaciones y clases de múltiples objetos en una sola pasada, optimizando el procesamiento en sistemas embebidos y plataformas UAV. Para el presente proyecto, se emplea un modelo personalizado previamente entrenado (best.pt), orientado a la identificación de fuego, humo y focos térmicos secundarios, garantizando una detección robusta en entornos naturales.

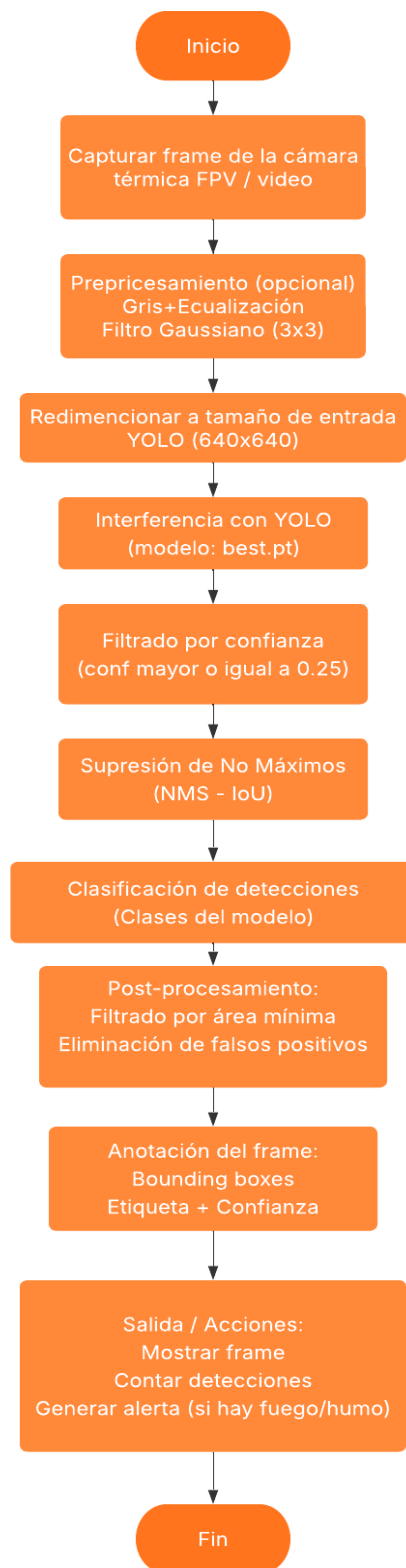


Figura 82. Algoritmo de visión computacional y aprendizaje profundo para la detección automatizada de fuego y humo.

El modelo YOLO procesa la imagen de entrada mediante su división en una cuadrícula, donde cada celda realiza la predicción de coordenadas de cajas delimitadoras (bounding boxes), la probabilidad de presencia de un objeto y las probabilidades de clasificación correspondientes, permitiendo la detección y localización simultánea de múltiples elementos dentro de la escena.

El criterio de detección se basa en el valor de confianza, definido como en la Ecuación 11:

$$\text{Confianza} = P(\text{objeto}) \cdot \text{IoU} \quad (11)$$

Donde:

- $P(\text{objeto})$: probabilidad de que exista un objeto en la región
- IoU : *Intersection over Union*, que mide la superposición entre la predicción y la realidad

El algoritmo de detección se desarrolla mediante una secuencia de procesamiento orientada a la identificación de fuego, humo y focos térmicos en tiempo real:

- **Captura del frame:** Adquisición de imágenes desde la fuente de video, ya sea archivo de prueba o transmisión en tiempo real de la cámara térmica FPV instalada en el UAV.
- **Preprocesamiento de imagen:** Aplicación de técnicas como conversión a escala de grises, ecualización de histograma y filtrado Gaussiano para mejorar la calidad visual y resaltar patrones relevantes.
- **Inferencia con modelo YOLO:** Procesamiento del frame mediante el modelo entrenado (best.pt), generando cajas delimitadoras, clases detectadas y niveles de confianza.
- **Filtrado por confianza:** Eliminación de detecciones con baja probabilidad para reducir falsos positivos, manteniendo únicamente resultados confiables.
- **Supresión de no máximos (NMS):** Eliminación de cajas redundantes sobre un mismo objeto, conservando la detección con mayor nivel de confianza.

- **Clasificación de detecciones:** Identificación de eventos térmicos según categorías como fuego, humo o rescoldo.
- **Postprocesamiento:** Aplicación de reglas adicionales para validar detecciones, eliminar regiones irrelevantes y optimizar resultados finales.
- **Anotación del frame:** Representación visual de detecciones mediante bounding boxes, etiquetas de clase y porcentajes de confianza.
- **Generación de salida:** Producción de video anotado en tiempo real, conteo de detecciones y activación de alertas ante eventos de fuego o humo.

Al evaluar el desempeño del modelo de detección de fuego/humo implementado en el sistema, se presentan a continuación los principales elementos técnicos asociados al modelo pre entrenado best.pt. En la Figura 83, las evidencias presentes son propias del pre entrenamiento empleado en el sistema de monitoreo. Estos elementos permiten verificar la capacidad del modelo para identificar correctamente eventos de fuego/humo ya que fue desarrollado utilizando un conjunto de imágenes etiquetadas correspondiente a las clases Fire y Smoke. Las imágenes fueron anotadas mediante cuadros delimitadores (bounding boxes) que permiten identificar la ubicación de los objetos de interés dentro de cada escena.



Figura 83. Ejemplos del dataset utilizado para el entrenamiento del modelo.

El modelo best.pt también dispone de evidencias generadas durante la etapa de aprendizaje de la red neuronal, en la cual, la Figura 84 muestra la evolución de las métricas de entrenamiento y validación a lo largo de las 150 épocas ejecutadas. En ella se observa una tendencia de convergencia de las funciones de pérdida (loss) y una mejora progresiva de las métricas de precisión y detección, indicando un adecuado proceso de aprendizaje del modelo, siendo de esta manera apto para aplicar en el sistema de monitoreo de incendios.

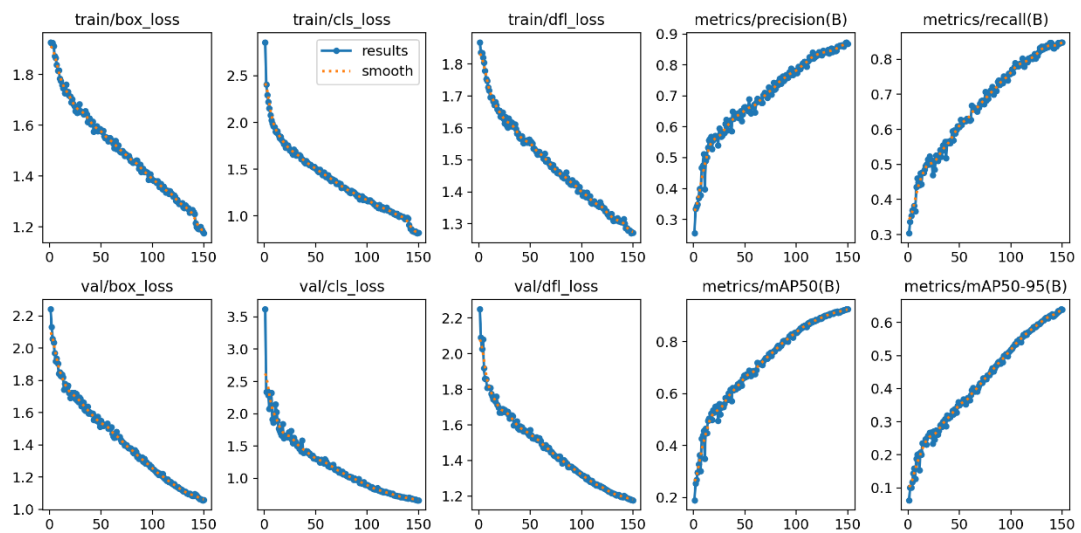


Figura 84. Resultados del proceso de entrenamiento y validación del modelo best.pt.

En relación a los resultados finales del entrenamiento en la Tabla 17 se presentan las métricas obtenidas, en la cual evidencian un desempeño satisfactorio del modelo para la detección de fuego/humo.

Tabla 17. Valores de Precision, Recall y mAP obtenidos por el modelo best.pt.

Métrica	Valor
Precision	86.88 %
Recall	84.86 %
mAP@0.5	92.50 %
mAP@0.5:0.95	64.00 %

Se presenta la matriz de confusión normalizada en la Figura 85. Esta herramienta permite visualizar el porcentaje de aciertos y errores de clasificación obtenidos por el modelo durante la validación.

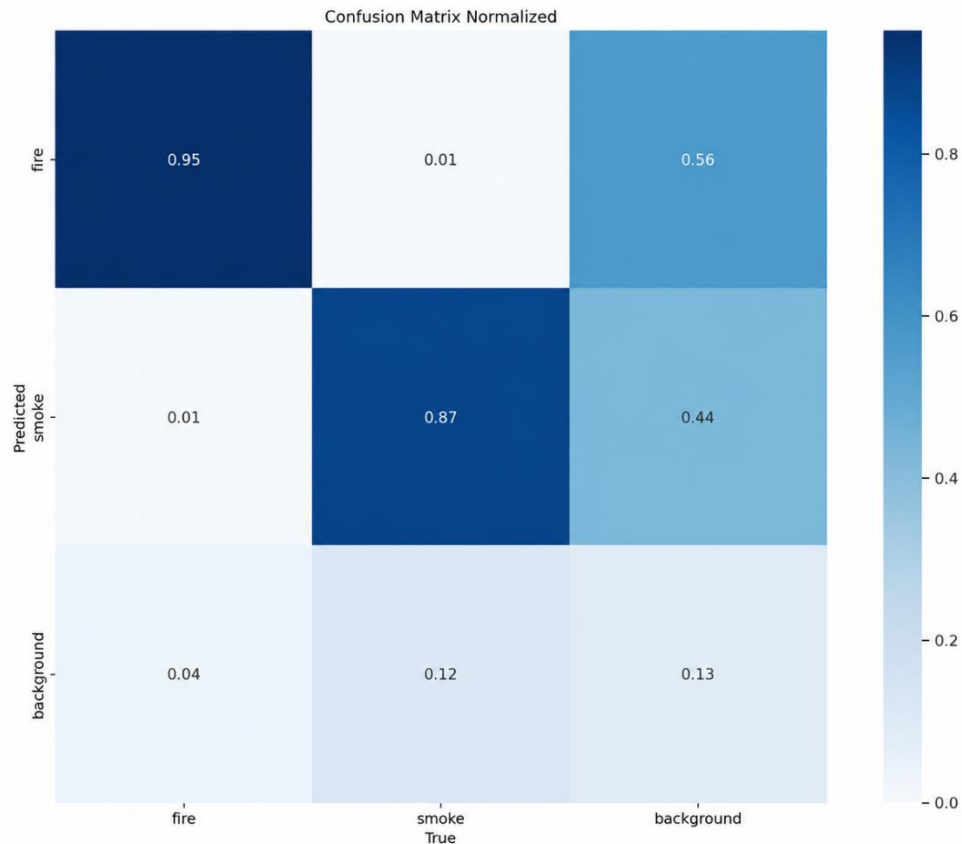


Figura 85. Matriz de confusión del best.pt.

Con respecto a los falsos negativos, alrededor del 4 % de los hechos de fuego no fueron detectados por el sistema, mientras que para la clase humo esta parte fue cercana al 12 %. Estos resultados indican que el modelo presenta una alta capacidad de detección, aunque existen algunos casos en los que determinadas condiciones visuales o ambientales pueden perjudicar la identificación correcta de los hechos analizados.

Por ende, las métricas obtenidas y la matriz de confusión demuestran que el modelo seleccionado posee un rendimiento adecuado para su implementación dentro del sistema de monitoreo de incendios mediante UAV desarrollado en este proyecto.

3.1.26 Implementación del algoritmo para detección de personas con YOLOv8

En la Figura 86, la detección de personas se implementa mediante técnicas de visión por computadora basadas en aprendizaje profundo, utilizando la arquitectura YOLOv8 por su capacidad de detección en tiempo real y eficiencia computacional. Este modelo emplea redes neuronales convolucionales para identificar múltiples objetos en una sola pasada, optimizando velocidad y precisión en sistemas embarcados como UAV. En el presente proyecto se utiliza el modelo preentrenado yolov8n.pt, basado en el dataset COCO, configurado específicamente para la detección de la clase persona (cls = 0), con el fin de optimizar tareas de monitoreo humano.

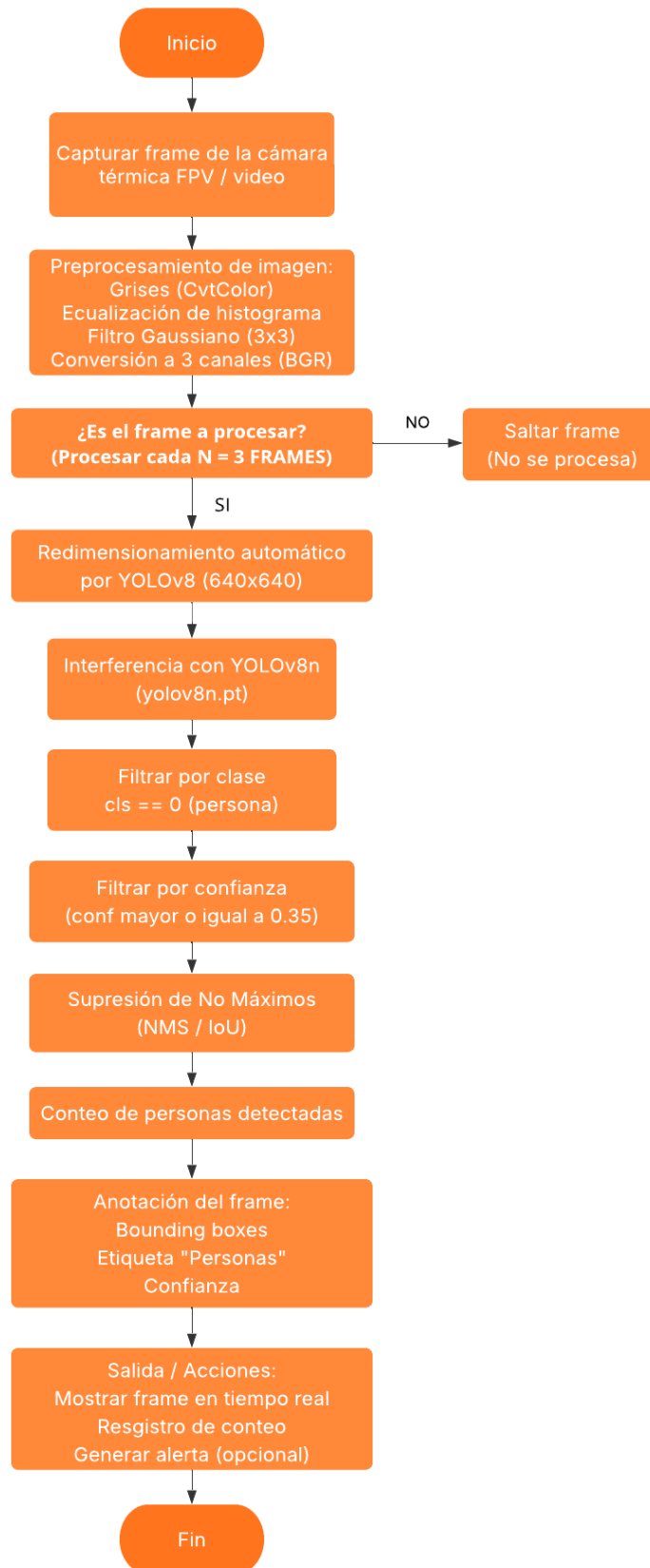


Figura 86. Diagrama de flujo del pipeline de inferencia optimizado con YOLOv8n para la detección y conteo de personas.

El algoritmo de detección de personas se estructura mediante una secuencia de procesamiento orientada al monitoreo humano en tiempo real:

- **Captura del frame:** Adquisición continua de imágenes desde una cámara FPV o archivos de video de prueba.
- **Preprocesamiento de imagen:** Aplicación de conversión a escala de grises, ecualización de histograma, filtrado Gaussiano y reconversión a formato BGR para mejorar la calidad visual y reducir ruido.
- **Optimización del procesamiento:** Reducción de carga computacional mediante el análisis de un subconjunto de frames, procesando uno de cada tres para mantener rendimiento en tiempo real.
- **Inferencia con YOLOv8:** Procesamiento del frame mediante el modelo preentrenado yolov8n.pt, generando múltiples detecciones de objetos.
- **Filtrado por clase:** Selección exclusiva de detecciones correspondientes a la clase persona (cls = 0), descartando otras categorías.
- **Filtrado por confianza:** Eliminación de detecciones con baja probabilidad para minimizar falsos positivos y mejorar confiabilidad.
- **Supresión de no máximos (NMS):** Eliminación de cajas redundantes sobre una misma persona, conservando únicamente la detección de mayor confianza.
- **Conteo de personas:** Cálculo del número total de individuos detectados en cada frame para análisis cuantitativo en tiempo real.
- **Anotación del frame:** Representación visual mediante bounding boxes, etiqueta de persona y nivel de confianza.
- **Generación de salida:** Producción de video anotado en tiempo real, conteo de personas detectadas y posible activación de alertas.

3.1.27 Creación y configuración de una infraestructura de almacenamiento en Azure

En esta etapa se configuró el respaldo persistente de la información para garantizar que las evidencias no dependan únicamente del almacenamiento local de la estación terrestre y se utilizó una suscripción de Azure for Students para el despliegue de recursos.

Se creó una cuenta de almacenamiento estandarizada (LRS - Almacenamiento con redundancia local) en la región East US para minimizar la latencia como se muestra en la Figura 87.

The screenshot displays the 'Create a storage account' page in the Microsoft Azure portal. The page is titled 'Create a storage account' and includes a subtitle 'manage your storage account together with other resources.' The configuration is organized into several sections:

- Subscription *:** A dropdown menu showing 'Azure for Students'.
- Resource group *:** A dropdown menu showing '(New) Casigana_Resources' with a 'Create new' link below it.
- Instance details:**
 - Storage account name * ①:** A text input field containing 'droncasigana2026'.
 - Region * ①:** A dropdown menu showing '(US) East US' with a 'Deploy to an Azure Extended Zone' link below it.
 - Preferred storage type:** A dropdown menu showing 'Choose preferred storage type'.
- Performance * ①:** Two radio button options: 'Standard: Recommended for most scenarios (general-purpose v2 account)' (selected) and 'Premium: Recommended for scenarios that require low latency.'.
- Redundancy * ①:** A dropdown menu showing 'Locally-redundant storage (LRS)'.

At the bottom of the page, there are three buttons: 'Previous' (disabled), 'Next' (disabled), and 'Review + create' (active).

Figura 87. Ajustes de suscripción, grupo de recursos y redundancia para el servicio Azure Blob Storage.

Posteriormente, en la Figura 88. se definieron dos contenedores lógicos con políticas de acceso específicas:

☐	Name	Last modified
☐	 \$logs	3/4/2026, 20:49:29
☐	 reportes-pdf	3/4/2026, 21:14:37
☐	 videos-termicos	3/4/2026, 21:15:31

Figura 88. Estructura de contenedores lógicos en Azure Blob Storage para la persistencia de datos del sistema.

- Videos-termicos: Destinado a almacenar archivos binarios de gran tamaño (.mp4).
- Reportes-pdf: Destinado a almacenar los informes técnicos generados por el sistema.

Se configuró el acceso mediante cadenas de conexión (Connection Strings) y se ajustó el nivel de acceso a los blobs para permitir la visualización remota desde la interfaz administrativa como se muestra en la Figura 89.

Access keys

Set rotation reminder

Refresh

Give feedback

Access keys authenticate your applications' requests to this storage account. Keep your keys in a secure local Key Vault, and replace them often with new keys. The two keys allow you to replace one while still using the other.

Remember to update the keys with any Azure resources and apps that use this storage account.

[Learn more about managing storage account access keys](#)

Storage account name

droncasigana2026

key1

Rotate key

Last rotated: 3/4/2026 (0 days ago)

Key

.....

Show

Connection string

.....

Show

key2

Rotate key

Last rotated: 3/4/2026 (0 days ago)

Key

.....

Show

Connection string

.....

Show

Figura 89. Credenciales criptográficas (key1 y key2) para la autenticación segura del sistema de monitoreo.

Posteriormente, se realizó una demostración técnica sobre la gestión de activos digitales mediante el uso de Microsoft Azure Storage. En esta etapa, se validó el correcto despliegue y almacenamiento de contenido multimedia en el contenedor denominado 'videos-termicos', donde se cargó exitosamente el archivo video_20260403_212051.mp4. En la Figura 90 se garantizó la disponibilidad del recurso en un Access Tier 'Hot', asegurando así un acceso rápido y eficiente a la información para su posterior análisis.

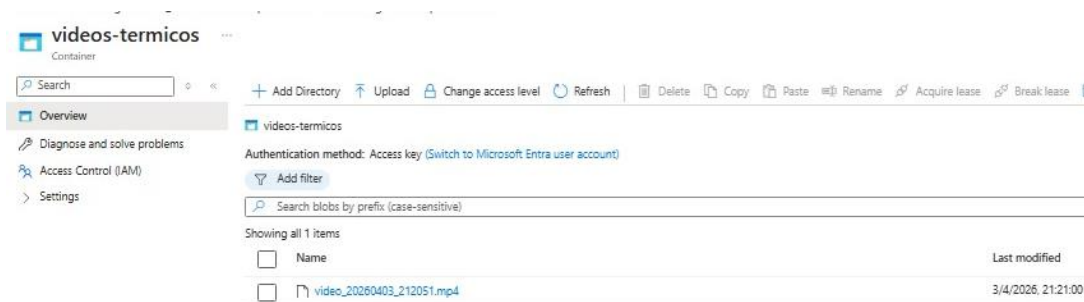


Figura 90. Validación de la carga y persistencia de archivos en el contenedor Azure Blob Storage.

3.1.28 Creación y configuración de la página web en Azure

Antes de pasar a la nube, se creó un proyecto localmente para que Azure pudiera entenderlo.

- **Estructura de Carpetas:** Creamos una carpeta raíz llamada UAVS, como se visualiza en la Figura 91. Consta de: **app.py**: El cerebro en Python (Flask), **templates/**: Carpeta con los archivos HTML (login.html y dashboard.html), **requirements.txt**: El archivo donde anotamos las librerías necesarias (flask, azure-storage-blob, gunicorn).

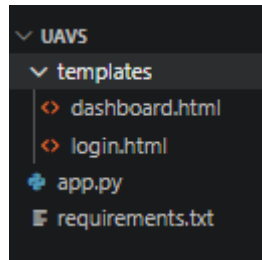


Figura 91. Estructura de la carpeta UAVS

- **Desarrollo de app.py**

El sistema fue desarrollado utilizando el framework Flask, el cual permite la construcción de aplicaciones web ligeras en Python orientadas al manejo de rutas, sesiones y renderización dinámica de interfaces HTML.

1. Configuración de conexión con Azure Blob Storage

En la Figura 92, se implementó una conexión con el servicio de almacenamiento en la nube Azure Blob Storage, encargado de alojar los archivos generados por el sistema, específicamente videos térmicos y reportes en formato PDF.

```
blob_service_client = BlobServiceClient.from_connection_string(AZURE_CONNECTION_STRING)
```

Figura 92. Instanciación del cliente del servicio Azure Blob Storage en Python mediante cadena de conexión.

2. Generación de enlaces seguros mediante tokens SAS

Para garantizar acceso controlado a los archivos almacenados, en la Figura 93 se desarrolló una función de generación de URLs temporales usando Shared Access Signature (SAS).

```
def generate_secure_url(container_name, blob_name):
```

Figura 93. Función base para el control de acceso restringido a objetos en Azure Blob Storage.

3. Sistema de autenticación de usuarios

En la Figura 94 se implementó un módulo básico de autenticación para restringir el acceso al dashboard únicamente a usuarios autorizados.

```
@app.route('/auth', methods=['POST'])
```

Figura 94. Ruta de backend para el control de acceso y validación de credenciales del operador.

4. Dashboard de visualización de archivos

El dashboard central de la Figura 95 consulta automáticamente los contenedores de Azure para listar videos térmicos y reportes PDF.

```
container_v = blob_service_client.get_container_client("videos-termicos")  
container_p = blob_service_client.get_container_client("reportes-pdf")
```

Figura 95. Rutina para la vinculación de referencias lógicas a los contenedores de videos y reportes.

5. Eliminación remota de archivos

En la Figura 96 se implementó una función administrativa para borrar archivos directamente desde Azure Storage.

```
@app.route('/delete/<container>/<filename>')
```

Figura 96. Ruta dinámica de backend para la remoción segura de objetos en Azure Blob Storage.

6. Gestión de cierre de sesión

Se desarrolló en la Figura 97 una ruta para finalizar sesiones activas:

```
@app.route('/logout')
```

Figura 97. Definición del endpoint en el framework web para el servicio de finalización de sesión.

- **Desarrollo de login.html**

Se desarrolló una interfaz de inicio de sesión utilizando HTML5 y CSS3, diseñada para controlar el acceso al sistema de monitoreo.

1. Formulario de autenticación

Se implementó en la Figura 98 un formulario encargado de capturar credenciales de usuario y enviarlas al servidor mediante método POST.

```
<form action="/auth" method="POST">
```

Figura 98. Directiva de maquetación web para la canalización de solicitudes mediante el método POST.

2. Validación de campos

Se estableció en la Figura 99 validación obligatoria para evitar envío de datos vacíos.

```
required
```

Figura 99. Atributo de validación nativa en el frontend para campos obligatorios de autenticación.

3. Botón de acceso

Se diseñó en la Figura 100 un botón para ejecutar el proceso de autenticación.

```
<button type="submit">INGRESAR AL SISTEMA</button>
```

Figura 100. Declaración de botón de tipo submit para el disparo del formulario en el frontend

4. Diseño visual

Se aplicó en la Figura 101 una interfaz centrada con diseño oscuro institucional, utilizando colores rojo y amarillo para identidad visual del sistema.

```
display: flex; justify-content: center; align-items: center;
```

Figura 101. Propiedades CSS Flexbox para la alineación y centrado absoluto de los elementos de la interfaz.

- **Desarrollo de dashboard.html**

Se implementó una interfaz web tipo dashboard para visualizar información operativa del sistema de monitoreo térmico del Cerro Casigana.

1. Panel principal de monitoreo

En la Figura 102 se desarrolló una interfaz principal que muestra información resumida del sistema, incluyendo el número de reportes generados y el estado de almacenamiento en Azure.

```
<div class="card">  
<h3>Reportes Hoy</h3>  
<div class="number">{{ pdfs|length }}</div>
```

Figura 102. Estructura frontend para el conteo automático de elementos lógicos en el panel de control.

2. Tabla de historial de monitoreo

Se implementó una tabla dinámica, `<table>` para visualizar registros almacenados de videos térmicos, reportes PDF, fecha, hora, sector monitoreado r identificación del dron.

3. Gestión de archivos

En la Figura 103 se añadieron botones para acciones administrativas como visualizar video, descargar PDF y eliminar archivos.

```
<button class="btn-video">Ver Video</button>  
<button class="btn-pdf">Ver PDF</button>  
<button class="btn-delete">Eliminar</button>
```

Figura 103. Bloque frontend para la visualización dinámica del censo de individuos en la zona de monitoreo.

4. Integración de mapa interactivo

Se integró en la Figura 104 un mapa mediante la librería Leaflet.js para visualización geográfica del área monitoreada.

```
let map = L.map('map').setView([-1.25, -78.58], 14);
```

Figura 104. Script en JavaScript para la inicialización y centrado geográfico del mapa interactivo mediante Leaflet.

5. Gestión de sesión

Se implementó la función, function cerrarSesion(), opción de cierre de sesión para finalizar acceso seguro al sistema.

- **Desarrollo de requirements.txt**

Se implementó el archivo requirements.txt con el propósito de gestionar e instalar automáticamente las dependencias necesarias para la ejecución del sistema web, como se visualiza en la Figura 105.

Se incluyeron las siguientes librerías:

```
flask
azure-storage-blob
```

Figura 105. Estructura del archivo requirements.txt para el despliegue del backend y conectores en la nube.

- Creación del "Contenedor" en Azure Portal: Debido a un error de permisos con "Application Insights" en VS Code, en la Figura 106, fuimos directamente al Portal de Azure para crear el espacio manualmente:

1. Ingresamos a portal.azure.com.
2. Creamos un **App Service**:

- **Nombre:** uav-monitor-final.
- **Runtime Stack:** Python 3.12.
- **Región:** East US.

The screenshot displays the 'Create new App Service' form in the Azure portal. The form is organized into several sections:

- Subscription * ⓘ**: A dropdown menu showing 'Azure for Students'.
- Resource Group * ⓘ**: A dropdown menu showing 'Casigana_Resources' with a 'Create new' link below it.
- Instance Details**:
 - Name**: A text field containing 'uav-monitor-final' with a green checkmark icon to its right. Below the field, the default hostname '-g5cma0gfd6cabscr.eastus-01.azurewebsites.net' is displayed.
 - A toggle switch for 'Secure unique default hostname on.' is turned on, with a link 'More about this update ⓘ'.
- Publish ***: Radio buttons for 'Code' (selected) and 'Container'.
- Runtime stack ***: A dropdown menu showing 'Python 3.12'.
- Operating System ***: Radio buttons for 'Linux' (selected) and 'Windows'.
- Region ***: A dropdown menu showing 'East US'. Below it, an information icon ⓘ is followed by the text: 'Not finding your App Service Plan? Try a different region or select your App Service Environment.'
- Pricing plans**:
 - A link 'Learn more ⓘ' is provided.
 - Linux Plan (East US) * ⓘ**: A dropdown menu showing 'Plan-Monitoreo-UAV (F1)' with a 'Create new' link below it.
 - Pricing plan**: The selected plan is 'Free F1 (Shared infrastructure)'.

Figura 106. Parametrización de recursos, entorno de ejecución y plan de facturación en Azure App Service.

3. **Configuración de Monitoreo:** En la Figura 107, en la pestaña de monitoreo, marcamos "No" en Application Insights para evitar conflictos de registro de suscripción.

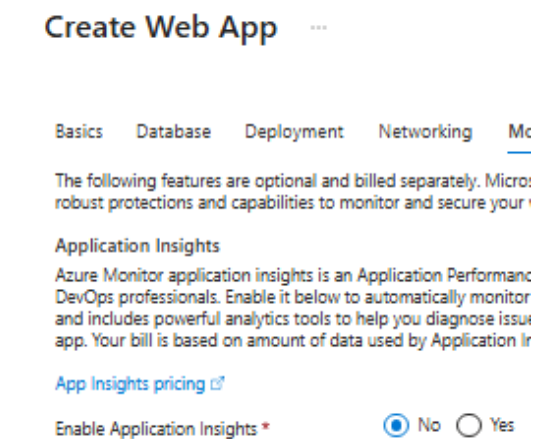


Figura 107. Exclusión voluntaria del componente Application Insights durante el aprovisionamiento de la Web App.

- Vinculación de VS Code con Azure: Una vez creado el servidor vacío en la nube, como en la Figura 107, regresamos al editor e instalamos Azure en Visual code:
 1. Abrimos la extensión de **Azure** en VS Code.
 2. Usamos el botón de **Refresh** para que apareciera la nueva App uav-monitor-final en la lista de recursos.
 3. Iniciamos sesión con tu cuenta de **Azure for Students**.

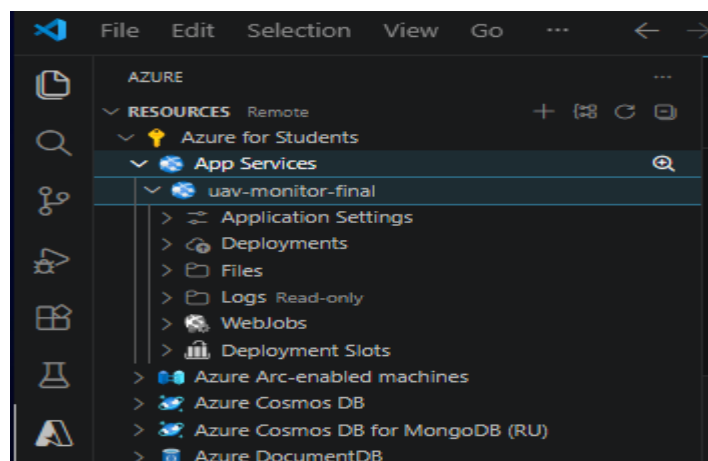


Figura 108. Validación exitosa de la arquitectura y resumen de aprovisionamiento de la Web App en Azure.

- El Despliegue (Deploy): En la Figura 109, este fue el momento en que enviamos los archivos:

1. Usamos el atajo **Ctrl + Shift + P** para abrir la paleta de comandos.
2. Seleccionamos: **Azure App Service: Deploy to Web App...**

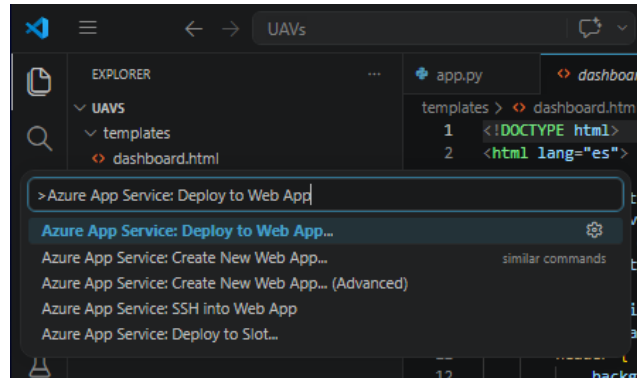


Figura 109. Ejecución del comando de despliegue directo a Azure App Service desde Visual Studio Code.

3. Como en la Figura 110 , elegimos la carpeta local UAVS.

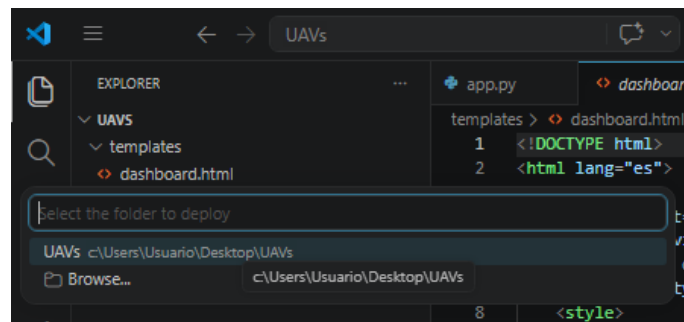


Figura 110. Interfaz de selección y validación de la carpeta raíz del proyecto para el empaquetado del software.

4. Elegimos como destino uav-monitor-final, asi como se muestra en la Figura 111.

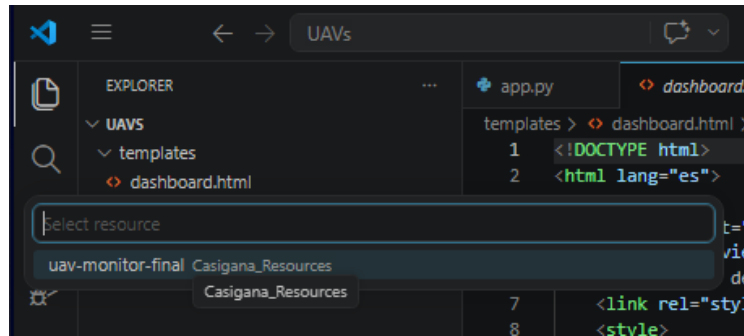


Figura 111. Resolución del recurso remoto 'uav-monitor-final' para el direccionamiento del paquete de despliegue.

5. **Build en el Servidor:** En la Figura 112, cuando VS Code preguntó si queríamos actualizar la configuración para ejecutar comandos de construcción en el servidor, seleccionamos **"Yes"**. Esto permitió que Azure instalara las librerías por sí mismo.

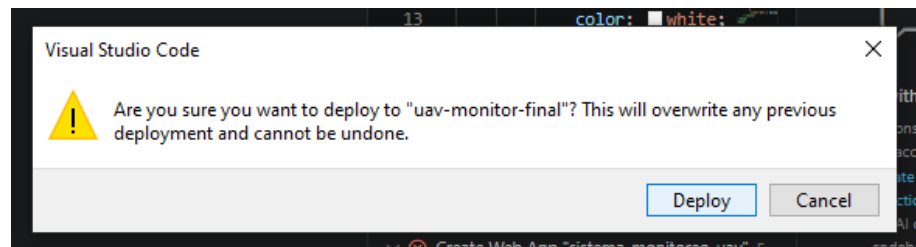


Figura 112. Ventana emergente de confirmación de seguridad y validación de sobrescritura previa al despliegue en producción.

- Orquestación y Arranque (Startup): En la Figura 113, Azure recibió los archivos, pero necesitaba saber cómo encender el motor:
 1. Azure detectó el archivo requirements.txt e instaló automáticamente Flask y las herramientas de Azure.
 2. El servidor utilizó **Gunicorn** (un servidor web de producción para Python) para ejecutar tu app.py.
 3. Tras unos 2 o 3 minutos de proceso, el despliegue marcó **"Succeeded"**.

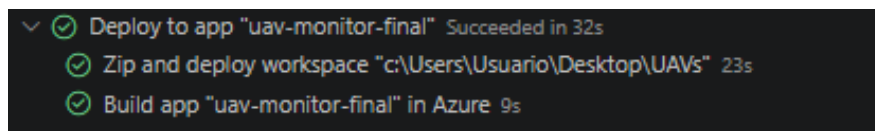


Figura 113. Logs de estado del IDE que validan la finalización del despliegue en Azure App Service.

- **Verificación Final**

1. Entramos a la URL pública generada por Azure, como se muestra en la Figura 114.
2. Comprobamos que el diseño oscuro y el panel de login de **Casigana Fire Watch** cargaran correctamente.
3. Probamos la conexión con el **Blob Storage** para asegurar que los videos y PDFs del Cerro Casigana fueran visibles.

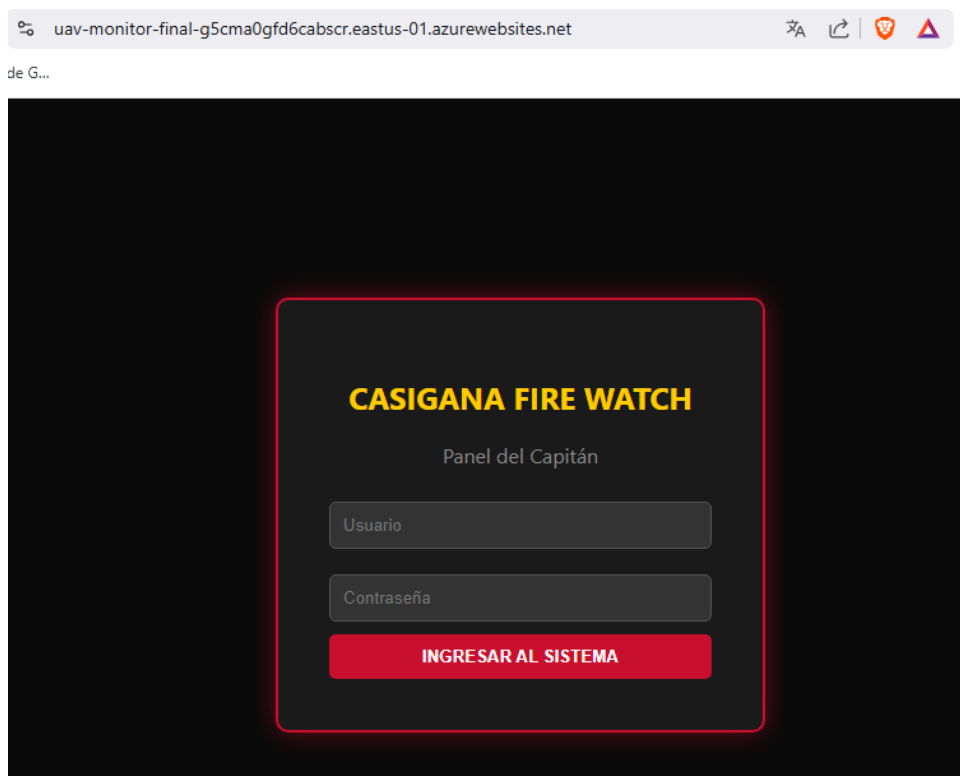


Figura 114. Interfaz gráfica de autenticación del operador corriendo en producción en el servidor en la nube.

3.1.29 Creación y configuración de la página web remota en VSCode

El desarrollo de la interfaz web del sistema de monitoreo se realizó utilizando el entorno de programación **Visual Studio Code**, seleccionado por su flexibilidad, soporte para múltiples lenguajes y facilidad de integración con herramientas de desarrollo web y visión por computadora.

El sistema fue implementado bajo una arquitectura cliente-servidor, empleando las siguientes tecnologías:

- **Python** como lenguaje principal de programación
- **Flask** como framework backend para la gestión del servidor web
- **HTML5** para la estructura de la interfaz
- **CSS3** para el diseño visual
- **JavaScript** para la interacción dinámica con el usuario

Esta combinación permite construir una interfaz ligera, funcional y capaz de operar en tiempo real como se visualiza en la Figura 115.

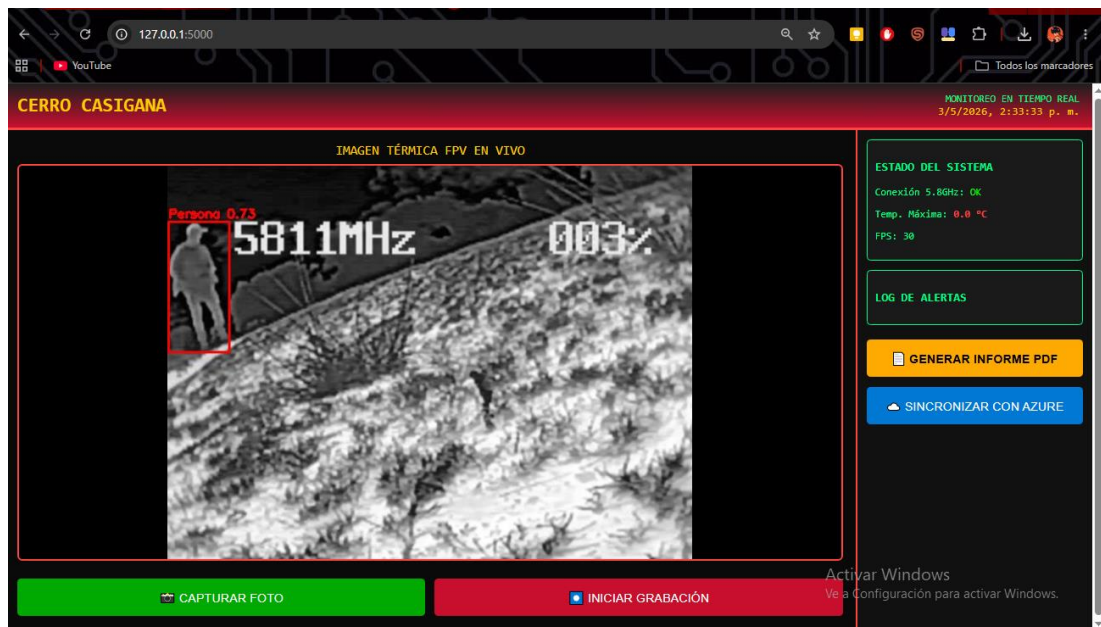


Figura 115. Panel de control centralizado (Dashboard) de la plataforma en pleno procesamiento de analítica de video térmico y telemetría de UAV.

En la Figura 116, el sistema fue organizado bajo una estructura modular que facilita su mantenimiento y escalabilidad:

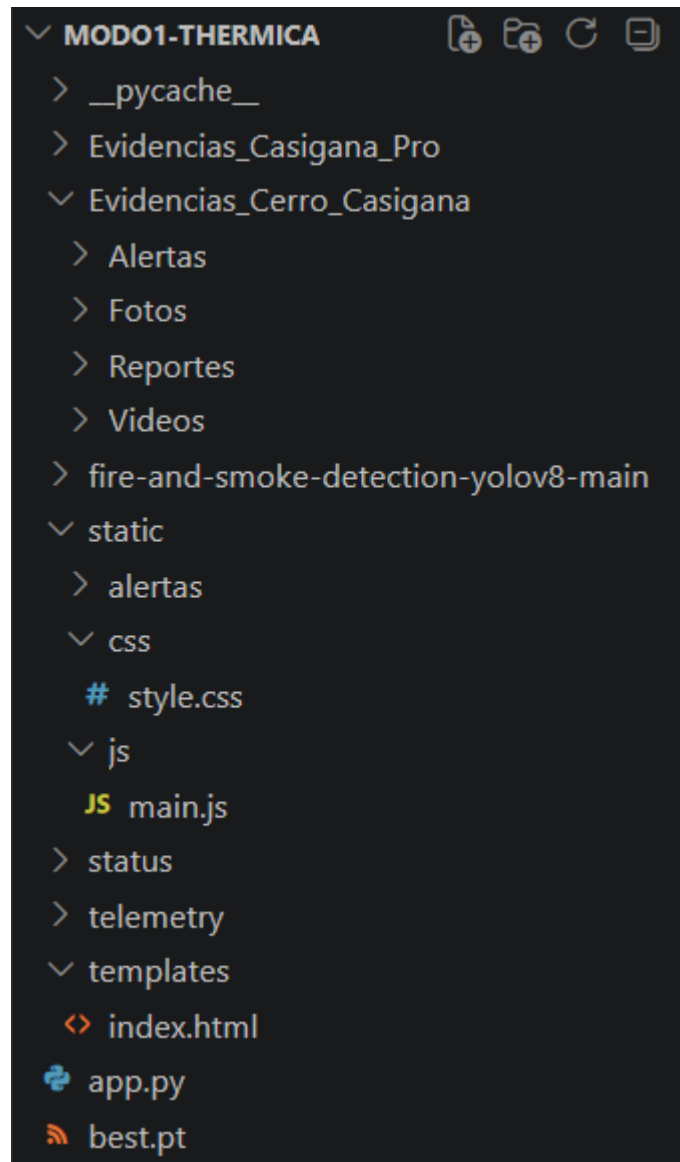


Figura 116. Estructura jerárquica de directorios y distribución de módulos de software del sistema base.

Cada componente cumple una función específica:

- **app.py:** contiene la lógica del servidor, procesamiento de video y rutas web
- **templates/index.html:** define la interfaz principal del usuario
- **static/:** reservado para archivos de estilos y scripts
- **modelos (.pt):** utilizados para detección mediante inteligencia artificial

- **Evidencias_Cerro_Casigana/**: almacenamiento de resultados (imágenes, videos y reportes)

El sistema fue desarrollado en Python integrando visión computacional, almacenamiento en la nube y generación automática de reportes para el monitoreo térmico del Cerro Casigana.

1. Inicialización del sistema

En la Figura 117, se configuró la aplicación web mediante Flask y se establecieron directorios locales para almacenamiento de evidencias de fotografías, videos y reportes técnicos.

```
app = Flask(__name__)  
os.makedirs(os.path.join(BASE_FOLDER, folder), exist_ok=True)
```

Figura 117. Rutina de inicialización del backend en Python para la verificación y creación automatizada de carpetas de almacenamiento.

2. Modelo de detección con inteligencia artificial

Se implementaron en la Figura 118, dos modelos YOLO para detección automática como el modelo personalizado para detección de fuego y humo de igual manera YOLOv8 general para detección de personas.

```
yolo_fire = YOLO("best.pt")  
yolo_general = YOLO("yolov8n.pt")
```

Figura 118. Líneas de código destinadas a la carga paralela del modelo especializado (incendios) y el modelo generalista (personas) de YOLOv8.

3. Procesamiento de video en tiempo real

En la Figura 119, el sistema procesa video térmico proveniente del dron y mejora la imagen mediante escala de grises, ecualización de histograma y filtro Gaussiano.

```
gray = cv2.equalizeHist(gray)
gray = cv2.GaussianBlur(gray, (3, 3), 0)
```

Figura 119. Líneas de código destinadas al preprocesamiento de la matriz de imagen mediante ecualización y filtrado espacial.

4. Sistema inteligente de alertas

Cuando se detecta un evento crítico, el sistema genera automáticamente alertas y almacena evidencia fotográfica, como se muestra en la Figura 120.

```
save_alert(frame, alert_type, confidence)
```

Figura 120. Desarrollo algorítmico para la generación de marcas de tiempo y guardado físico de fotogramas de alerta

5. Grabación de evidencia

En la Figura 121, se implementó control de grabación automática/manual para almacenamiento de video.

```
video_writer = cv2.VideoWriter(...)
```

Figura 121. Línea de código destinada a la inicialización del objeto codificador de video para la grabación de secuencias multimedia.

6. Generación automática de reportes PDF

En la Figura 122, el sistema genera informes técnicos automáticos incluyendo fecha, hora de vuelo, sector monitoreado, coordenadas, evidencias fotográficas y observaciones técnicas.

```
pdf = TechnicalPDF()  
pdf.output(pdf_path)
```

Figura 122. Líneas de código destinadas a la instanciación de la estructura del reporte y renderizado final del archivo PDF.

7. Sincronización con Azure Cloud

En la Figura 123, se implementó sincronización automática hacia Azure Blob Storage para respaldo en nube.

```
upload_to_azure(file_path, container_name, prefix="Dron1_")
```

Figura 123. Invocación de la rutina algorítmica para la transferencia y respaldo de evidencias en contenedores cloud de Microsoft Azure.

8. Streaming web en tiempo real

En la Figura 124, se desarrolló transmisión de video térmico procesado en tiempo real mediante Flask.

```
@app.route('/video_thermal')
```

Figura 124. Definición de la ruta de red para la distribución de la matriz de video mediante protocolo HTTP en el backend.

El funcionamiento del sistema web se basa en la integración de todos sus componentes mediante el siguiente flujo:

1. La cámara térmica (o video de prueba) genera frames
2. OpenCV procesa las imágenes
3. Los algoritmos de detección analizan el contenido
4. Flask transmite los frames procesados
5. El navegador web recibe y muestra el video
6. El usuario interactúa mediante la interfaz

7. Las acciones del usuario son enviadas nuevamente al servidor

Este flujo garantiza un sistema interactivo en tiempo real, permitiendo supervisión remota eficiente.

3.1.30 Integración del sistema completo

La integración del sistema completo de monitoreo térmico se fundamenta en la adquisición, transmisión, procesamiento y almacenamiento de datos en tiempo real. El sistema inicia con la captura de información térmica mediante una cámara FPV instalada en el UAV, la cual transmite video analógico a través de un módulo de transmisión de 5.8 GHz. Posteriormente, la señal es recibida por un receptor de video configurado en la misma frecuencia dentro de la estación terrestre, permitiendo el ingreso del flujo visual al sistema computacional.

Una vez recibidos los datos, el sistema procesa el video en una interfaz web local desarrollada para monitoreo en tiempo real, donde se integran funcionalidades como visualización de imagen térmica, captura de evidencias, grabación de video, generación de reportes en formato PDF y ejecución de modelos de visión por computadora basados en YOLO para la detección automática de fuego, humo y personas.

Adicionalmente, el sistema incorpora sincronización automática con servicios de almacenamiento en la nube mediante contenedores de Azure, permitiendo el respaldo de evidencias generadas y reportes técnicos. Finalmente, se dispone de una interfaz web administrativa destinada al personal autorizado del Cuerpo de Bomberos Ambato, la cual facilita la visualización histórica de monitoreos, gestión documental y consulta geoespacial de eventos registrados en el sector del Cerro Casigana.

Con esta arquitectura se establece un flujo integral de datos desde la adquisición térmica aérea hasta la gestión centralizada de información para apoyo en operaciones de vigilancia y respuesta temprana como se muestra en la Figura 125.

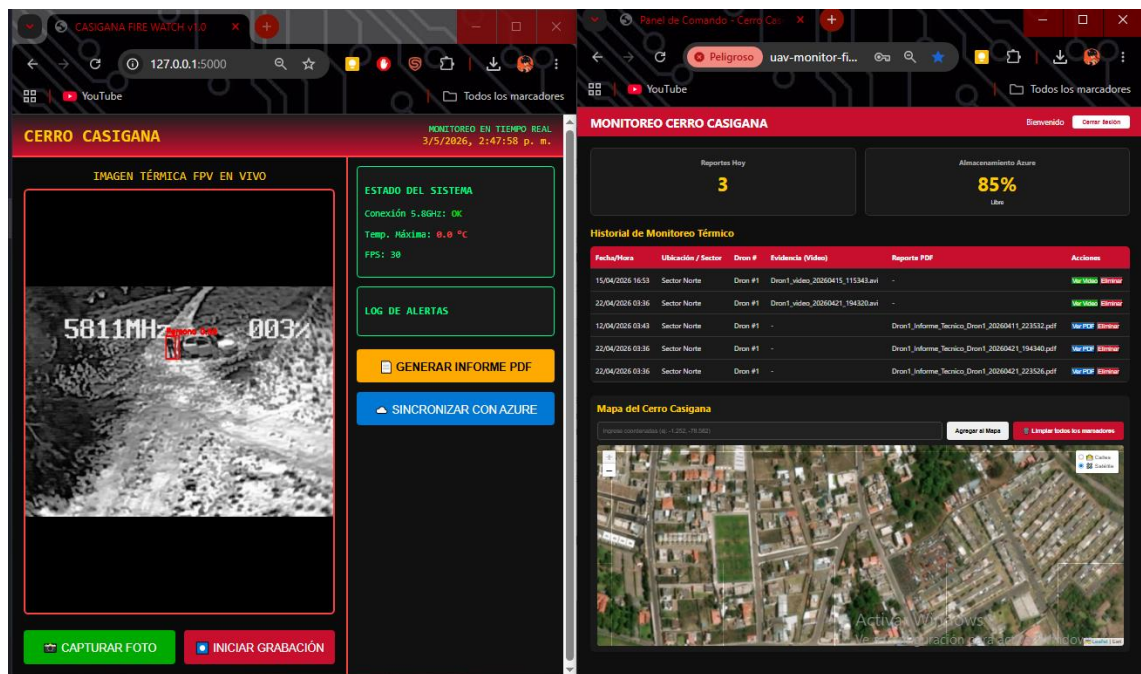


Figura 125. Evidencia de interoperabilidad híbrida y sincronización de datos entre el entorno local en el borde (Edge) y el servidor web elástico en la nube (Cloud).

3.1.31 Planteamiento del espacio para pruebas

Las pruebas experimentales del sistema fueron ejecutadas en áreas previamente definidas mediante criterios técnicos y operativos proporcionados por el Cuerpo de Bomberos de Ambato. En función de esta información, se seleccionaron puntos estratégicos ubicados en el Cerro Casigana, los cuales fueron segmentados en dos zonas de análisis: Zona 1 y Zona 2.

Estas áreas fueron determinadas en base a su alta susceptibilidad a la presencia de indicios de incendios forestales, considerando factores como la cobertura vegetal, condiciones climáticas locales y antecedentes históricos de eventos. La delimitación de dichas zonas permitió establecer un entorno controlado para la validación del sistema, garantizando la recolección de datos representativos y relevantes para el análisis del desempeño del prototipo.

Zona 1

La Zona 1 corresponde a un punto de evaluación georreferenciado ubicado en las coordenadas $1^{\circ}15'47.22''$ S y $78^{\circ}38'53.06''$ W, a una altitud aproximada de 2.940 metros sobre el nivel del mar como se muestra en la Figura 123. La ubicación permitió desarrollar pruebas en un entorno con condiciones reales de operación, facilitando la evaluación del sistema en escenarios donde la variabilidad térmica y la presencia de vegetación pueden influir en la precisión de los sensores.



Figura 126. Zona 1

Zona 2

La Zona 2 fue establecida en las coordenadas $1^{\circ}15'53.96''$ S y $78^{\circ}38'53.20''$ W, a una altitud aproximada de 2.964 metros sobre el nivel del mar como se muestra en la Figura 124, constituyéndose como un punto de prueba orientado a la validación comparativa del sistema. Esta ubicación presenta ligeras variaciones en elevación respecto a la Zona 1. El área se caracteriza por presentar unas condiciones ambientales variables, factores que inciden directamente en la detección térmica durante la operación.

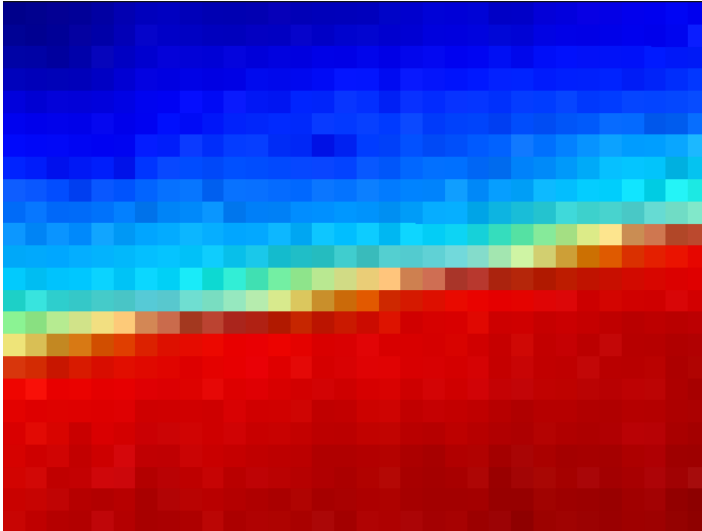


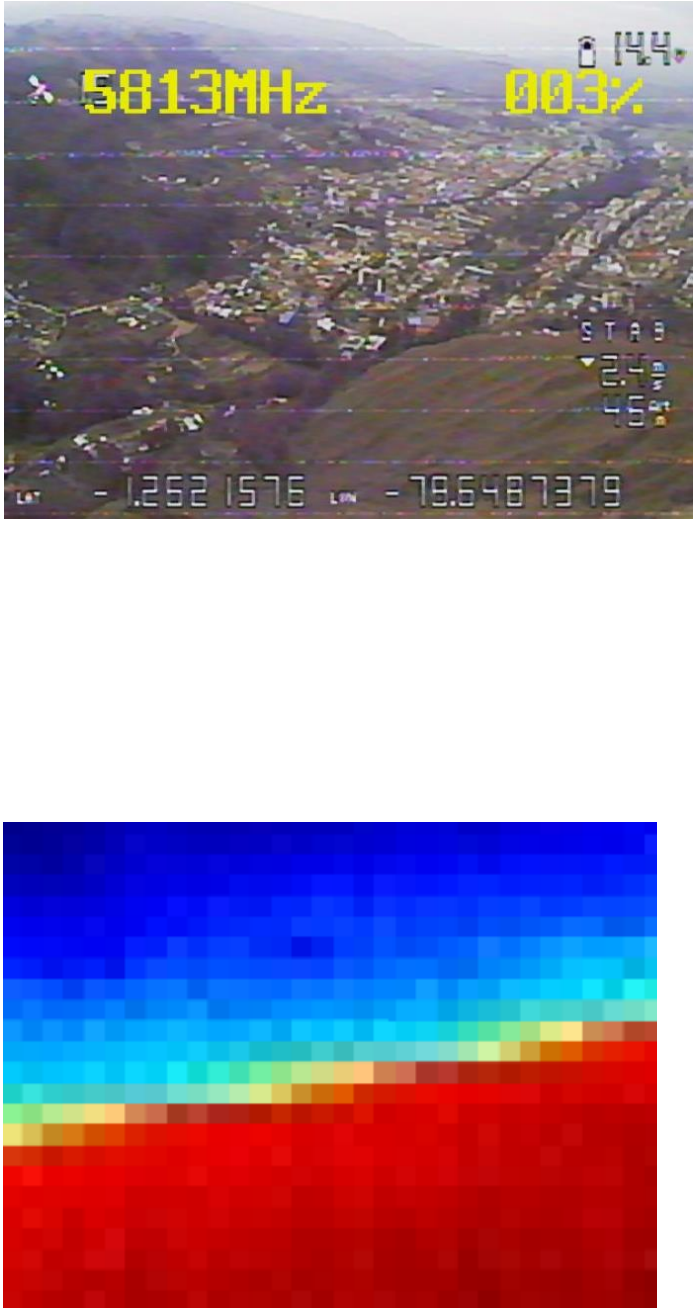
Figura 127. Zona 2

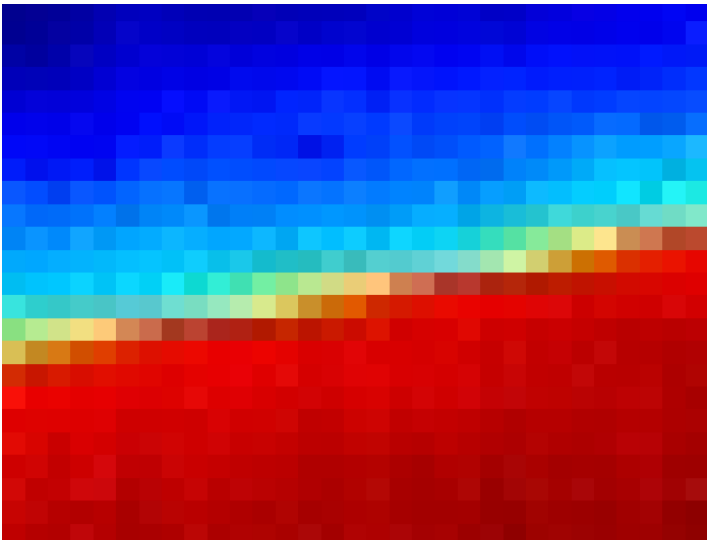
3.1.32 Pruebas del sensor MLX90640 y detección de calor

En la Tabla 18 se presentan las pruebas experimentales del sensor térmico MLX90640, orientadas a evaluar su desempeño en la detección de fuentes de calor dentro del sistema de monitoreo para la prevención de incendios en el cerro Casigana. El análisis se estructura en tres escenarios operativos que reproducen condiciones reales de vuelo, considerando variaciones en altitud, dinámica del UAV y carga eléctrica del sistema. Se examinan parámetros críticos como la estabilidad en la adquisición de datos a través del bus I2C, la continuidad y actualización de los frames térmicos, así como la influencia de interferencias electromagnéticas y variaciones de voltaje en la integridad de la señal.

Tabla 18. Evaluación del enlace FPV y comportamiento del sensor térmico MLX90640

Carácterística de vuelo	Cámara FPV - Sensor Térmico MLX90640
miércoles, 25 de marzo de 2026, 15:47:44 En el Escenario 1, a una altura de 63.4 m, el sistema de monitoreo para la prevención de incendios en el cerro Casigana presenta en la imagen superior un enlace FPV activo en 5813 MHz, lo que confirma la transmisión en tiempo real; sin embargo, el bajo porcentaje de señal evidencia una degradación del enlace, asociada a distancia, interferencias o limitaciones de potencia. En contraste, la imagen térmica inferior muestra un patrón uniforme sin variación, indicando un congelamiento del frame debido a una interrupción en la adquisición de datos del sensor MLX90640. Como resultado, el ESP32 mantiene el último dato válido en su buffer, impidiendo la detección térmica en tiempo real y comprometiendo la identificación oportuna de focos de calor.	 

Característica de vuelo	Cámara FPV - Sensor Térmico MLX90640
miércoles, 25 de marzo de 2026, 15:48:58 En el Escenario 2, correspondiente a la dinámica de descenso a una altura de 47.5 m, se analiza la estabilidad eléctrica del sistema. Durante esta fase se observa una recuperación del voltaje de la batería (de 13.4 V a 14.4 V), fenómeno conocido como voltage recovery, debido a la disminución en la demanda de corriente de los motores. En la imagen RGB se evidencian líneas horizontales asociadas a ruido de conmutación generado por los ESCs al variar sus ciclos de trabajo; este ruido, en ausencia de un adecuado filtrado (condensador de bajo ESR), se acopla al sensor CMOS, degradando la calidad de la señal de video. En cuanto al sensor térmico MLX90640, estas perturbaciones eléctricas pueden afectar la estabilidad de la comunicación I2C, generando lecturas inestables o pérdida temporal de datos de esta manera manteniendo el congelamiento del frame.	 The top image is an RGB FPV view of a city with overlaid telemetry: 5813MHz, 14.4V, 003%, and coordinates. The bottom image is a thermal sensor frame showing a color gradient from blue to red.

Car�teristica de vuelo	Cámara FPV - Sensor Térmico MLX90640
miércoles, 25 de marzo de 2026, 15:52:25 En el Escenario 3, a una altura de 27.3 m, se evidencia una falla total en la imagen. En la vista RGB aparece “nieve” (ruido blanco), lo que indica pérdida de la señal de video proveniente de la cámara. Sin embargo, el OSD (datos en pantalla) se mantiene visible, confirmando que el transmisor (VTX) y el controlador de vuelo continúan operativos. Por lo tanto, la falla se localiza en la cámara o en la transmisión de la señal CVBS hacia el VTX. Como consecuencia, se pierde completamente la referencia visual del entorno. En cuanto al sensor térmico MLX90640, aunque puede seguir funcionando, la ausencia de imagen RGB impide validar y ubicar con precisión los focos de calor, reduciendo la efectividad del sistema de monitoreo.	 

3.1.33 Pruebas del sistema de transmisión de la CÁMARA TÉRMICA FPV

Las pruebas iniciales fueron ejecutadas el día jueves 30 de marzo de 2026 a las 11:00, en la Zona 1 del cerro Casigana. Durante esta fase se realizó el levantamiento de evidencias operativas mediante grabaciones y capturas fotográficas correspondientes al vuelo efectuado en dicha área de estudio. Para el desarrollo de la prueba se consideraron múltiples factores de riesgo y limitaciones operacionales, entre ellos la presencia de obstáculos como torres de red móvil, postes eléctricos y antenas sectoriales, así como obstáculos naturales relacionados con la vegetación y condiciones climáticas variables. En función de estos condicionantes, se determinó ejecutar el vuelo en modalidad manual, descartando temporalmente la navegación automática para garantizar mayor control y seguridad operacional del UAV. En la Tabla 19 se presentan las evidencias recopiladas y el análisis técnico obtenido durante la ejecución del primer vuelo correspondiente a la Zona 1.

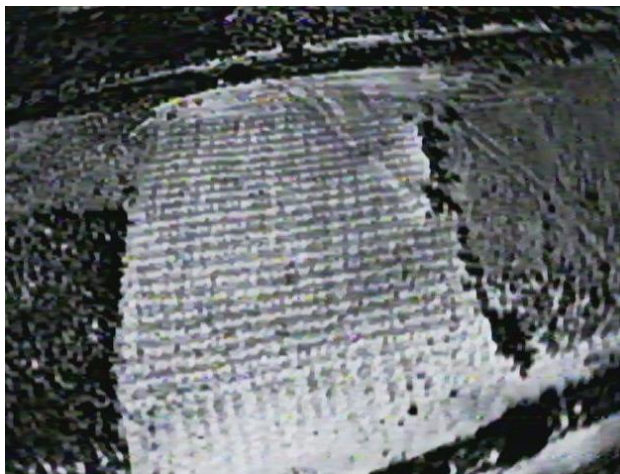
Tabla 19. Resultados experimentales del sistema de monitoreo térmico FPV

Análisis de resultado	Captura de la cámara térmica FPV
Durante la fase inicial de despegue del UAV equipado con cámara térmica, se evidenciaron interferencias en la transmisión y recepción de señal. Esta afectación se presentó debido a la ubicación del punto de operación correspondiente a la Zona 1, caracterizada por la proximidad a diversos factores de interferencia previamente identificados, tales como infraestructura de telecomunicaciones. La presencia de estos elementos generó alteraciones en la estabilidad del sistema de comunicación y monitoreo durante el despegue.	

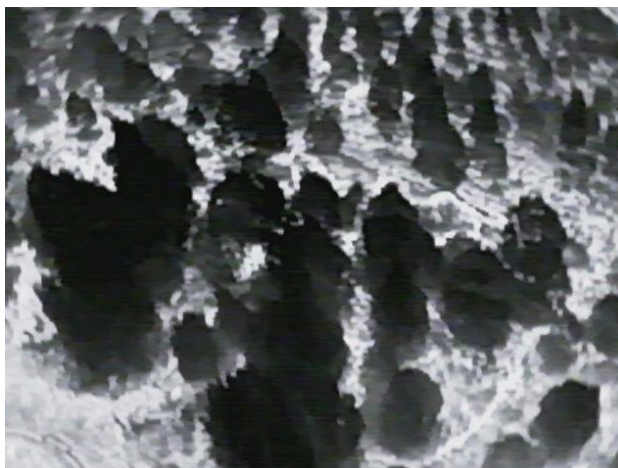
En esta etapa operativa, el UAV alcanzó una altura aproximada de 45 metros, permitiendo optimizar el campo de visión de la cámara térmica. A dicha altura se obtuvo una mejor captación y visualización de puntos de calor, facilitando la identificación de variaciones térmicas dentro del área monitoreada y mejorando la calidad de los registros obtenidos durante el vuelo.



En la presente imagen se identifica un sector con vegetación seca dentro del cerro Casigana. Mediante el análisis térmico, la cámara registró una mayor intensidad en la escala de grises en esta zona, lo que indica una concentración elevada de temperatura superficial. Este comportamiento térmico está asociado a la baja humedad presente en la vegetación seca, permitiendo una diferenciación más precisa de áreas con mayor acumulación de calor dentro del terreno monitoreado.



En el sector correspondiente a la región boscosa se observa una variación en la resolución y distribución de la escala de grises, donde gran parte del terreno presenta tonalidades de menor intensidad térmica. Este comportamiento corresponde principalmente a zonas con cobertura vegetal, específicamente árboles, los cuales registran temperaturas superficiales inferiores en comparación con áreas expuestas o de vegetación seca, permitiendo una diferenciación térmica clara dentro del análisis realizado.

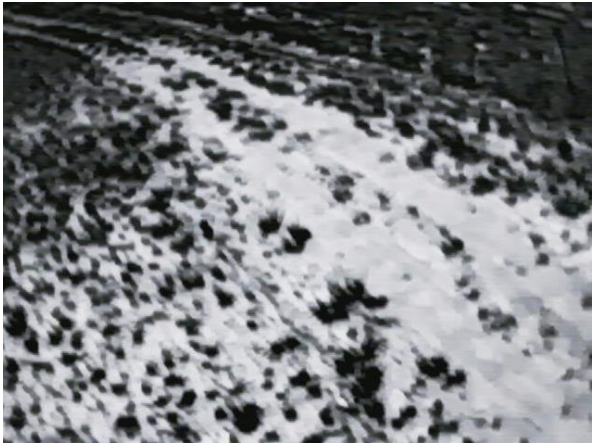


Durante la fase de retorno del UAV se evidenció un incremento en la distorsión de la señal de transmisión de video y comunicación. Esta afectación se atribuye principalmente a la proximidad del punto de vuelo respecto a infraestructura de telecomunicaciones, las cuales generaron interferencias electromagnéticas que impactaron la estabilidad operativa del sistema durante el retorno.

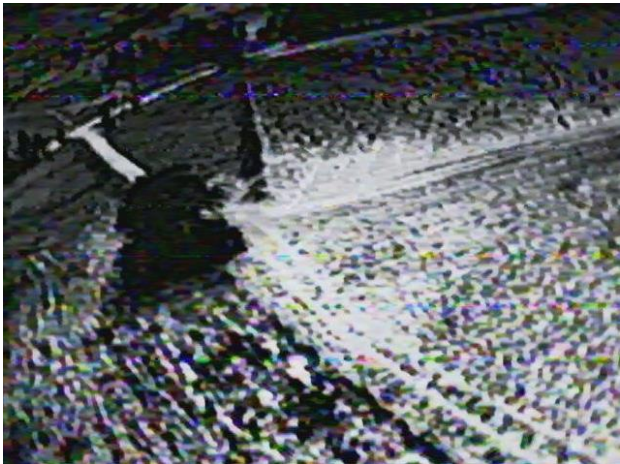
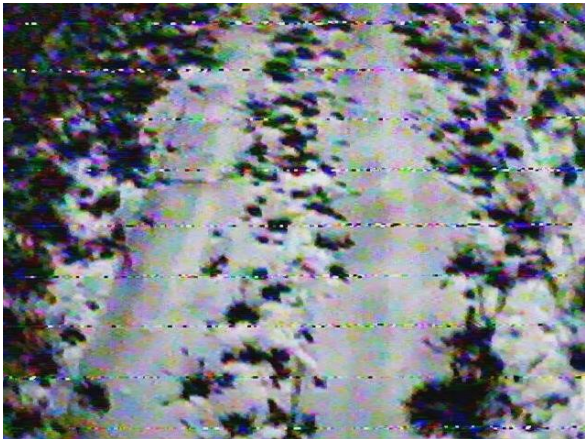


Las pruebas correspondientes a la Zona 2 fueron ejecutadas el día jueves 30 de marzo de 2026 a las 11:30. Durante esta fase se recopilaban evidencias operativas mediante grabaciones y capturas fotográficas del vuelo realizado en dicha área. Para la planificación y ejecución de la prueba se consideraron diversos factores de riesgo y limitaciones operacionales, entre ellos la presencia de obstáculos artificiales como torres de red móvil, postes eléctricos y antenas sectoriales, así como elementos naturales relacionados con la vegetación y condiciones climáticas del entorno del Cerro Casigana. Debido a estas condiciones, se optó por realizar el vuelo en modalidad manual en lugar de un vuelo automático, con el fin de mantener un mayor control operativo y garantizar la seguridad del UAV. En la Tabla 20 se presentan las evidencias obtenidas y el análisis técnico correspondiente al vuelo ejecutado en la Zona 2.

Tabla 20. Resultados operativos del sistema de cámara térmica FPV en la Zona 2

Análisis de resultado	Captura de la cámara térmica FPV
Durante la fase de despegue del UAV en la Zona 2, se evidenció una transmisión estable de video proveniente de la cámara térmica, sin registrar interferencias significativas en la señal. Esta condición permitió una adecuada recolección de datos y monitoreo en tiempo real, favoreciendo el desarrollo normal de la operación aérea dentro del área de estudio.	

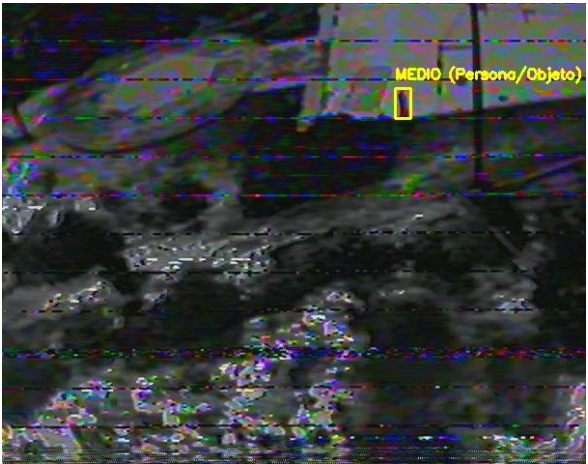
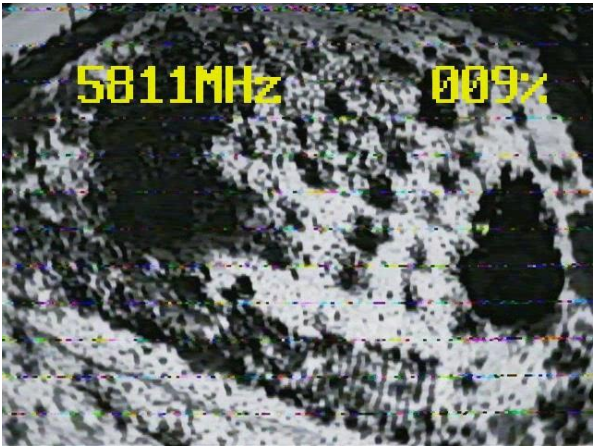
En esta captura, el UAV se encuentra sobrevolando a una altura aproximada de 30 metros por encima de un árbol de referencia dentro del área monitoreada. En el entorno se identifican zonas de terreno seco, evidenciadas mediante una mayor intensidad en la escala de grises registrada por la cámara térmica, lo cual indica temperaturas superficiales más elevadas en comparación con áreas con cobertura vegetal.	
En la presente imagen se observa una variación en el escalamiento de grises, producto de la coexistencia de áreas de terreno seco y zonas con cobertura vegetal dentro del área analizada. Esta diferencia térmica permitió identificar contrastes de temperatura superficial entre ambos sectores. Adicionalmente, durante la captura no se registraron interferencias en la transmisión de video de la cámara térmica, garantizando una visualización estable y una adecuada obtención de datos.	

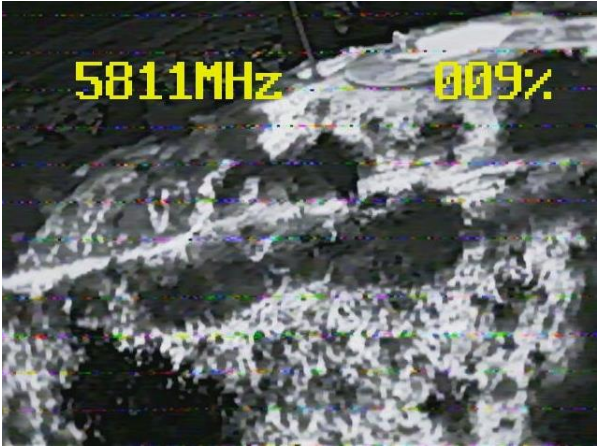
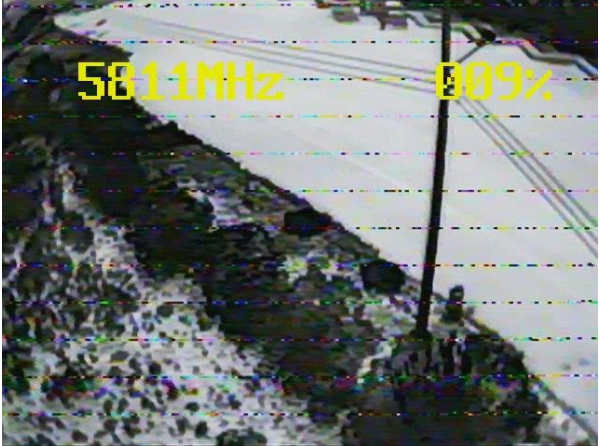
A una altitud aproximada de 50 metros se obtuvo una visualización más amplia del área monitoreada, permitiendo identificar una mayor concentración de cobertura vegetal en la parte superior de la imagen y zonas de terreno seco en la parte inferior. Esta distribución generó un contraste térmico evidente, reflejado en un cambio significativo dentro de la escala de grises registrada por la cámara térmica, facilitando la diferenciación entre ambos tipos de superficie.	
Durante la fase de retorno en esta zona, la transmisión de video presentó ligeras alteraciones y presencia de ruido en la señal. Este comportamiento se asocia a la disminución progresiva del nivel de energía del UAV, lo cual puede afectar el rendimiento de los sistemas de transmisión y estabilidad operativa en los minutos finales del vuelo.	

Las siguientes pruebas fueron ejecutadas el 4 de abril de 2026 a las 12:00 en la Zona 1 del cerro Casigana. Al igual que en las pruebas anteriores, el vuelo se realizó de forma manual debido a las condiciones operacionales y características del entorno. Durante esta operación, el UAV mantuvo una altitud aproximada de 50 metros y registró un tiempo total de vuelo de 2 minutos con 45 segundos. En la Tabla 21 se presentan las capturas obtenidas y el análisis correspondiente al segundo vuelo realizado en la Zona 1.

Tabla 21. Análisis de detección térmica durante el segundo vuelo en la Zona 1

Análisis de resultado	Captura de la cámara térmica FPV
Durante esta operación, al momento del despegue se evidenció una mejor resolución en la imagen capturada por la cámara térmica. Asimismo, se observó una mayor definición en el escalamiento de grises, lo que permitió una representación térmica más precisa del entorno. Esta mejora se atribuye al procesamiento y filtrado aplicado por el sistema.	
A una altitud aproximada de 50 metros respecto al punto de despegue, se evidenció un incremento en la interferencia de la transmisión de video. Esta alteración se produjo debido a la proximidad del UAV con los factores de interferencia previamente identificados, tales como infraestructura de telecomunicaciones y otros elementos del entorno que afectan la estabilidad de la señal durante la operación.	

Durante el recorrido del UAV, el sistema permitió la detección de personas u objetos mediante la cámara térmica a una altura aproximada de 50 metros, alcanzando una eficiencia estimada del 50 %. No obstante, debido a la altura operativa y a las limitaciones propias de resolución de la cámara térmica, la calidad visual de la imagen presentó una menor definición, afectando parcialmente la precisión en la identificación de objetivos.	
En esta área de visualización, la cámara térmica logró cubrir una porción considerable del terreno a una altitud aproximada de 50 metros durante la trayectoria del UAV. Dentro del análisis térmico se identifica una predominancia en el escalamiento de grises sobre zonas de terreno seco, evidenciando una mayor concentración de temperatura superficial en comparación con otras áreas del entorno monitoreado.	

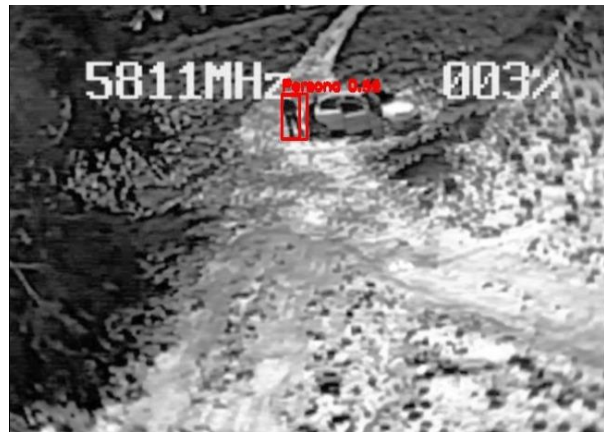
En esta sección del área monitoreada predomina la cobertura vegetal, la cual presenta una menor intensidad en el escalamiento de grises a la misma altura previamente mencionada. Este comportamiento térmico corresponde a temperaturas superficiales más bajas asociadas a la vegetación. Adicionalmente, durante esta fase del vuelo se mantuvo una transmisión de video estable, permitiendo una visualización continua y adecuada de los datos capturados por la cámara térmica.	
Al finalizar la trayectoria y durante el descenso del UAV para su retorno a la estación terrestre, la transmisión de video comenzó a presentar fallas progresivas hasta evidenciar una pérdida parcial de estabilidad. Este comportamiento se atribuye al acercamiento del UAV hacia la zona donde se concentran los principales factores de interferencia que afectan la transmisión del sistema, tales como infraestructura de telecomunicaciones.	

Por otra parte, las pruebas correspondientes a la Zona 2 fueron realizadas el 4 de abril de 2026 a las 12:30. Al igual que en las operaciones previas, el vuelo se ejecutó de forma manual, manteniendo una altura aproximada de 50 metros. La duración total de esta prueba fue de 1 minuto con 25 segundos. En la Tabla 22 se presentan las capturas obtenidas y el análisis técnico correspondiente al segundo vuelo desarrollado en la Zona 2.

Tabla 22. Evaluación del sistema térmico FPV durante el segundo vuelo en la Zona 2

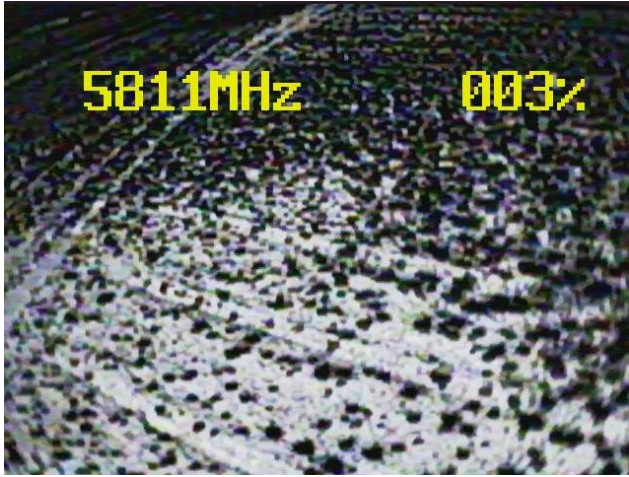
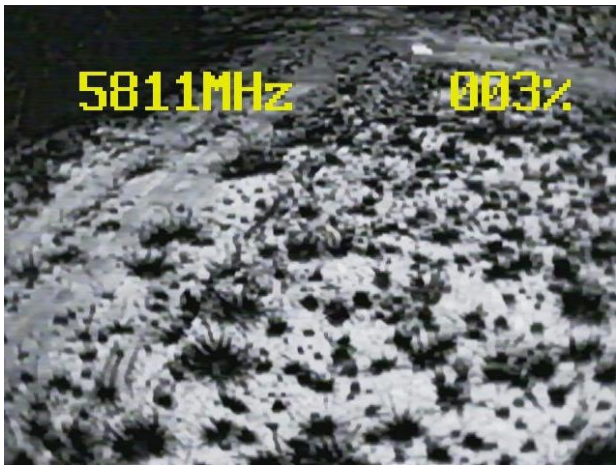
Análisis de resultado	Captura de la cámara térmica FPV
Al momento del despegue se verificó que tanto el sistema como el UAV operaban en condiciones óptimas de funcionamiento. Esto se evidenció mediante la correcta transmisión de video y la capacidad de la cámara térmica para identificar una persona a corta distancia, permitiendo validar el adecuado desempeño del sistema previo al inicio de la trayectoria programada de monitoreo.	
Al iniciar el vuelo a una altura aproximada de 20 metros, el UAV mantuvo una transmisión de video estable hacia la estación terrestre. Durante esta fase, la cámara térmica logró captar adecuadamente las variaciones en el escalamiento de grises, permitiendo una correcta visualización de las diferencias térmicas presentes en el área monitoreada.	

En esta sección de la imagen captada por la cámara térmica, el sistema presentó una adecuada resolución de video pese a operar a una altura aproximada de 40 metros. Bajo estas condiciones, se logró la detección de personas u objetos dentro del área monitoreada.



La variación térmica existente entre la cobertura vegetal ubicada en la parte izquierda y el cultivo seco presente en la parte derecha, junto con la presencia de focos de calor de mayor intensidad en el área, generó interferencia en la detección precisa de la pequeña fogata simulada bajo condiciones controladas. Esta fuente térmica, ubicada junto a un árbol, presentó menor diferenciación dentro del análisis realizado a una altura aproximada de 50 metros, dificultando parcialmente su identificación debido al contraste térmico del entorno.



En esta sección de la zona monitoreada, la transmisión de video se mantuvo estable durante la operación. Sin embargo, la calidad de pixelación de la imagen presentó variaciones en el escalamiento de grises, influenciadas por las condiciones climáticas del momento, las cuales favorecieron la presencia de focos de calor de mayor intensidad en determinadas áreas del terreno, generando contrastes térmicos más marcados dentro del análisis.	
Durante la fase de retorno del UAV hacia la estación terrestre, se logró visualizar una pequeña fogata ubicada en la parte superior derecha de la imagen capturada. No obstante, el sistema no efectuó su identificación automática, debido a que el modelo implementado fue pre entrenado principalmente para la detección de eventos de fuego y humo de mayor magnitud, limitando su sensibilidad frente a fuentes térmicas de menor escala.	

Con el fin de validar el desempeño del UAV, se ejecutaron pruebas de vuelo en condiciones operativas reales, evaluando parámetros relacionados con la estabilidad de vuelo, altitud de operación, nivel de interferencia y autonomía. Esta validación permitió comprobar la capacidad del sistema para mantener una operación confiable durante las tareas de monitoreo. Los parámetros registrados se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Validación de vuelo del UAV.

Parámetro	Zona 1 (Vuelo 1)	Zona 2 (Vuelo 1)	Zona 1 (Vuelo 2)	Zona 2 (Vuelo2)
Fecha	30/03/26	30/03/26	04/04/26	04/04/26
Hora	11:00 am	11:30 am	12:00 pm	12:30 pm
Altura	45 m	30-50 m	50 m	20-50m
Interferencia	40%	15%	40%	15%
Tiempo de vuelo	2'20"	1'05"	2'45"	1'25"

A continuación, se realizó diferentes pruebas del sistema de monitorio para la identificación mediante videos que cumplan con las funciones presentes de este proyecto en la cual consiste detectar fuego/humo en incendios forestales reales y personas u objetos mediante el uso de uavs como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Resultados experimentales del sistema mediante videos de simulación

Análisis del sistema	Captura del sistema
La imagen evidencia la correcta detección de fuego y humo de gran magnitud por parte del sistema, generando un recuadro de identificación y clasificación automática. A diferencia de focos térmicos pequeños, la intensidad del incendio y la presencia visible de humo permiten un reconocimiento más preciso del modelo, demostrando mayor eficiencia en escenarios de incendios forestales de mayor escala.	 A video frame showing a large fire with a yellow bounding box labeled 'Fuego/Humo'. The fire is intense and occupies a significant portion of the frame. The background shows some greenery. The logo 'clideo.com' is visible in the bottom right corner.
La imagen térmica evidencia la detección de humo mediante el sistema, el cual genera recuadros de identificación sobre las zonas con mayor concentración. El contraste en escala de grises permite resaltar las emisiones detectadas, demostrando la capacidad del modelo para reconocer patrones de humo incluso dentro de entornos con vegetación y variaciones térmicas del terreno.	 A thermal image showing smoke detection with green bounding boxes and labels 'smoke 0.56' and 'smoke 0.31'. The image is in grayscale, highlighting the smoke against the background. The logo 'clideo.com' is visible in the bottom right corner.

La imagen evidencia la correcta detección de personas por parte del sistema, generando recuadros de identificación sobre los objetivos monitoreados. El modelo logró reconocer individuos dentro de un entorno natural abierto, demostrando capacidad de detección y seguimiento en escenarios terrestres durante operaciones de vigilancia y monitoreo.	
La imagen muestra la correcta detección de una persona dentro del área monitoreada, donde el sistema genera un recuadro de identificación sobre el objetivo detectado. Este resultado evidencia la capacidad del modelo para reconocer presencia humana en distintos escenarios y condiciones de iluminación, contribuyendo al monitoreo y localización de personas durante operaciones aéreas.	

3.1.34 Validación del sistema con el Cuerpo de Bombero

En la Figura 128, se muestra la presentación del sistema de monitoreo térmico al personal del Cuerpo de Bomberos Ambato, encabezada por el capitán Fredy Ledesma, permitió socializar el funcionamiento integral de la plataforma y cumplir con los objetivos establecidos en el oficio institucional previamente emitido. Durante la reunión se expusieron las capacidades del sistema, incluyendo monitoreo térmico en tiempo real, detección automatizada mediante modelos YOLO, generación de reportes y sincronización en la nube.

Como resultado, se obtuvo retroalimentación técnica relevante orientada a futuros proyectos de innovación tecnológica para la institución, destacándose la propuesta de implementar una central de monitoreo con drones en puntos estratégicos de la ciudad, complementada con conectividad satelital para ampliar la cobertura operativa. En este contexto, el sistema desarrollado dentro del presente proyecto constituye una base tecnológica y metodológica para futuras ampliaciones y optimización de procesos de vigilancia preventiva. Adicionalmente, dentro de las recomendaciones emitidas por el capitán, se planteó la incorporación de un sistema de alertas automáticas ante detección de fuego, integrado directamente a la plataforma operativa institucional para fortalecer la capacidad de respuesta temprana.



Figura 128. Demostración del ecosistema de sistema de monitoreo a las autoridades operativas del cuerpo de bomberos Ambato.

3.1.35 Ajustes y mejoras al sistema post-pruebas

Posterior a la presentación del sistema de monitoreo al Cuerpo de Bomberos de Ambato, y en función de las observaciones y recomendaciones emitidas por el capitán, se identificó la necesidad de incorporar un sistema de alertas automáticas en tiempo real dentro de la interfaz web remota. Esta mejora tuvo como objetivo optimizar el tiempo de respuesta ante eventos críticos detectados por el sistema. En consecuencia, se realizaron modificaciones prioritarias en la arquitectura funcional de la plataforma, fortaleciendo su capacidad de monitoreo y respuesta operativa como se muestra en la Figura 129.

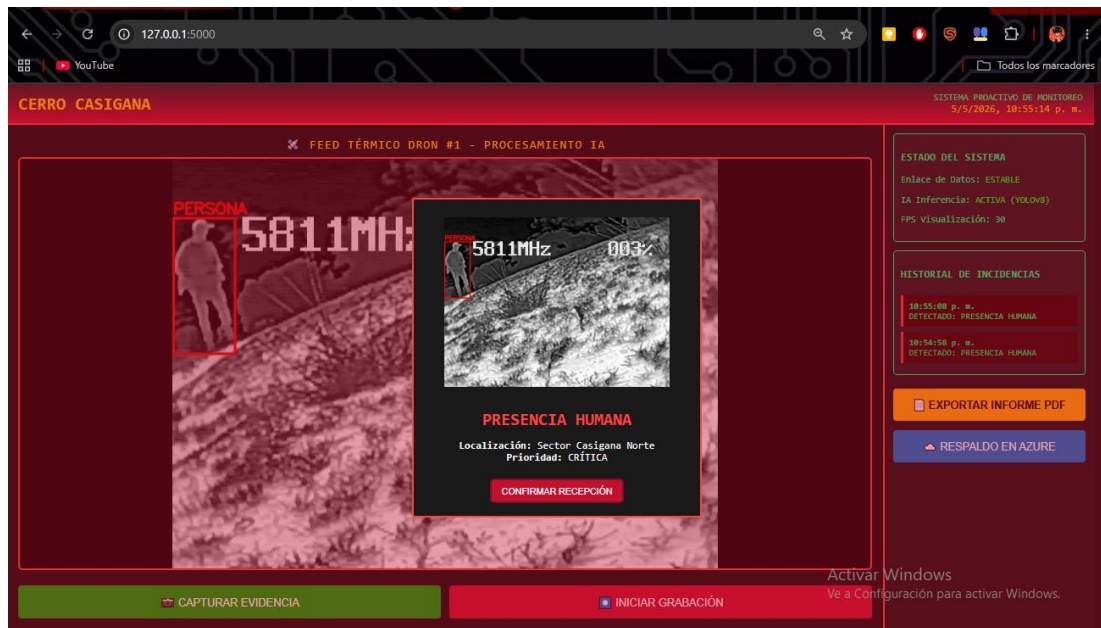


Figura 129. Interfaz proactiva con el módulo de alerta emergente en tiempo real ante detecciones críticas implementado post-pruebas con el usuario final.

Durante las pruebas iniciales, se observó que la dependencia exclusiva de la observación continua del operador sobre el dashboard web podía retrasar la detección de eventos críticos debido a la fatiga visual o distracciones operativas.

- **Mejora:** Se integró un sistema de alertas proactivas basado en ventanas emergentes (Pop-ups) de alta prioridad mediante la librería SweetAlert2.
- **Funcionamiento:** Al momento de una inferencia positiva (Fuego, Humo o Persona) con un umbral de confianza superior al 25%-35%, el sistema dispara

automáticamente una ventana modal que congela la evidencia visual del evento, obligando al operador a confirmar la recepción de la alerta.

- **Impacto:** Se redujo el tiempo de reacción ante un incendio detectado, pasando de un modelo de monitoreo pasivo a uno de alerta activa inmediata.

3.1.36 Discusión de resultados

Las pruebas iniciales del UAV se realizaron mediante la integración del sensor térmico MLX90640, enlazado a una placa ESP32, con el objetivo de transmitir información térmica en tiempo real hacia la estación terrestre. Para esta fase experimental, el vuelo fue programado de forma automática utilizando el software Mission Planner, estableciendo una trayectoria predefinida en la zona 1 del Cerro Casigana.

Durante la ejecución del vuelo autónomo, las condiciones climáticas fueron favorables, permitiendo inicialmente una adecuada recepción de señal GPS y estabilidad en la navegación. Sin embargo, al alcanzar una altura aproximada de 80 metros respecto a la estación terrestre, se evidenció la pérdida de control del UAV y la interrupción total de la comunicación con el sistema de monitoreo.

Posteriormente, se determinó que esta falla estuvo asociada principalmente a factores externos de telecomunicaciones presentes en el entorno, tales como torres de red móvil, antenas sectoriales y postes eléctricos, elementos que generaron interferencias significativas en la transmisión de datos y en la estabilidad de los enlaces de comunicación del UAV.

Adicionalmente, se identificó que la transmisión de información entre el sensor térmico MLX90640, la placa ESP32 y la terminal computacional no fue estable bajo condiciones de mayor altura y velocidad de desplazamiento, limitando considerablemente el alcance operativo del sistema. Como consecuencia de estas deficiencias técnicas y de comunicación, se produjo la pérdida del UAV en la zona del Cerro Casigana.

Se realizaron nuevas pruebas utilizando una cámara térmica FPV integrada en un nuevo UAV, el cual conserva características estructurales y especificaciones similares al prototipo anterior. A diferencia de la primera fase experimental, en esta ocasión las operaciones de vuelo se ejecutaron de forma manual, permitiendo un mayor control sobre las trayectorias establecidas en las zonas 1 y 2 de estudio.

Durante el desarrollo de estas pruebas, se evidenció una mejora significativa en la estabilidad operativa del sistema, observándose una recepción de video más fluida y continua, sin presentar mayores inconvenientes en la transmisión de imagen ni en el control del UAV. Este comportamiento se atribuye principalmente a que el vehículo aéreo operó a menores niveles de velocidad y altura, reduciendo la probabilidad de interferencias y pérdidas de señal en comparación con las pruebas iniciales.

Como resultado, fue posible ejecutar satisfactoriamente las pruebas funcionales del sistema de monitoreo desarrollado, validando el correcto desempeño de la transmisión de video térmico y la capacidad operativa del UAV para el monitoreo en tiempo real dentro de las zonas establecidas.

3.1.37 Presupuesto del proyecto

Para el cálculo del presupuesto total del sistema, se tomó en cuenta el presupuesto del diseño y materiales utilizados en la construcción del sistema. La estimación del presupuesto del diseño se basa en el tiempo empleado en su diseño y el sueldo promedio de un ingeniero en telecomunicaciones en Ecuador. Según el informe de salarios mínimos sectoriales del año 2025 emitido por el Ministerio de Trabajo, un especialista en telecomunicaciones gana \$505.26 mensuales. Para determinar el salario diario, se considera un promedio de 20 días laborales al mes. Aplicando estos datos a la Ecuación 12, se calcula el salario diario de un especialista en Telecomunicaciones:

$$Salario_{diario} = \frac{Salario_{mensual}}{Días_{laborables}} \quad (12)$$

$$Salario_{diario} = \frac{505.26}{20}$$

$$Salario_{diario} = \$25.26$$

Para determinar el salario correspondiente por hora, se utiliza la Ecuación 13, considerando que la duración de la jornada laboral es de 8 horas al día.

$$Salario_{hora} = \frac{Salario_{diario}}{Horas_{laborables}} \quad (13)$$

$$Salario_{hora} = \frac{25.26}{8}$$

$$Salario_{hora} = \$3.15$$

Para determinar el presupuesto destinado al diseño, se empleó la Ecuación 14, considerando que la dedicación diaria al proyecto fue de 4 horas, distribuidas a lo largo de un periodo de 4 meses. En total, se acumularon 336 horas laborables.

$$Presupuesto_{diseño} = Salario_{hora} \times Horas_{laborables} \quad (14)$$

$$Presupuesto_{diseño} = 3.15 \times 336$$

$$Presupuesto_{diseño} = \$1058,40$$

En la Tabla 25 proporciona una descripción detallada del presupuesto de los materiales.

Tabla 25. Presupuesto de los materiales del sistema

Ítem	Recursos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Cámara FPV CMOS Orange 1200	1	\$25.00	\$25.00
2	Cámara térmica fpv 256 4mm	1	\$300.00	\$300.00
3	Cuadricóptero SpeedyBee F405 V3	1	\$541.00	\$541.00
4	Batería LiPo 4S 14.8v ~16.8V	1	\$37.38	\$37.38
5	TBS M8.2 GPS GLONNASS	1	\$35.00	\$35.00
6	Cargador balanceador imax B6AC	1	\$28.00	\$28.00
7	Video transmisor (VTX 801)	1	\$25.00	\$25.00
8	Video transmisor (VTX1200)	1	\$20.00	\$20.00
9	Video receptor (VRX ROTG01)	1	\$45.00	\$45.00
10	Eachine Vr006 Fpv Goggles	1	\$198.90	\$198.90
11	Antena Foxxer Lollipop	1	\$18.00	\$18.00
12	Computador HP con tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX	1	\$598.99	\$598.99
13	Radio control (Jumper T-pro)	1	\$110.00	\$110.00

Subtotal	\$1982,27
Imprevistos (10%)	\$198,23
Total	\$2180,50

Se obtiene el presupuesto total del sistema usando la Ecuación 15, sumando el presupuesto del diseño y construcción del sistema de la siguiente manera.

$$Presupuesto_{total} = Presupuesto_{diseño} + Presupuesto_{materiales} \quad (15)$$

$$Presupuesto_{total} = 1058,40 + 2180,50$$

$$Presupuesto_{total} = \$3238,90$$

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El sistema de monitoreo desarrollado para el apoyo operativo del Cuerpo de Bomberos Ambato mediante UAV y cámara térmica FPV demostró una detección eficiente en tiempo real de fuego, humo y personas. La implementación del modelo YOLOv8 (best.pt) para la detección de incendios y humo alcanzó una precisión del 86.88 %, un recall del 84.86 % y un valor mAP@0.5 de 92.50 %, evidenciando un desempeño adecuado para la identificación de eventos asociados a incendios forestales.
- La arquitectura diseñada integra de manera eficiente herramientas tecnológicas como UAVs, cámara térmica FPV y algoritmos de detección pre entrenados basados en YOLOv8 para el procesamiento de video en tiempo real. Esta estructura cumple satisfactoriamente con los tres componentes fundamentales planteados en el proyecto: el sistema de control y transmisión de video, el sistema de recepción y procesamiento de datos, y el sistema de visualización y gestión de información.
- La interfaz web de monitoreo y gestión de alertas, implementada y enlazada en la nube mediante servicios de Azure, facilita la escalabilidad del sistema y fortalece la seguridad en el almacenamiento de datos. Las pruebas realizadas en diferentes zonas del Cerro Casigana evidenciaron la eficiencia del UAV para sincronizar reportes, evidencias visuales y alertas hacia la plataforma de gestión, utilizando Azure Blob Storage como repositorio centralizado de información.
- Las pruebas de vuelo manual del UAV demostraron una mayor precisión en la ejecución de rutas establecidas dentro de las zonas de estudio, en comparación con el vuelo automático. El control manual permitió una maniobrabilidad más detallada y adaptable a las condiciones del entorno del Cerro Casigana. Por otro lado, la integración del sistema GPS para vuelo automático presentó limitaciones operativas y pérdida parcial del control del UAV debido a interferencias electromagnéticas ocasionadas por la proximidad a estructuras de telecomunicaciones presentes en el área de estudio.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda optimizar el sistema de control y transmisión de video mediante la implementación de equipos más robustos y estables, capaces de reducir las interferencias electromagnéticas presentes en el entorno del Cerro Casigana.
- Para mejorar la precisión en la detección de eventos, se sugiere implementar cámaras térmicas FPV de mayor resolución que la utilizada en este proyecto (256x192 4 mm), permitiendo obtener imágenes con mejor calidad y detalle.
- Se recomienda utilizar una laptop con mayores capacidades de procesamiento en la estación terrestre, con el fin de reducir la latencia en el procesamiento de video y optimizar la calidad visual y el análisis de datos en tiempo real.
- Se sugiere replicar y validar el sistema de monitoreo en otras zonas propensas a incendios forestales, como sectores aledaños al Parque de la Familia en Quisapincha, identificados como áreas de riesgo según análisis del Cuerpo de Bomberos Ambato.
- Para futuras implementaciones fuera del ámbito académico, se recomienda considerar los costos operativos de servicios en la nube como Azure, debido a que sus beneficios gratuitos para estudiantes tienen una duración limitada y restricciones de uso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. W. J. y J. Abatzoglou y S. Veraverbeke y N. Andela y G. Lasslop y M. Forkel y Adam JP Smith y Chantelle A. Burton y R. Betts y GR Werf y S. Sitch y J. Canadell y C. Santín y C. Kolden y S. Doerr y Corinne Le Quéré, “Tendencias y factores determinantes globales y regionales de los incendios bajo el cambio climático,” *Reviews of Geophysics*, vol. 60, 2022.
- [2] G. Penney, G. Baker, A. Valencia, and D. Gorham, “A fire safety engineering approach to improving community resilience to the impacts of wildfire,” *Fire and Materials*, vol. 49, pp. 835–846, 2024.
- [3] P. B. y Periklis Papaioannou y K. Dimitropoulos y N. Grammalidis, “Una revisión de los sistemas de detección temprana de incendios forestales mediante teledetección óptica,” *Sensors (Basel, Suiza)*, vol. 20, 2020.
- [4] L. Correa-Quezada, V. Carrión-Correa, C. López, D. Segura, and V. Carrión-Paladines, “Towards Integrated Fire Management: Strengthening Forest Fire Legislation and Policies in the Andean Community of Nations,” *Fire*, 2025.
- [5] M. Á. Iglesias Jiménez, “Diseño e implementación de un dron para la detección de incendios forestales,” 2016.
- [6] E. I. O. Guevara, “Título: “Análisis de empleo de Sistemas Aéreos No Tripulados (UAVs) como apoyo a los sistemas de monitoreo actuales para REDD+ en Ecuador.”
- [7] J. A. Gambín Martínez, “Uso de drones para el control y extinción de incendios forestales,” 2023.
- [8] S. Blesa Jiménez, “Optimización de la misión de un enjambre de drones para la detección temprana de incendios forestales,” 2018.
- [9] R. Cordero, S. Feron, A. Damiani, J. Carrasco, C. Karas, C. Wang, C. Kraamwinkel, and A. Beaulieu, “Extreme fire weather in Chile driven by climate change and El Niño–Southern Oscillation (ENSO),” *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [10] A. Hidalgo, L. Contreras-Vásquez, V. Nuñez, and B. Paredes-Beltran, “Wildfire Risk Assessment in Ambato, Ecuador: Drought Impacts, Fuel Dynamics, and Wildland–Urban Interface Vulnerability,” *Fire*, 2025.

- [11] A. Soler, N. Pineda, H. B. S. Segundo, J. Bech, and J. Montanyá, "Characterisation of thunderstorms that caused lightning-ignited wildfires," *International Journal of Wildland Fire*, 2021.
- [12] M. Calviño-Cancela, M. Chas-Amil, and E. García-Martínez, "Interacting effects of topography, vegetation, human activities and wildland-urban interfaces on wildfire ignition risk," *Forest Ecology and Management*, vol. 397, pp. 10–17, 2017.
- [13] R. B. E. y R. Naylor y Matthew M. Higgins y W. Falcon, "Causas de los incendios forestales en Indonesia," *World Development*, vol. 127, p. 104717, 2020.
- [14] F. M.-C. y L. Bravo-Montero y P. Carrión-Mero y A. Velástegui-Montoya y E. Berrezueta, "Evaluación de incendios forestales mediante teledetección para apoyar el desarrollo de una propuesta de plan de acción en Ecuador," *Remote Sens.*, vol. 14, p. 1783, 2022.
- [15] "Pozary w miastach Rzeczypospolitej w XVI-XVIII wieku i ich następstwa ekonomiczne, społeczne i kulturowe."
- [16] K. G. y Sabariswaran Kandasamy y Mathiyazhagan Narayanan, "Influencia de los incendios forestales en el ecosistema forestal y el cambio climático: Un estudio exhaustivo.," *Environmental research*, p. 117537, 2023.
- [17] T. H. y B. Lamont y J. Pausas, "El fuego como motor clave de la biodiversidad de la Tierra," *Biological Reviews*, vol. 94, 2019.
- [18] K. B.-G. y A. Sullivan y Ricardo Morales-Betancourt, "Estimación de la calidad del aire y los impactos en la salud de la quema de biomasa en el norte de Sudamérica utilizando un modelo de transporte químico.," *The Science of the total environment*, vol. 739, p. 139755, 2020.
- [19] F. C. y Chiara Zidda y Martina Putzu y Daniele Loru y M. Anedda y D. Giusto, "Avances en la prevención de incendios forestales: una revisión exhaustiva," *Sensors (Basel, Suiza)*, vol. 23, 2023.
- [20] A. K. y Sumeet Gupta y Sachin Kumar Gupta, "Tecnología emergente de UAV para la detección, mitigación, respuesta y preparación ante desastres," *Journal of Field Robotics*, vol. 39, pp. 905–955, 2022.
- [21] P. Palttala, C. Boano, R. Lund, and M. Vos, "Communication Gaps in Disaster Management: Perceptions by Experts from Governmental and Non-

- Governmental Organizations,” *Journal of Contingencies and Crisis Management*, vol. 20, pp. 2–12, 2012.
- [22] I. T. y CJ Taylor y B. Lennox y Malcolm J. Joyce, “Una revisión de sistemas robóticos terrestres para la caracterización de entornos nucleares,” *Progress in Nuclear Energy*, 2019.
- [23] S. P. y Farzad Sanati y J. Hassan, “Vehículos aéreos autónomos no tripulados en la gestión de incendios forestales: desafíos y oportunidades,” *Drones*, 2023.
- [24] “Enjambres de drones en actividades de extinción de incendios: un marco conceptual.”
- [25] S. A. H. M. y NQ Othman y Yanlong Li y Mohammed H. Alsharif y Muhammad Asghar Khan, “Vehículos aéreos no tripulados (VANT): aspectos prácticos, aplicaciones, desafíos abiertos, problemas de seguridad y tendencias futuras,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 16, pp. 109–137, 2023.
- [26] U. S. y Lyazzat Ilipbayeva y Kyrmyzy Taissariyeva y N. Smailov y Eric T. Matson, “Avances y desafíos en técnicas de detección y clasificación de drones: una revisión del estado del arte,” *Sensors (Basel, Suiza)*, vol. 24, 2023.
- [27] F. T. y Costanza Fiorentino y N. Capece y U. Erra y Danilo Travascia y Antonio Scopa y M. Drosos y Paola D’Antonio, “Vehículo aéreo no tripulado para la agricultura de precisión: una revisión,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 69188–69205, 2024.
- [28] S. A. H. M. y Muhammad Asghar Khan y F. Noor y Insaf Ullah y Mohammed H. Alsharif, “Hacia los vehículos aéreos no tripulados (UAV): una revisión exhaustiva,” *Drones*, 2022.
- [29] F. S. y M. Garratt y S. Anavatti, “Sistemas de control de vuelo inteligentes de última generación en vehículos aéreos no tripulados,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, pp. 613–627, 2018.
- [30] M. S. y A. Reis y S. Sargento, “Un marco de planificación de misiones para flotas de UAVs conectados,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 108, pp. 1–21, 2023.
- [31] D. A. y L. Cinque y Emad Emam y Federico Fontana y Gian Luca Foresti y Marco Raoul Marini y Alessio Mecca y D. Pannone, “Geolocalización de UAV para navegación: una revisión,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 125332–125357, 2024.

- [32] W. Liu, “Análisis del método de estabilidad de la comunicación de datos de UAV en entornos extremos,” *Applied and Computational Engineering*, 2024.
- [33] A. A. y V. Marojevic, “Estándares de comunicaciones para sistemas de aeronaves no tripuladas: la perspectiva del 3GPP y los impulsores de la investigación,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, pp. 70–77, 2021.
- [34] A. S. y G. Di Rito y Giuseppe Mattei, “Desarrollo y validación experimental de nuevos modelos histeréticos basados en Thevenin para paquetes de baterías Li-Po empleados en UAVs de ala fija,” *Energies*, 2022.
- [35] S. K. y F. Alnajjar y Munkhjargal Gochoo y S. Shimoda, “Dispositivos robóticos de asistencia y rehabilitación que conducen a la recuperación motora en las extremidades superiores: una revisión sistemática,” *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, vol. 18, pp. 658–672, 2021.
- [36] C. S. y R. Bennett y F. Nex y M. Gerke y J. Zevenbergen, “Revisión del estado actual de las regulaciones sobre UAV,” *Remote. Sens.*, vol. 9, p. 459, 2017.
- [37] “Protección de emisiones de radiodifusión de juegos deportivos en el entorno digital: propuesta legislativa penal para el Ecuador.”
- [38] R. B. y Shiho Kim y Haejoon Jung, “UAV de infraestructura inalámbrica basada en 6G NR-U: estandarización, oportunidades, desafíos y perspectivas futuras,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 30536–30555, 2022.
- [39] E. H.-A. y JJ Cabrera y L. Jiménez y David Valiente y A. Gil, “Técnicas de fusión temprana estática para imágenes visibles y térmicas para mejorar la detección de redes neuronales convolucionales: un análisis de rendimiento,” *Remote Sensing*, 2025.
- [40] Y. Ozaki, “Espectroscopia infrarroja: infrarrojo medio, infrarrojo cercano y infrarrojo lejano/espectroscopia de terahercios,” *Analytical Sciences*, vol. 37, pp. 1193–1212, 2021.
- [41] L. R. y E. Alfinito, “Revisión de la ley Stefan-Boltzmann,” 2021.
- [42] A. B. y Joanna Drabik y K. Trejgis y Daniel Jaque y Erving C Ximendes y Lukasz Marciniak, “Bioimágenes de temperatura basadas en luminiscencia: estado actual, desafíos y perspectivas,” *Applied Physics Reviews*, 2021.
- [43] S. C. y Xiangding Zeng y D. Laefer y L. Truong-Hong y E. Mangina, “Configuración de la trayectoria de vuelo y evaluaciones de la calidad de los

- datos para la documentación fotogramétrica de puentes basada en vehículos aéreos no tripulados,” *Sensors (Basel, Suiza)*, vol. 23, 2023.
- [44] K. V. y A. Makarov y Nikolai Andreev, “Problema de medición de absorción mediante interferometría fototérmica de trayectoria común resuelta en el tiempo bajo condiciones de difusión de calor desarrollada,” *Applied Sciences*, 2023.
- [45] H. L. y Shupeí Wen y Sen Li y Hong Wang y Xin Geng y Shuaijun Wang y Jinlong Zhai y Wenhua Zhang, “Investigación sobre la radiación infrarroja afectada por el humo o la niebla en diferentes temperaturas ambientales,” *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [46] M. C. y Sophie A. Stanley y Zoë Whitman y Victoria Wenn y Timothy J Coats y M. Sims y Jonathan P Thompson, “El efecto de la pigmentación constitutiva en la emisividad medida de la piel humana,” *PLoS ONE*, vol. 15, 2020.
- [47] E. Barreira, R. Almeida, and M. Simões, “Emissivity of Building Materials for Infrared Measurements,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 21, 2021.
- [48] A. W. y Khushi Gupta y Balu Harshavardan Koduru y Abhinav Kumar y A. Jha y Linga Reddy Cenkeramaddi, “Avances recientes en imágenes térmicas y sus aplicaciones mediante aprendizaje automático: una revisión,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, pp. 3395–3407, 2023.
- [49] E. L. y Chiara Botrugno y T. Natale y F. Dell’olio, “Monitorización de la temperatura corporal sin contacto mediante cámara infrarroja: evaluación preliminar de la precisión,” *2023 IEEE SENSORS*, pp. 1–4, 2023.
- [50] J. L. y Wei Gao y Yihong Wu y Yangdong Liu y Yanfei Shen, “Reconstrucción 3D de escenas interiores de alta calidad con cámaras RGB-D: una breve revisión,” *Computational Visual Media*, vol. 8, pp. 369–393, 2022.
- [51] O. S. y S. Vasylenko y Yaroslava Zinchenko y Oleksii Khakhliuk, “Algoritmo para medir parámetros de enlace de radio de una aeronave no tripulada en modo FPV en el rango de frecuencia centimétrica,” *Colección "Tecnología de la Información y Seguridad"*, 2024.
- [52] A. A. y Stefan Stevšić y Tobias Nägeli y J. Bazin y Otmar Hilliges, “Captura de tomas subjetivas en primera persona con drones para cinematografía automatizada,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 39, pp. 1–14, 2020.
- [53] M. T.-T. y SF Rodríguez-Fuentes y FS Franco-Romero y MA Velasco-Castillo y JG Vera-Dimas y RV Bernal, “Transmisión de vídeo en tiempo real en un

- sistema FPV utilizando antenas de parche,” in *Conferencia Internacional de Mecatrónica, Electrónica e Ingeniería Automotriz de 2021 (ICMEAE)*, 2021, pp. 251–256.
- [54] F. D. J. y F. Samadzadegan y A. Toosi y M. Schneider y C. Persello, “Estimación de distancia resuelta en tierra de imágenes Sentinel-2 mediante un enfoque basado en bordes y escenas,” *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, vol. 93, pp. 131–152, 2025.
- [55] S. N. S. y M. Mukhiddinov y O. Djuraev y A. Abdusalomov y Young-Im Cho, “Detección mejorada de humo de incendios forestales basada en imágenes YOLOv8 y UAV,” *Sensors (Basel, Suiza)*, vol. 23, 2023.
- [56] S. S. y Meghana Suryan y Nandini Jattur y Amruta Rasalkar, “Sistema de detección de incendios,” *Revista Internacional de Aplicaciones Informáticas*, 2023.
- [57] M. E. y S. Kazeminasab y Vishal Sharma y Yangjiani Li y Mojtaba Sedigh Fazli y Mengyu Wang y Nazlee Zebardast y T. Elze, “PyVisualFields: Un paquete de Python para el análisis del campo visual,” *Translational Vision Science & Technology*, vol. 12, 2023.
- [58] M. N. R. y Tasnim Basmaji y Abdalla Gad y Hasan Hamdan y BT Akgün y Mohammed AH Ali y M. Alkhedher y Mohammed Ghazal, “Hacia la detección y prevención temprana de incendios forestales mediante drones con IA e IoT,” *Internet Things*, vol. 27, p. 101248, 2024.
- [59] K. N. y Chongyang Wang y Jianhui Xu y Jian Liang y Xia Zhou y Kaixiang Wen y Minjian Lu y Chuanxun Yang, “Detección temprana de incendios forestales con fusión de imágenes de UAV: un nuevo método de aprendizaje profundo que utiliza sensores visibles e infrarrojos,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 18, pp. 6617–6629, 2025.
- [60] R. S. y Rizwan Qureshi y Marco Calero y Chetan Badjugar y Upesh Nepal y Alwin Poullose y Peter Zeno y UBP Vaddevolu y Sheheryar Khan y Maged Shoman y Hong Yan y Manoj Karkee, “YOLO avanza hacia su génesis: una revisión exhaustiva y decenal de la serie You Only Look Once (YOLO),” *Artificial Intelligence Review*, vol. 58, 2024.

- [61] A. V. y Subramaniaswamy Vairavasundaram, “Modelos de detección de objetos basados en YOLO: una revisión y sus aplicaciones,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, pp. 83535–83574, 2024.
- [62] H. P. y Yisong Jia y Jue Wang y Dazhao Wang, “mAPLoss: Mejora de la precisión direccional en la optimización de detectores de objetos densos,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 21, pp. 6768–6777, 2025.
- [63] P. Kaushik, A. M. Rao, D. P. Singh, S. Vashisht, and S. Gupta, “Cloud Computing and Comparison based on Service and Performance between Amazon AWS, Microsoft Azure, and Google Cloud,” in *2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI)*, 2021, pp. 268–273.
- [64] Q. C. y Hongjun Wang y Bin Zhu y Yingchun Shi y Bo Xie, “Un algoritmo de detección de objetivos para UAV en tiempo real basado en computación de borde,” *Drones*, 2023.
- [65] M.-C. T. y Yun-Han Chang y Chi-Wai Chow, “Sistema de comunicación óptica de cámara (OCC) basado en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) de agua a aire con red neuronal de unidad recurrente con compuerta (GRU-NN).,” *Optics express*, vol. 32 23, pp. 41014–41025, 2024.
- [66] M. S. K. y J. S. M. Sharma, “Python y Django: la tecnología de desarrollo web de más rápido crecimiento,” in *2024 IEEE 1st Karachi Section Humanitarian Technology Conference (KHI-HTC)*, 2024, pp. 1–9.
- [67] X. C. y Bryce Hopkins y Hongya Wang y Leo O’Neill y Fatemeh Afghah y Abolfazl Razi y P. Fulé y J. Coen y E. Rowell y A. Watts, “Detección y monitoreo de incendios forestales mediante un conjunto de datos de imágenes RGB/IR recopiladas con drones,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121301–121317, 2022.
- [68] K. L. y Jun-hui Zheng, “Optimización de la trayectoria de UAV para la recopilación de datos con restricciones de tiempo en sistemas de monitoreo ambiental habilitados por UAV,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 24300–24314, 2022.
- [69] D. A. y Hyeontae Joo y Hwangnam Kim, “Habilitación de gemelos digitales de baja latencia para redes de UAV a gran escala mediante un marco de comunicación basado en MQTT,” *ICT Express*, vol. 11, pp. 264–269, 2025.

- [70] “El museo-parque arqueológico de Ligüiqui como propuesta participativa para un desarrollo comunitario sostenible (Manta, Ecuador).”
- [71] R. Z. y Fernando Prudencio y Yerson Ccanchi y Miguel Saavedra y Juan C. Sulca y J. Reupo y Glory Alarco, “Condiciones potenciales para la ocurrencia de incendios en la vegetación de los Andes peruanos,” *International Journal of Wildland Fire*, 2021.
- [72] F. K. y Zhiguang Xu y Junling Sun y Fazal Maula Khan y Adnan Ahmed y Yan Zhao, “Avances recientes en sensores para la detección de incendios,” *Sensors (Basel, Suiza)*, vol. 22, 2022.
- [73] A. S. y P. Singh, “Marco basado en UAV para el análisis efectivo de datos de detección de incendios forestales mediante redes 5G: Un enfoque efectivo hacia soluciones para ciudades inteligentes,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 38, 2021.
- [74] M. G. y D. Moltchanov y Sergey D. Andreev y R. Heath, “Probabilidad de línea de visión para comunicaciones UAV basadas en ondas milimétricas en despliegues de cuadrícula urbana 3D,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, pp. 6566–6579, 2021.
- [75] “Evaluación de una Red de Banda Ancha inalámbrica para VoIP en Huaytará.”
- [76] J. L. y Jingfu Li y Fei Yu y Weiheng Jiang y Wenjiang Feng, “Red de acceso de radio en la nube heterogénea asistida por UAV con gestión integral de interferencias,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, pp. 843–859, 2024.
- [77] E. K. y L. Bauersfeld y Antonio Loquercio y Matthias Müller y V. Koltun y Davide Scaramuzza, “Carreras de drones de nivel campeón utilizando aprendizaje profundo por refuerzo,” *Nature*, vol. 620, pp. 982–987, 2023.
- [78] S. C. y Baoding Zhou y Changhui Jiang y Weixing Xue y Qingquan Li, “Un backend LiDAR/Visual SLAM con detección de cierre de bucle y optimización de grafos,” *Remote. Sens.*, vol. 13, p. 2720, 2021.
- [79] Y. H. y Liguang Qiao y Feng Gu, “Evaluación y prevención de riesgos en la garantía de seguridad aeroportuaria mediante la integración del algoritmo LSTM,” *PLOS ONE*, vol. 20, 2025.
- [80] S. S. y Chenhao Ye y Ranjitha Kosgi y Aditya Jain y R. Kankaria y Yiwei Chen y Andrea C. Arpaci-Dusseau y Remzi H. Arpaci-Dusseau y K. Srinivasan,

“Cloudscape: Un estudio de los servicios de almacenamiento en arquitecturas de nube modernas,” 2025, pp. 103–121.

- [81] D. G. de Aviación Civil del Ecuador, “Resolución Nro. DGAC-DGAC-2024-0019-R: Normas Generales que Regulan la Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS).” Dirección General de Aviación Civil, Quito, Ecuador, 06-Mar-2024.

ANEXOS

Anexo A. Resolución de las normas generales que regulan la operación de Aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)[81]



REPÚBLICA
DEL ECUADOR

Resolución Nro. DGAC-DGAC-2024-0019-R

Quito, D.M., 06 de marzo de 2024

DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL

EL DIRECTOR GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL, ENCARGADO

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 226 de la Constitución de la República establece: "(...) *Las Instituciones del Estado, sus organismos, dependencias, las servidoras o servidores públicos y las personas que actúen en virtud de una potestad estatal ejercerán solamente las competencias y facultades que les sean atribuidas en la Constitución y la Ley. Tendrán el deber de coordinar acciones para el cumplimiento de sus fines y hacer efectivo el goce y ejercicio de los derechos (...)*";

Que, el artículo 227 de la Constitución Ibídem indica: "(...) *La administración pública constituye un servicio a la colectividad que se rige por los principios de eficacia, eficiencia, calidad, jerarquía, desconcentración, descentralización, coordinación, participación, planificación, transparencia y evaluación (...)*";

Que, el artículo 130 del Código Orgánico Administrativo establece que: "*Las máximas autoridades administrativas tienen competencia normativa de carácter administrativo únicamente para regular los asuntos internos del órgano a su cargo, salvo los casos en los que la ley prevea esta competencia para la máxima autoridad legislativa de una administración pública. La competencia regulatoria de las actuaciones de las personas debe estar expresamente atribuida en la ley.*";

Que, la Codificación de la Ley de Aviación Civil, en los artículos 2 y 5, establece que la Dirección General de Aviación Civil es una entidad reguladora, autónoma de derecho público, con personería jurídica y fondos propios, que mantendrá el control técnico operativo de la actividad aeronáutica nacional, y, que para efectos de aplicación de la misma, los términos técnicos en materia aeronáutica, se rige por las Regulaciones Técnicas de la Aviación Civil (RDAC), emitidas por la Autoridad Aeronáutica, cuya máxima Autoridad es el Director General de Aviación Civil;

Que, el artículo 6, numeral 3 literal a) de la Codificación de la Ley de Aviación Civil, señala que es atribución de la máxima autoridad administrativa de la DGAC, el "*Dictar, reformar, derogar regulaciones técnicas, órdenes, reglamentos internos y disposiciones complementarias de la aviación civil, de conformidad con la presente Ley, el Código Aeronáutico, el Convenio sobre Aviación Civil Internacional, y las que sean necesarias para la seguridad de vuelo y la protección de la seguridad del transporte aéreo*";

Que, con Resolución Nro. DGAC-DGAC-2023-0132-R de 12 de diciembre de 2023, el Director General de Aviación Civil, aprobó "*la nueva edición de la Regulación Técnica de Aviación Civil RDAC PARTE 102 "SISTEMA DE AERONAVES NO TRIPULADAS UAS"*";

Anexo B. Adaptación piezas, estructuras y montaje de la cámara térmica FPV en el
UAV



Anexo C. Prueba del sistema de monitoreo con el sensor térmico MLX90640 y cámara FPV.



Anexo D. Prueba del sistema de monitoreo con la cámara térmica FPV implementada en el UAV.

