



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Desarrollo de una plataforma para adquisición de imágenes basada en dron y cámara térmica con aplicación en agricultura

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Autor: **Pedro Celestino López Jiménez**
Director: José Luis Aguirre Martínez
Codirector: Javier Garrigós Guerrero

Cartagena, 20 de marzo de 2017



Universidad
Politécnica
de Cartagena

AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a mi familia, por su gran apoyo durante el comienzo de mis estudios hasta ahora, y a Javier Garrigós y José Luis Aguirre, por depositar su confianza en mí para realizar este trabajo y su gran ayuda para el desarrollo del mismo.

INFORMACIÓN

Autor	Pedro Celestino López Jiménez
Correo electrónico del autor	celestinolopezjimenez@gmail.com
Titulación	Máster en Ingeniería Industrial
Director	José Luis Aguirre Martínez
Correo electrónico del director	joseluis.aguirre@upct.es
Departamento	Departamento de Ingeniería Mecánica
Codirector	Francisco Javier Guerrero
Correo electrónico del codirector	javier.garrigos@upct.es
Departamento	Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos

RESUMEN

En la actualidad, la técnica de la termografía es muy utilizada en una gran variedad de ámbitos: Agricultura, parques solares, detección de fugas... Los grandes beneficios que ésta ofrece, junto con el gran desarrollo que han tenido los vehículos aéreos autónomos (UAVs) permiten el análisis de grandes extensiones de terreno en poco tiempo y a un coste relativamente bajo, ya que son necesarios pocos equipos.

En este proyecto se pretende desarrollar un prototipo de cámara térmica de bajo coste y tamaño, adecuada para su utilización en un UAV. Para desarrollar el controlador, se utilizará la plataforma Intel Edison, que dispone de un sistema Linux y cuenta con un tamaño y peso inferior idóneo para un UAV. Como sensor se utilizará el kit de desarrollo Flir Lepton Dev Kit de Sparkfun, que incluye un sensor LWIR de Flir infrarrojo. La ventaja que aporta este sensor frente al resto es su coste, muy inferior a los de las cámaras termográficas comerciales habituales. En contraposición, dispone de una resolución inferior.

Por último, se estudiarán los principales indicadores utilizados en agronomía para y se desarrollará una aplicación que implemente los indicadores más apropiados para el prototipo desarrollado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2 OBJETIVOS	8
1.3 ELEMENTOS QUE COMPONEN EL SISTEMA	8
1.4 ENTORNO DE TRABAJO	10
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	12
2. ESTADO DE LA TÉCNICA.....	13
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA.....	13
2.2 INTRODUCCIÓN A LA APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA EN LA MONITORIZACIÓN DE LOS CULTIVOS.....	14
2.3 SISTEMAS SIMILARES COMERCIALES DE APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA EN LA AGRICULTURA	20
2.3.1 PARROT SEQUOIA	20
2.3.2 SENSEFLY EBEE	21
2.3.3 FLIR TAU 2.....	23
2.3.4 DISCUSIÓN	24
3. DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CÁMARA TERMOGRÁFICA PARA UAVS BASADO EN FLIR LEPTON.....	25
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO	25
3.1.1 FLIR LEPTON	25
3.1.2 INTEL EDISON	27
3.1.2.1 LIBRERÍA MRAA	28
3.2 INTERFAZ DE COMUNICACIONES	28
3.2.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIONES SPI EN INTEL EDISON.....	29
3.4.2 PROTOCOLO DE COMUNICACIONES SPI EN FLIR LEPTON	32
3.3 PROGRAMA BÁSICO DE TOMA DE IMÁGENES	34
3.3.1 DISPARADOR	36
3.4 CALIBRACIÓN DEL SENSOR.....	37
3.5 PRUEBAS DE CAMPO DEL PROTOTIPO	39
3.5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAMPO	39
3.5.2 TASA DE CAPTURA DE IMÁGENES	40
3.5.3 TASA DE ERROR AL CAPTURAR IMÁGENES	40
3.5.4 UTILIZACIÓN DE MEMORIA	42
3.6 ENCAPSULAMIENTO DEL PROTOTIPO PARA UAVS	42

3.7	PRESUPUESTO DE LOS MATERIALES DEL PROTOTIPO	45
3.8	CARACTERÍSTICAS FINALES DEL PROTOTIPO.....	45
4.	PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE FLIR LEPTON	46
4.1	IMPORTACIÓN Y FORMATO DE IMAGEN	46
4.2	STITCHING DE IMÁGENES.....	49
4.2.1	INTRODUCCIÓN AL STITCHING DE IMÁGENES	49
4.2.2	DESCRIPCIÓN Y COMPARATIVA DE LOS PROGRAMAS DE STITCHING GRATUITOS DISPONIBLES.....	50
4.2.2.1	IMAGE COMPOSITE EDITOR	51
4.2.2.2	HUGIN.....	52
4.2.2.3	AUTOPANO PRO	53
4.2.3	COMPARATIVA Y EVALUACIÓN DE LOS SOFTWARE PRESENTADOS	54
4.2.4	CONCLUSIONES Y PROPUESTA	59
5.	TEORÍA DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO	61
5.1	INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO	61
5.2	ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO EN LOS CULTIVOS MEDIANTE TERMÓMETROS INFRARROJOS	63
5.3	APLICACIONES DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA PROGRAMACIÓN DE RIEGOS 65	65
5.4	INTEGRACIÓN DEL MÉTODO PARA CALCULAR EL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL PROTOTIPO	67
6.	METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE DATOS MEDIANTE EL PROTOTIPO DESARROLLADO Y ANÁLISIS CON EJEMPLO	69
6.1	PLANIFICACIÓN Y PREPARACIÓN DEL VUELO DEL UAV SOBRE EL TERRENO	70
6.2	EJECUCIÓN DEL VUELO. CAPTURA DE IMÁGENES CON FLIR LEPTON Y ALMACENAMIENTO	73
6.3	EXTRACCIÓN DE LAS IMÁGENES CAPTURADAS, EXPORTACIÓN DE FORMATO Y CÁLCULO CWSI.....	74
6.4	STITCHING DE LAS IMÁGENES.....	76
6.5	ANÁLISIS CWSI.....	78
7.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	79
7.1	CONCLUSIONES	79
7.2	LÍNEAS FUTURAS	81
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	82
ANEXO I. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA EN C PARA CAPTURAR IMÁGENES DE FLIR LEPTON CON INTEL EDISON.....		86
ANEXO II. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE MATLAB PARA IMPORTAR IMÁGENES DE FLIR LEPTON Y CÁLCULO DEL CWSI		90
ANEXO IV. PLANOS DE LA CARCASA DEL PROTOTIPO.....		97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES, TABLAS Y PROGRAMAS

Ilustración 1.1. Flir Lepton.....	9
Ilustración 1.2. Flir Dev Kit	9
Ilustración 1.3. Intel Edison.....	9
Ilustración 1.4. Mini Breakout Board	10
Ilustración 1.5. Entorno Intel System Studio IoT Edition	11
Ilustración 1.6. Conexión de Intel Edison a PC.....	11
Ilustración 1.7. Entorno Matlab	11
Ilustración 3.1. Flir Lepton.....	25
Ilustración 3.2. Grados de apertura lente Flir Lepton	26
Ilustración 3.3. Respuesta espectral sensor Flir Lepton.....	26
Ilustración 3.4. Módulo Intel Edison	27
Ilustración 3.5. Placas de desarrollo Arduino Kit y Mini Breakout Board para Intel Edison	28
Ilustración 3.6. Esquema conexión SPI Maestro-Esclavo	29
Ilustración 3.7. Mapa de pines SPI Intel Edison Mini Breakout Board	30
Ilustración 3.8. Conexión bus SPI Flir Lepton	32
Ilustración 3.9. Señales SPI Flir Lepton.....	33
Ilustración 3.10. Ejemplo de transmisión SPI Flir Lepton.....	33
Ilustración 3.11. Flujo gráfico básico de toma de imágenes.....	35
Ilustración 3.12. Comportamiento Flir Lepton Modo Radiometría Desactivado.....	37
Ilustración 3.13. Comportamiento Flir Lepton Modo Radiometría Desactivado.....	37
Ilustración 3.14. Resultados calibración temperatura para Flir Lepton según PureThermal	38
Ilustración 3.15. Resultados tasa de error del prototipo	41
Ilustración 3.16. Vista frontal del modelo 3D de la carcasa del prototipo	43
Ilustración 3.17. Vista trasera y explosión del modelo 3D de la carcasa del prototipo	44
Ilustración 4.1. Mapas de colores disponibles en Matlab.....	47
Ilustración 4.2. Ejemplo de importación de imágenes de Flir Lepton mediante Matlab con diferentes mapas de color.....	49
Ilustración 4.3. Ejemplo de identificación geométrica y creación de una imagen panorámica mediante stitching	49
Ilustración 4.4. Pantalla principal Image Composite Editor	51
Ilustración 4.5. Opciones manuales Image Composite Editor	51
Ilustración 4.6. Panorama estructurado con Image Composite Editor	52
Ilustración 4.7. Interfaz Hugin	52
Ilustración 4.8. Interfaz Autopano Pro	53
Ilustración 4.9. Panorama creado con Autopano Pro	53
Ilustración 4.10. Imágenes para ejemplo nº 1 de stitching de imágenes de Flir Lepton	55
Ilustración 4.11. Resultado ejemplo nº 1 stitching con ICE	56
Ilustración 4.12. Resultado ejemplo nº 1 stitching con Hugin	57
Ilustración 4.13. Resultado ejemplo nº 1 stitching con Autopano Pro	57
Ilustración 4.14. Imágenes para ejemplo nº 2 de stitching de imágenes de Flir Lepton	58
Ilustración 4.15. Resultado ejemplo nº2 stitching con ICE	58
Ilustración 4.16. Resultado ejemplo nº2 stitching con Hugin	58

Ilustración 4.17. Resultado ejemplo nº 2 stitching con Autopano Pro	59
Ilustración 4.18. Cuadriculado de una parcela.....	60
Ilustración 4.19. Stitching de una captura de imágenes estructurada con ICE.....	60
Ilustración 5.1. Mapa normalizado CWSI de un viñedo en Raïmat a las 12:00 GMT	66
Ilustración 5.2. Resultado del ejemplo de cálculo del CWSI con Matlab de una imagen de Flir Lepton	67
Ilustración 6.1. Captura de la imagen satélite de la parcela sobre la que se realizó el ejemplo	70
Ilustración 6.2. Fotografía de la parcela sobre la que se realizó el ejemplo	70
Ilustración 6.3. Ejemplo planificación del vuelo de una parcela.....	71
Ilustración 6.4. Ejemplo de planificación de vuelo de una hilera	71
Ilustración 6.5. Drone F450 con el prototipo	73
Ilustración 6.6. Vuelo del UAV sobre la parcela de culvito	74
Ilustración 6.7. Extracción de las imágenes del ejemplo	74
Ilustración 6.8. Proceso Matlab de exportación imágenes del ejemplo	75
Ilustración 6.9. Resultado de la exportación de imágenes del ejemplo	75
Ilustración 6.10. Proceso stitching hilera ejemplo	76
Ilustración 6.11. Resultado de stitching hilera ejemplo.....	77
Programa 3.1. Ejemplo de comunicación básica a través del bus SPI.	32
Programa 3.2. Ejemplo de disparo mediante pulsador en Intel Edisonl.....	36
Programa 4.1. Importación y cambio de formato de imágenes de Flir Lepton con Matlab.....	48
Programa 5.1. Ejemplo de cálculo de CWSI en Matlab.....	68
Tabla 3.1. Tasa máxima de captura de imágenes del prototipo	42
Tabla 3.2. Resultado tasa de error del prototipo.....	42
Tabla 3.3. Espacio de almacenamiento disponible Intel Edison	42
Tabla 3.4. Resultado capacidad de almacenamiento de imágenes térmicas de Flir Lepton en Intel Edison.....	42
Tabla 4.1. Valores número mágico en imágenes PGM	46
Tabla 4.2. Listado de software de stitching de imágenes	50
Tabla 4.3. Comparativa de software de stitching de imágenes	54
Tabla 4.4. Comparativa de las características de software de stitching de imágenes.....	54
Tabla 5.1. Parámetros de regresión lineal del índice de estrés hídrico agrícolas en condiciones de cielo despejado	64
Tabla 5.2. Parámetros de regresión lineal de la diferencia de las temperaturas del cultivo y el aire respecto al déficit de presión de vapor de agua en algunos cultivos frutícolas	64
Tabla 5.3. Valores umbrales del índice de estrés hídrico para la programación del riego en algunos cultivos agrícolas.....	66
Tabla 6.1. Valores umbrales CWSI para algunos cultivos agrícolas	78

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

El tema de este Trabajo de Fin de Máster es el desarrollo de una plataforma para adquirir imágenes térmicas basada en la cámara termográfica Flir Lepton montada sobre un vehículo aéreo no tripulado o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), también conocido como dron. Mediante esta plataforma se pretende realizar una aplicación de la termografía en la agricultura.

La termografía es una técnica que permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético mediante el uso de cámaras termográficas. Esta técnica permite calcular y determinar temperaturas a distancia, con exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar, conocidos una serie de parámetros como la emisividad de la superficie termografiada y los datos del entorno. En la actualidad, la técnica de la termografía se aplica en una gran variedad de campos de estudio, entre ellos la agronomía, ya que permite obtener grandes cantidades de datos de manera rápida mediante la toma de imágenes térmicas. Los beneficios que esta técnica ofrece junto al gran desarrollo de los drones en los últimos años han dado lugar una importante evolución de la agricultura de precisión.

La agricultura de precisión es la gestión de parcelas agrícolas utilizando tecnologías de información o TIC. Mediante la utilización de un conjunto de tecnologías como el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), sensores e imágenes provenientes tanto de satélites como de aeronaves, Sistemas de Información Geográfica (SIG), etc. se puede recolectar información que puede ser empleada para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar la cantidad adecuada de fertilizantes o de otros insumos necesarios, y predecir con más exactitud el rendimiento y la producción de los cultivos, optimizando todos los procesos.

La motivación de este proyecto es el desarrollo de un sistema de bajo coste de aplicación de la termografía en la agricultura de precisión, basado en la cámara termográfica Flir Lepton, que es hasta la fecha la cámara de menor coste y tamaño de todas las ofrecidas en el mercado. Actualmente, la práctica de la termografía en la agricultura de precisión se lleva a cabo mediante equipos de un coste muy elevado, de manera que únicamente las grandes empresas pueden permitirse asumir los costes de esta técnica. Mediante este proyecto se pretende crear una plataforma de bajo coste que pueda proporcionar los beneficios de la agricultura de precisión al pequeño y mediano empresario.

1.2 OBJETIVOS

El propósito principal de este proyecto es el desarrollo de un prototipo de cámara termográfica para drones basado en la cámara termográfica Flir Lepton y la aplicación de éste a la agricultura de precisión. Esta tarea puede desglosarse en los objetivos que se describen a continuación:

- Desarrollo de un prototipo de controlador electrónico empotrado para el sensor Flir Lepton mediante la plataforma Intel Edison:
 - Programación en C de sistemas basados en Linux con el entorno de desarrollo Eclipse.
 - Realización de una interfaz de comunicaciones para el sensor Flir Lepton.
 - Diseño de un algoritmo de captura y almacenamiento de imágenes procedentes de la cámara Flir Lepton.
- Procesado de imágenes térmicas procedentes de UAVs:
 - Creación de macroimágenes mediante técnicas de *stitching* por software.
 - Estudio y evaluación de las bibliotecas *opensource* de *stitching* de imágenes disponibles.
- Aplicación del prototipo a la agricultura de precisión:
 - Estudio comparativo de los principales indicadores estadísticos utilizados en agricultura de precisión basados en imagen termográfica y evaluación de su adecuación para el sistema desarrollado.
 - Desarrollo de algoritmos de aplicación del prototipo a la agricultura de precisión.

1.3 ELEMENTOS QUE COMPONEN EL SISTEMA

Para lograr los objetivos que se han descrito en el apartado anterior, se dispone de los siguientes elementos que compondrán la plataforma para adquisición de imágenes termográficas con aplicación en la agricultura:

- Flir Lepton.

Es la cámara termográfica más compacta y de menor coste que se distribuye actualmente en el mercado. La resolución de esta cámara es 80 x 60 píxeles y es capaz de detectar longitudes de onda desde 8 a 14 micrones. La versión de esta cámara de la que disponemos es la 1, existiendo modelos posteriores. Los detalles de este componente se detallarán en el Capítulo 3.



Ilustración 1.1. Flir Lepton

- Flir Dev Kit.

Es una placa de desarrollo que facilita el uso de la cámara termográfica Flir Lepton, proporcionando los pines necesarios para su comunicación con otros dispositivos.

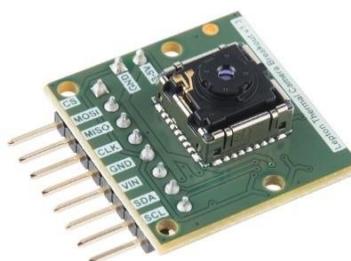


Ilustración 1.2. Flir Dev Kit

- Intel Edison.

Es un módulo de cómputo basado en un procesador Intel Atom de doble núcleo y 32 bits. Cuenta con 1GB de memoria RAM además de conectividad Wi-Fi y Bluetooth. Funciona con una distribución de Linux llamada Yocto. La relación entre su potencia y tamaño, junto a su pequeño consumo de energía lo hace idóneo para este trabajo.

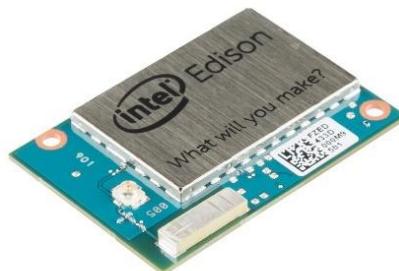


Ilustración 1.3. Intel Edison

- Mini Breakout Board.

Es una placa de desarrollo para Intel Edison que nos ofrece las conexiones necesarias para poder trabajar con este módulo. Por un lado, nos proporciona conexiones USB para alimentación y comunicación con otros dispositivos y, por otro lado, pines para conectar al módulo mediante cableado dispositivos como sensores, actuadores, etc.



Ilustración 1.4. Mini Breakout Board

1.4 ENTORNO DE TRABAJO

En los apartados anteriores se han mencionado distintos elementos particulares que se emplearán a lo largo del proyecto para la consecución de los objetivos planteados. En este apartado se trata de dotar de una visión más clara sobre el entorno global en el que se ha trabajado con estos elementos:

En primer lugar, se contará con un PC sobre el que está instalado el sistema Windows, que se utilizará para programar el microcontrolador. Intel Edison permite trabajar con diferentes entornos de desarrollo, entre ellos: *Arduino IDE*, para programar en lenguaje Arduino; *Intel XDK*, para utilizar el lenguaje Java; e *Intel System Studio IoT Edition*, basado en el conocido entorno Eclipse y que permite utilizar los lenguajes C, C++ y Java. En el caso de este proyecto, se trabajará con el entorno *Intel System Studio IoT Edition* por la potencia que ofrece al poder trabajar en lenguaje C o C++. Este entorno de desarrollo es gratuito y se puede encontrar en la página oficial de Intel [8].

A continuación, para cargar los códigos en nuestra placa, solo es necesario conectar la placa de desarrollo *Intel Edison Mini Breakout Board* con el PC mediante dos cables micro-USB, los drivers para Windows van incluidos con el entorno de programación

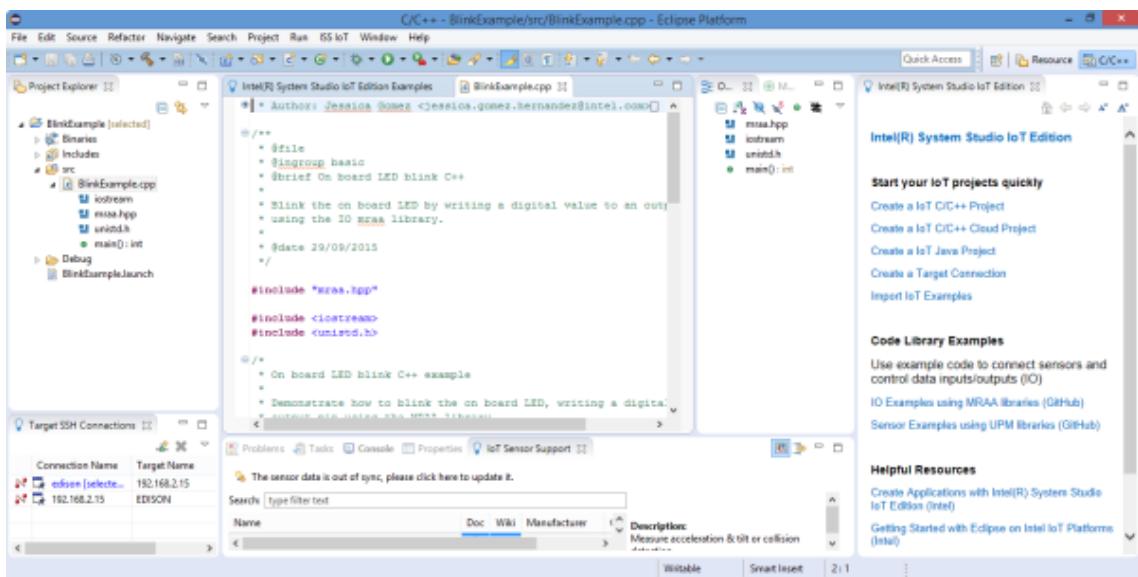


Ilustración 1.5. Entorno Intel System Studio IoT Edition

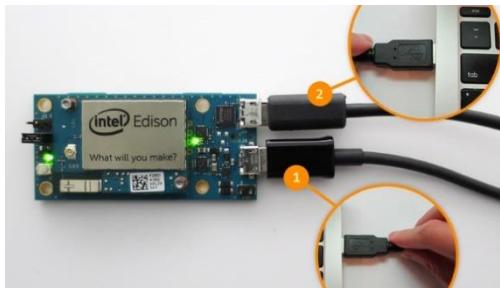


Ilustración 1.6. Conexión de Intel Edison a PC

Por otro lado, se utilizará Matlab, una herramienta de software matemático que nos facilitará el tratamiento de imágenes. Este software cuenta con herramientas como *Image Processing Toolbox*, que contiene bibliotecas para el análisis y desarrollo de algoritmos de imágenes.

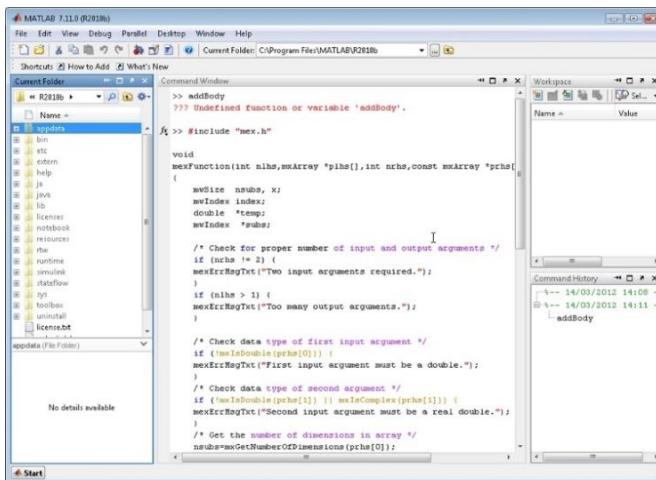


Ilustración 1.7. Entorno Matlab

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria de este Trabajo de Fin de Máster se ha estructurado del siguiente modo:

1. Introducción y objetivos. En el actual capítulo se explica la motivación de este proyecto y se han fijado los objetivos, determinando el alcance que debe tener este trabajo. También se establecen los pasos que se han llevarán a cabo y los medios que se emplearán para su realización.
2. Estado de la técnica. En este capítulo se realiza una investigación de las aplicaciones de la termografía en la agricultura de precisión y de los principales indicadores que se utilizan. Además, se presentan los sistemas comerciales que se utilizan actualmente en la agricultura de precisión y sus características.
3. Desarrollo de un prototipo de cámara termográfica para UAVs basado en la cámara termográfica Flir Lepton. En primer lugar, se realiza un estudio de la plataforma Intel Edison y de las características de la cámara termográfica Flir Lepton. A continuación, se diseña una interfaz de comunicaciones y se realiza un algoritmo para la obtención y almacenamiento de imágenes.
4. Procesamiento de las imágenes de Flir Lepton. Estudio de las principales librerías y herramientas para el de importación, post-procesado, composición y análisis de imágenes. Se compararán distintos programas para evaluar su adecuación en la aplicación de este proyecto.
5. Teoría del índice del estrés hídrico del cultivo. Se desarrollará la teoría de este índice utilizado para cuantificar el estrés hídrico del cultivo, que se utilizar en agronomía para optimizar la programación del riego.
6. Procedimiento de toma de datos y análisis mediante el prototipo desarrollado con ejemplo. En este capítulo se sugiere un método de toma de datos para el sistema diseñado y se realiza un ejemplo.
7. Conclusiones. Por último, se analizan los resultados obtenidos con el prototipo y las conclusiones finales obtenidas de dichos resultados. También se comentan las posibilidades en la evolución de este dispositivo para futuros trabajos.

2. ESTADO DE LA TÉCNICA

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA

La termografía es una técnica con un uso bastante amplio en diferentes sectores industriales, así como en investigación (industria automovilística, aeronáutica, armamentística, construcción civil, electrónica, medicina, agricultura, fisiología vegetal, etc.). Esta técnica se basa en la detección de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos, convirtiendo la información obtenida en imágenes visibles con información sobre la temperatura de la superficie de los mismos. Los objetos con una temperatura superior al 0 absoluto ($0\text{ }^{\circ}\text{K}$, $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) emiten energía electromagnética en el rango de los infrarrojos ($0,75\text{ }\mu\text{m}$ - $100\text{ }\mu\text{m}$). Según la ley de Stefan-Boltzmann, esta radiación infrarroja emitida aumenta con la temperatura de los cuerpos:

$$I = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

La ley de Stefan-Boltzmann es aplicable a cuerpos negros, que son cuerpos ideales, emisores perfectos de radiación infrarroja; o lo que es lo mismo, cuentan con una emisividad (ε) igual a 1. La emisividad se define como la capacidad que tiene todo cuerpo para irradiar energía. Los cuerpos reales tienen una $\varepsilon < 1$, por lo que además de emitir radiación infrarroja, también reflejan una parte de la radiación infrarroja incidente.

Por ello, la radiación total infrarroja que es detectada por la cámara termográfica es el sumatorio de la radiación emitida y de la reflejada por el objeto observado, considerándose como no significativa la absorción de la radiación infrarroja por parte de la masa de aire existente entre el objeto estudiado y el sensor de la cámara, cuando la distancia existente no es demasiado grande (algunos metros) o cuando el sensor de infrarrojos trabaja en el rango de los $3\text{-}5$ o $7\text{-}14\text{ }\mu\text{m}$, donde la transmisividad de la atmósfera a los infrarrojos es máxima.

$$I = \varepsilon\sigma T_S^4 + (1 - \varepsilon)W_{background} \quad (2)$$

En el caso de que la distancia entre la cámara y el objeto estudiado sea mayor (por ejemplo, en el caso de observaciones aéreas), resulta necesario introducir otro factor; la emisión atmosférica (W_{atm}), así como la transmisividad de la atmósfera a la radiación (τ) de acuerdo con la ecuación:

$$I = \tau[\varepsilon\sigma T_S^4 + (1 - \varepsilon)W_{background}] + W_{atm} \quad (3)$$

Hoy en día, la mayoría de los softwares con los que trabajan las cámaras termográficas incluyen ya este tipo de correcciones, permitiendo así el desarrollo de mediciones más exactas de la temperatura de los objetos observados. Para ello, es necesario introducir los valores de emisividad, humedad relativa y la temperatura del aire, la distancia al objeto y la temperatura reflejada por el ambiente circundante. Este

último parámetro puede ser estimado midiendo la temperatura reflejada por una pieza de papel de aluminio irregular, colocada entre la cámara y el objeto a medir, y usando para ello el valor de emisividad máxima ($\epsilon = 1$).

2.2 INTRODUCCIÓN A LA APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA EN LA MONITORIZACIÓN DE LOS CULTIVOS

La agricultura moderna cuenta cada vez más con un mayor nivel de tecnificación, a través de la incorporación de nuevas tecnologías usadas en otras disciplinas diferentes al sector agrario. Un ejemplo es el uso de sistemas de detección remota para la monitorización del estado fisiológico de los cultivos. Estos sistemas se basan en la detección y registro de las variaciones espectrales de los cultivos tanto en el rango de la radiación visible, como dentro del espectro electromagnético en el rango del infrarrojo.

La detección remota está siendo cada día más usada para el desarrollo de estudios relacionados con la eco-fisiología vegetal, y las aplicaciones prácticas de la misma en la agricultura y ciencias forestales, ya que la información ofrecida puede ser relacionada con varios parámetros morfo-fisiológicos (biomasa, transpiración y fotosíntesis). Las ventajas de la detección remota son varias: es un método no invasivo, no destructivo, rápido y permite trabajar a diferentes escalas (desde plántulas hasta grandes áreas de cultivo lo que permite el registro de datos en tiempo real y obtener información cuantitativa sobre la variabilidad de los cultivos).

Una monitorización eficaz del estado hídrico de los cultivos es esencial para optimizar el uso del agua en la agricultura, así como su desarrollo y producción final. Esto es especialmente significativo en el caso de que se estén desarrollando prácticas de riego deficitario, en donde la cantidad de agua aplicada es inferior a la demandada por el cultivo, lo que provoca situaciones de déficit hídrico tanto en el suelo como en la planta.

En términos fisiológicos, una situación de estrés hídrico moderado promueve el cierre de los estomas y por ende, un descenso de la conductividad estomática al vapor de agua, a lo cual va unido una disminución más o menos significativa de la actividad fotosintética, provocando un incremento de la eficiencia intrínseca del uso del agua. Sin embargo, una mala gestión del riego deficitario puede causar importantes pérdidas en la producción y/o la calidad de la misma, en particular, si dicha monitorización no se realiza de una forma precisa en los períodos más críticos para el cultivo, que coinciden con las épocas de mayor demanda evapotranspirativa. Para evitar este tipo de situaciones, son varios los indicadores de estrés hídrico usados en la monitorización del estado fisiológico de los cultivos, como podemos ver en el siguiente cuadro:

	Sensibilidad	Coste	Aplicación comercial
Indicadores directos			
Potencial hídrico foliar / tallo	Moderada/Alta	Bajo/Moderado	Limitada
Conductancia estomática al vapor de agua	Moderada	Alto	Limitada
Flujo de savia	Alta	Moderado	Buena
Fluorescencia de la clorofila	Alta	Alto	Limitada/Buena
Indicadores indirectos			
Temperatura de la cubierta vegetal (medición puntual)	Moderada	Bajo	Buena
Termografía	Alta	Alto	Buena
Diámetro del tronco (dendrometría)	Alta	Bajo	Limitada/Buena

Entre los indicadores de estrés hídrico anteriormente citados, la temperatura de la cubierta vegetal (T_c) es el resultado de un balance energético entre las ganancias de energía (radiación incidente y la temperatura del aire circundante) y las pérdidas (debido a la transpiración y evaporación del agua de la superficie de las hojas, que trae consigo una pérdida del calor latente de la superficie estudiada y los procesos de transferencia energética por convección).

Las primeras investigaciones asociadas a termografía en la agricultura de precisión fueron realizadas para la detección de estrés hídrico, esto es, a detectar las regiones donde la disponibilidad de agua es menor que las exigencias del cultivo. Estas investigaciones se centraron en mediciones de la copa de los árboles haciendo uso de sensores manuales (Jackson y otr., 1981; Idso, 1982) [20,21], obteniendo resultados con ciertas limitaciones generadas por los equipos existentes en ese momento. Así, se produjo la necesidad de contar con mediciones más integrales del cultivo, lo cual se derivó en el uso de cámaras termográficas de última generación con una calidad mayor y tamaño menor, que pudieran ser transportadas por un vehículo aéreo. La termografía aérea permite medir la variación de la temperatura foliar de las plantas de una misma parcela de cultivo.

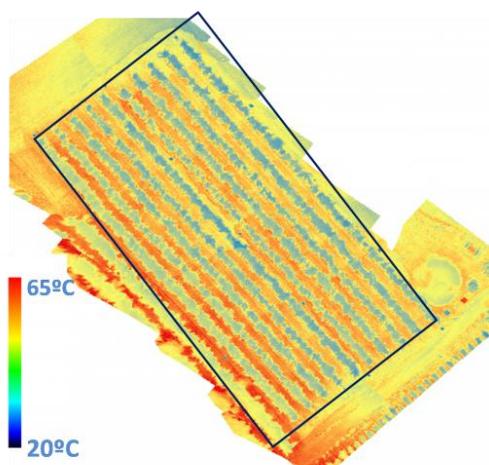


Ilustración 2.1. Campo de manzanos medido mediante una imagen térmica. Los manzanos permanecen con una temperatura inferior al suelo.

Gracias a las imágenes remotas se puede obtener información del estado hídrico de la parcela, pudiendo evaluar qué zonas están siendo bien regadas y cuales están sometidas a un exceso de riego o déficit hídrico.

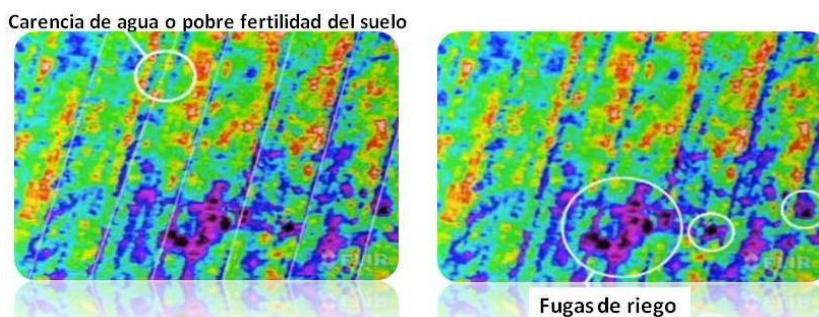


Ilustración 2.2. Imagen termográfica de una zona con carencia de agua y de una fuga de riego

La utilización de la termografía de infrarrojos como nueva herramienta fisiológica para la programación del riego deficitario controlado fue descrito en 2009 por María Fernanda Ortúño, Ingeniero Agrónomo en la Universidad Politécnica de Valencia, donde comenta que: “Es ampliamente conocido que el agua constituye uno de los factores más limitantes de la producción agraria en zonas de limitada disponibilidad del recurso [...]. La estrecha relación existente entre el cierre estomático y la temperatura foliar hacen de la termografía de infrarrojos una técnica que permite estimar, de forma precisa, no destructiva y en tiempo real, la apertura estomática, constituyendo una herramienta fisiológica de gran utilidad para la toma de decisiones en la aplicación o manejo de algunas prácticas culturales en base al estado de la planta”.

Por tanto, uno de los usos más importantes que han surgido del estudio del estrés hídrico es la programación del riego deficitario controlado. Esto consiste en una estrategia de aplicación de agua basada en la idea de reducir los aportes hídricos en aquellos periodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción y calidad de la cosecha, y de cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo (Sánchez-Blanco, M^a. J. Torrecillas, A. 1995). Por tanto, es de gran utilidad ya que esta estrategia permite reducir los costes, optimizando el proceso de producción.

Para realizar esta estrategia de producción es necesario el cálculo del estrés hídrico. Existen varios índices de estrés hídrico para las plantas, y la mayoría se basa en la diferencia existente entre la temperatura de la superficie de la planta y la temperatura del aire. Además, para tener una información más precisa, estos índices suelen combinarse con otros que indican el vigor de las plantas.

El índice de estrés hídrico más utilizado es el conocido como *Crop Water Stress Index*, que se define mediante la siguiente expresión:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LI}}{(T_c - T_a)_{LS} - (T_c - T_a)_{LI}}$$

Donde $(T_c - T_a)$ es la diferencia de temperatura medida de hoja-aire, $(T_c - T_a)_{LI}$ es el límite inferior esperado en el caso de un dosel potencialmente transpirando y $(T_c - T_a)_{LS}$ es el límite superior esperado en el caso de un dosel sin transpirar. Estos límites inferiores y superiores pueden obtenerse siguiendo la metodología propuesta por Idso y otr. 1981.

En las siguientes figuras podemos ver un ejemplo del cálculo del CWSI sobre una parcela de viñedos:

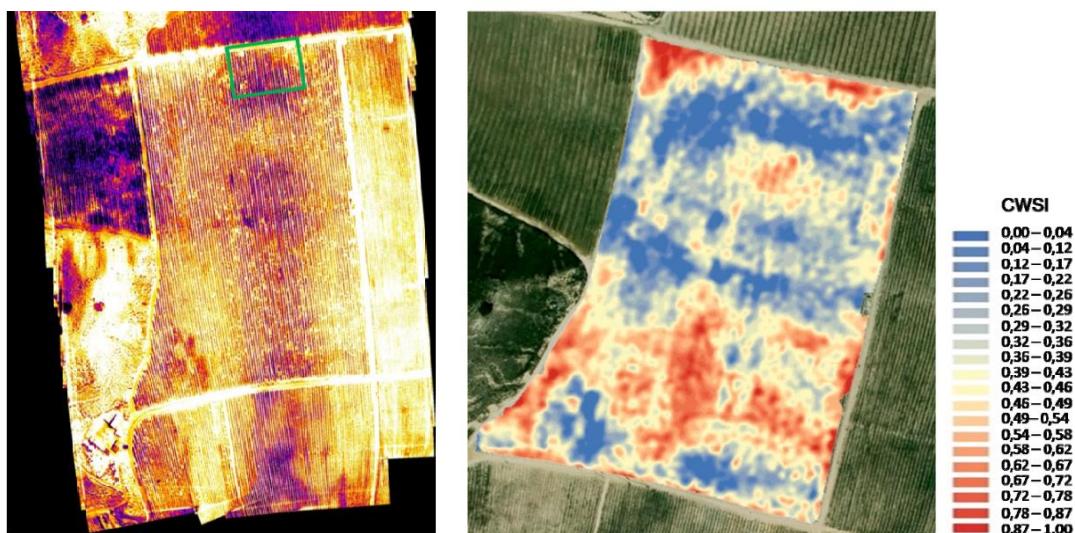


Ilustración 2.3. Ejemplo de imagen termográfica de una parcela de viñedos y cálculo del CWSI

Además de para la estimación del estrés hídrico, existen otras aplicaciones potenciales de la termografía dentro del sector agrario, como son las siguientes:

- Absorción de la clorofila (que ayuda a la identificación de las distintas especies de plantas).
- Análisis de la distribución de la irrigación del agua.
- Determinación de la humedad de la vegetación y suelo.
- Discriminación de la vegetación y evaluación del vigor.
- Discriminación entre el suelo y la vegetación.
- Evaluación de impacto de una sequía.
- Identificación de las diferentes especies de plantas.
- Conteo del número de plantas.

Es importante señalar que en la actualidad existen aplicaciones más avanzadas que no sólo utilizan el espectro infrarrojo, sino una combinación de diferentes franjas del espectro visible e invisible mediante la toma de imágenes con cámaras multiespectrales. Utilizando este tipo de cámaras, somos capaces de calcular una mayor cantidad de índices para evaluar la variabilidad de los cultivos. El índice principal que se utiliza en agricultura de precisión es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés. Es un índice usado para estimar la cantidad,

calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de imágenes multiespectrales, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético: el infrarrojo cercano o reflejado, el infrarrojo lejano o térmico y el rojo del espectro visible:

$$NDVI = \frac{(IR_{cercano} - ROJO)}{(IR_{cercano} + ROJO)}$$

El rango de valores de este índice es desde 0 hasta 1. La siguiente figura es un ejemplo del cálculo del NDVI en una serie de parcelas:

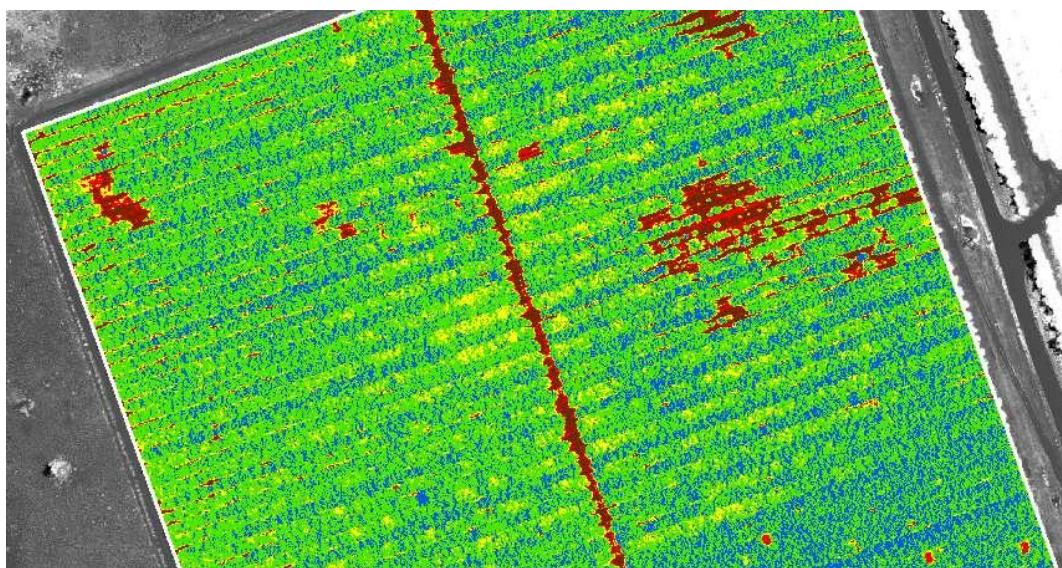


Ilustración 2.4. Ejemplo de cálculo de NDVI a partir de imagen multiespectral

En áreas donde la cobertura vegetal es baja (es decir, <40%) y la superficie del suelo está expuesta, la reflectancia de la luz en el rojo y el infrarrojo cercano puede influir en los valores del índice de vegetación. Esto es especialmente problemático cuando se hacen comparaciones a través de diferentes tipos de suelos que pueden reflejar diferentes cantidades de luz en las longitudes de onda roja e infrarroja cercana (es decir, suelos con diferentes valores de brillo). El índice de vegetación ajustado al suelo, o SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*), se desarrolló como una modificación del NDVI para corregir la influencia del brillo del suelo cuando la cubierta vegetal es baja. El SAVI está estructurado de forma similar al NDVI, pero con la adición de un "factor de corrección del brillo del suelo":

$$SAVI = \frac{(IR_{cercano} - ROJO)}{(IR_{cercano} + ROJO + L)} (1 + L)$$

El valor de L varía por la cantidad o cubierta de vegetación verde: en regiones de vegetación muy alta, L = 0; Y en áreas sin vegetación verde, L = 1. Generalmente, L = 0.5 funciona bien en la mayoría de las situaciones y es el valor predeterminado utilizado. Cuando L = 0, entonces SAVI = NDVI.

Otro índice utilizado con cámaras multiespectrales es el Índice de Vegetación Mejorado, también conocido como EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Es un índice optimizado de vegetación diseñado para mejorar el espectro de vegetación con sensibilidad mejorada en regiones de alta biomasa y una mejora de la monitorización de la vegetación mediante un desacoplamiento de la señal de fondo de la copa y una reducción de las influencias atmosféricas. Este índice se calcula con la siguiente expresión:

$$EVI = G \frac{(IR_{cercano} - ROJO)}{ROJO + C1 * ROJO - C2 * AZUL + L}$$

Utiliza las bandas Infrarrojo cercano, rojo, azul y una serie de coeficientes que dependen del método utilizado. Por ejemplo, en el algoritmo MODIS-EVI son: L=1, C1 = 6, C2 = 7.5, and G (factor de ganancia) = 2.5.

La diferencia principal con el NDVI es que este es más sensible a la clorofila, el EVI es más sensible a los cambios estructurales de las copas de las plantas, por tanto, son índices que complementan.

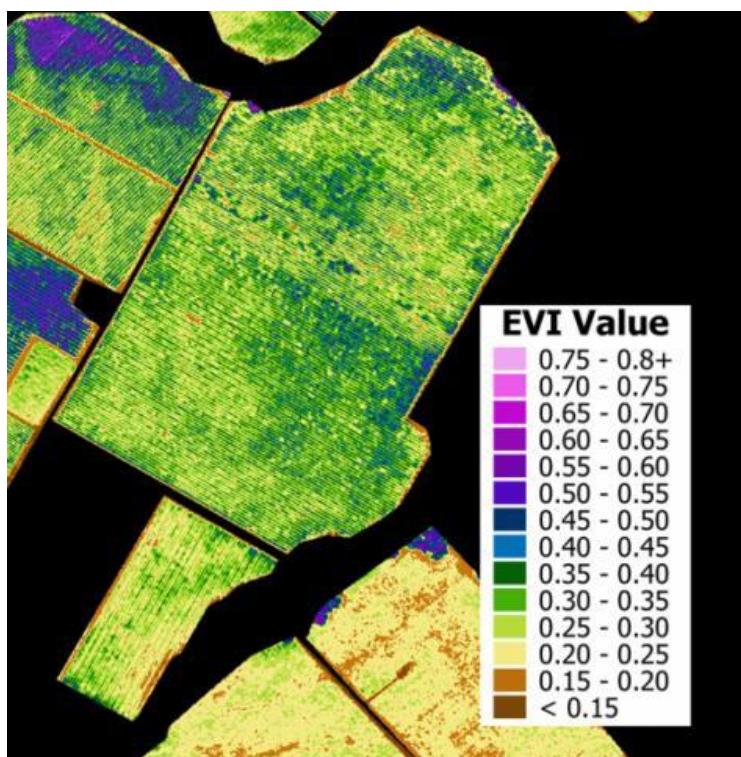


Ilustración 2.5. Ejemplo de imagen termográfica de una parcela de viñedos y cálculo del CWSI

Como conclusión de este apartado, para el cálculo de índices avanzados como el NDVI es necesario el uso de equipos multiespectrales. Para este trabajo se dispondrá de una cámara termográfica monobanda, por tanto no se puede utilizar para el cálculo de estos índices. En consecuencia, en este trabajo se estudiará el índice CWSI, ya que es el más utilizado actualmente para el análisis del estrés hídrico y la programación de riegos.

2.3 SISTEMAS SIMILARES COMERCIALES DE APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA EN LA AGRICULTURA

En este apartado se describirán los sistemas que se pueden encontrar en el mercado similares al que se plantea en este proyecto, de aplicación en la agricultura de precisión. Se expondrán sus características y por último, se realizará una reflexión de lo que puede esperarse conseguir de este proyecto en comparación con lo ya existente.

2.3.1 PARROT SEQUOIA

La solución Parrot Sequoia [17] se compone de dos sensores. El sensor "multiespectral", ubicado frente a las plantas, capta la luz que reflejan las plantas en cuatro partes diferentes: el verde, el rojo, así como dos bandas infrarrojas invisibles para el ojo humano. El sensor "sunshine", ubicado encima del dron, memoriza la intensidad de la luz que emana del sol en estas mismas cuatro bandas de luz.

El sensor multiespectral Parrot Sequoia se adapta a todos los drones, tanto multirotores como de ala fija gracias a su formato de minicámara y su ligereza. Sus conexiones wifi y USB hacen que los datos sean accesibles desde todos los soportes. Además, este sistema integra un módulo GPS que aumenta significativamente la precisión de los datos recogidos sin tener que recurrir a los datos memorizados por la plataforma de transporte: avión, dron, tractor, etc. Sus diferentes componentes internos le permiten conocer en todo momento su altitud, su velocidad de vuelo y su situación para adaptar su velocidad de captura en consecuencia.



Ilustración 2.6. Parrot Sequoia

Bandas del espectro	Verde (550 BP 40), Rojo (660 BP 40), Red Edge (735 BP 10), Infrarrojo cercano (790 BP 40)
Resolución cámara RGB	4608 x 3456 Píxeles
Resolución cámaras monobanda	1280 x 960 Píxeles
Peso	72 g
Dimensiones	59 x 41 x 28 mm
Precio	3849 Euros

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas Parrot Sequoia

Además, Parrot Sequoia es compatible con el software Atlas, que permite almacenar en la nube y visualizar toda la información recogida por el sensor, y realizar diferentes estudios, como el cálculo del NDVI.

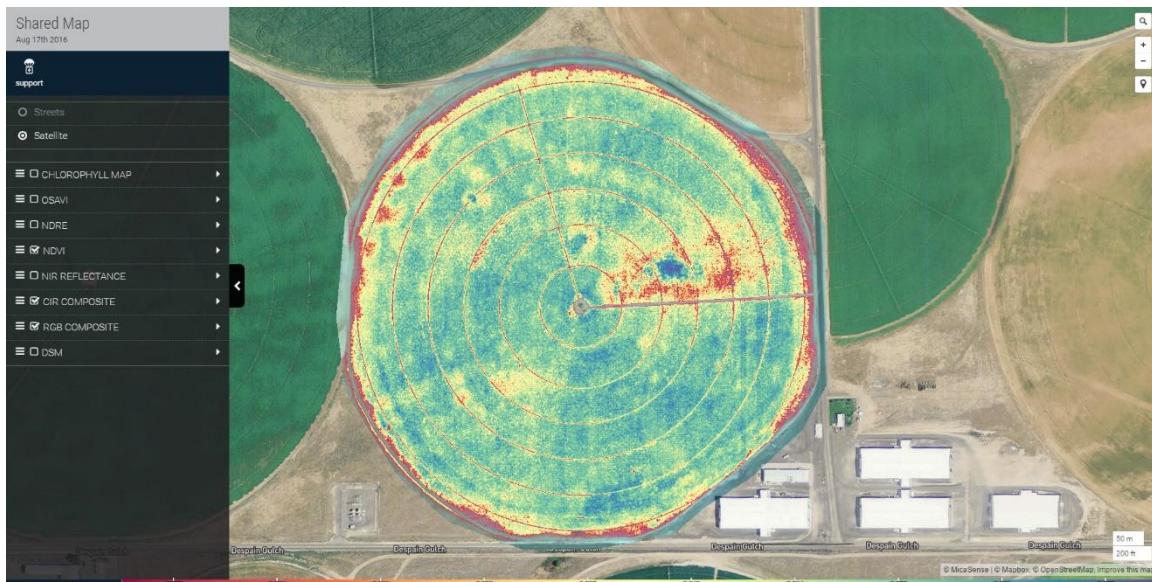


Ilustración 2.7. Interfaz del software Atlas

2.3.2 SENSEFLY EBEE

[18] En este caso se trata de un sistema compuesto por un dron de ala rígida al que se le pueden incorporar distintos sensores, como cámaras RGB, termográficas o multiespectrales. La ventaja de utilizar un dron de ala rígida reside en la alta autonomía que puede ofrecer.

Este dron profesional cuenta con una estructura ultraligera y absorbente de impactos, y posee un software propio planificador de rutas automáticas mediante

GPS. Es capaz de transmitir los datos de las mediciones en tiempo real a una estación remota a través de una frecuencia de 2,4 GHz. Este sistema también proporciona un software propio para la creación de mapas 3D y ortomosaicos, en los que permite realizar una serie de estudios, como por ejemplo cálculos de índices de vegetación.



Ilustración 2.8 Dron SenseFly eBee

Los accesorios que se pueden adquirir para este sistema son:

- Cámara RGB *Canon G9x*. Esta cámara de 20 MP adquiere imágenes del espectro visible. Su exposición parámetros y la salida de los archivos de imagen RAW se pueden ajustar de forma manual.
- *thermoMAP*. Es una cámara térmica de infrarrojos que incluye un obturador para la calibración radiométrica durante el vuelo. Puede capturar videos e imágenes fijas en modo térmico, permitiéndole generar mapas térmicos de un emplazamiento.



Ilustración 2.9. Cámara termográfica thermoMAP

Temperatura de escena	-40°C to 160°C
Resolución	640 x 512 Píxeles
Peso	134 gramos

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas cámara termográfica thermoMAP

- *Sequoia*. Este sensor de Parrot también es compatible con el dron Sensefly eBee.

El precio de este sistema es aproximadamente 12000 dólares, dependiendo de los accesorios con los que se adquiera.

2.3.3 FLIR TAU 2

Flir Tau 2 [19] es una cámara termográfica diseñada entre las empresas Flir (empresa líder en el sector de las cámaras termográficas) y DJI (empresa líder en el sector de los drones). Esta cámara está diseñada para ser utilizada en los drones de DJI modelos *Inspire* y *Matrice M100*.



Ilustración 2.10. *Flir Tau 2*

En este caso, no cuenta con un software propio de creación de mapas y análisis de datos, y el software de vuelo que emplea es el de DJI. El sensor también se vende por separado para aplicaciones que no requieran de un vehículo. Por tanto, se requiere de un software de terceros para realizar estudios de agricultura de precisión.

Existen tres modelos de esta cámara termográfica. A continuación, se detallan sus características principales:

	Tau2 640	Tau2 336	Tau2 324
Resolución	640 × 512 P	336 × 256 P	324 × 256 P
Bandapectral	7.5 - 13.5 µm		
Temperatura de escena (Alta ganancia)	-25°C to +135°C	-25°C to +100°C	-25°C to +135°C
Temperatura de escena (Baja ganancia)	-40°C to +550°C		
Tamaño	1.75" x 1.75" x 1.18"		
Peso	100 gramos		
Precio	Desde 2000 dólares		

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas cámara termográfica *Flir Tau 2*

2.3.4 DISCUSIÓN

En este punto estamos en disposición de realizar una comparativa de los proyectos similares presentados y el sistema propuesto en este trabajo:

- De los sistemas presentados, el precio más bajo lo presenta la cámara termográfica Flir Tau 2, que no ofrece un software para el procesamiento de imágenes y análisis posteriores de resultados. El precio de la licencia del software para esta cámara parte de los dos mil euros más el precio de la cámara, por tanto, estamos hablando de unos costes del sistema muy altos.
- La resolución y la calidad de imagen que ofrecen los sensores de estos sistemas son superiores a las que ofrece Flir Lepton, debido a la notable diferencia en el coste del sensor.
- Estos sistemas comerciales son cerrados, es decir, sólo se pueden ejecutar las funciones que están implementadas y no permiten introducir nuevas funciones por parte del usuario. En este proyecto se desarrollará una plataforma que permitirá al usuario el desarrollo de sus propias funciones.

3. DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CÁMARA TERMOGRÁFICA PARA UAVS BASADO EN FLIR LEPTON

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO

En este apartado se presentan los componentes con los que se realizó el prototipo y sus características más importantes. Estos componentes son la cámara termográfica Flir Lepton, el módulo computacional Intel Edison y la placa de desarrollo Mini Breakout Board.

3.1.1 FLIR LEPTON

Flir Lepton es la cámara termográfica sin refrigeración de menor tamaño y coste que se ofrece actualmente en el mercado. Debido su reducido tamaño, resulta muy útil para la creación de aplicaciones en UAVs, en las que el peso y el tamaño de la aeronave tienen una gran influencia en el coste y la autonomía.

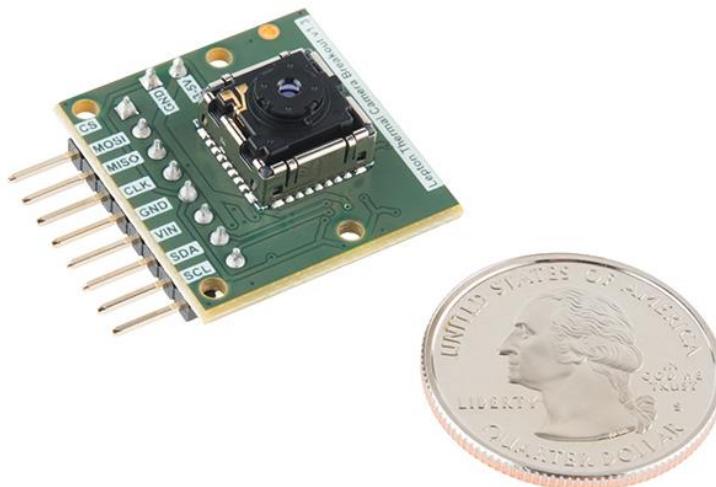


Ilustración 3.1. Flir Lepton

A continuación, se muestra una tabla con sus características [1]:

Dimensiones (sin socket)	8.5 x 11.7 x 5.6 mm
Lente	25º/51º HFOV, 63,5º diagonal (f/1.1 silicon doublet)
Sensor	Sensor LWIR Longitud de onda 8 a 14 µm
Resolución imágenes	80 x 60 Píxeles
Sensibilidad térmica	<50 mK
Tasa de captura de imágenes	<9 Hz
Tiempo de captura	<0,5 segundos
Interfaz de comunicación	SPI, MIPI, I ² C
Consumo de energía	150 mW

Tabla 3.1. Características Flir Lepton

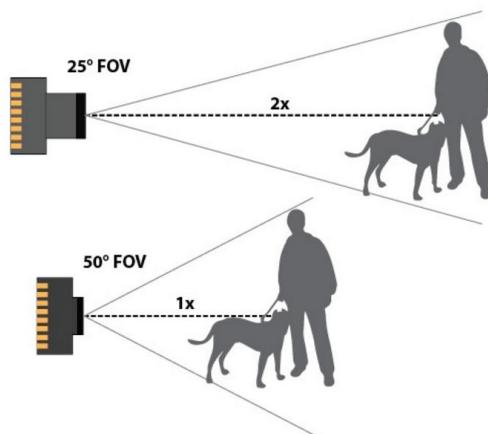


Ilustración 3.2. Grados de apertura lente Flir Lepton

En la siguiente figura se muestra la respuesta espectral del sensor para diferentes longitudes de onda:

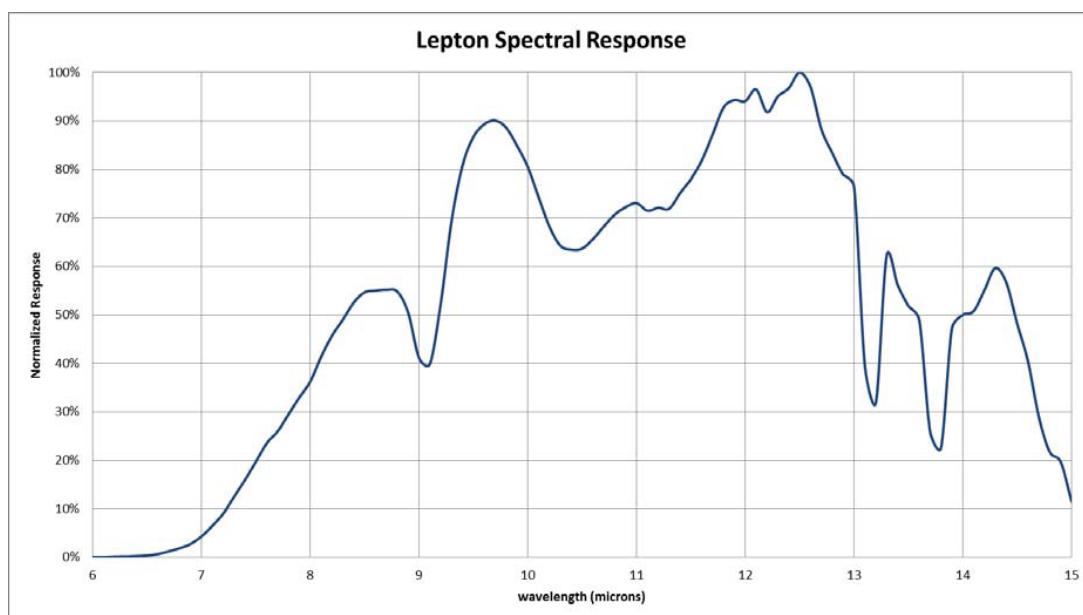


Ilustración 3.3. Respuesta espectral sensor Flir Lepton

3.1.2 INTEL EDISON

Intel Edison es un módulo computacional ofrecido por Intel como placa de desarrollo para aplicaciones del *Internet de las Cosas* y dispositivos *wearable*. Entre sus cualidades destaca su relación potencia/tamaño y su reducido consumo de energía.



Ilustración 3.4. Módulo Intel Edison

A continuación, se muestra una tabla con sus características:

Dimensiones	35,5 x 25 x 3,9 mm
Procesador	Intel Atom (2 núcleos 400 MHz)
Sistema operativo	Yocto Linux 32 bits
Memoria RAM	1 GB LPDDR3
Memoria Flash	4 GB eMMC
Conectividad	Wi-Fi, Bluetooth 4.0
Nº Entradas/Salidas digitales	20 (4 salidas PWM)
Nº Entradas analógicas	6
Puertos serie	1 Controlador
I2C	1 Controlador
SPI	1 Controlador con 2 Chip Selects
Tarjeta SD	1 Interfaz
Consumo de energía	13 mW (standby), 35 mW (Wi-Fi)
Input	3,3 a 4,5 V
Output	100 mA @3,3 V y 100 mA @1,8mV

Tabla 3.2. Características Intel Edison

Intel Edison es compatible con las placas de desarrollo *Arduino Kit for Intel Edison* y *Intel Edison Mini Breakout Board*. Para este trabajo se utilizó la placa Mini Breakout Board, por su tamaño más reducido y la posibilidad de conectar una batería a esta placa.



Ilustración 3.5. Placas de desarrollo Arduino Kit y Mini Breakout Board para Intel Edison

3.1.2.1 LIBRERÍA MRAA

MRAA es una librería de C/C ++ con enlaces a Python, Javascript y Java para interactuar con las Entradas y salidas en Galileo, Edison y otras plataformas, con una API (*Application Programming Interface*) estructurada donde los nombres y numeración de puertos coinciden con la placa en la que se encuentra. El uso de esta librería te permite no crear el código para un hardware específico, mediante detección de *hardware* que se realiza en la ejecución se pueden crear códigos portables que funcionarán en todas las plataformas soportadas.

El objetivo de esta librería es facilitar a los desarrolladores y fabricantes del mapeo de sus sensores y actuadores sobre el hardware soportado y permitir el control del protocolo de comunicación de bajo nivel mediante lenguajes y construcciones de alto nivel.

La versión actual de la librería y que se ha utilizado para este trabajo es la v.0.9.6. Toda la información referente a esta librería se puede encontrar en la página oficial de Intel [9].

3.2 INTERFAZ DE COMUNICACIONES

La cámara termográfica Flir Lepton es compatible con las interfaces de comunicación estándar SPI (*Serial Peripheral Interface*), I²C (*Inter Integrated Circuit*) y MIPI (*Mobile Industry Processor Interface*). Para el envío de imágenes, Flir Lepton utiliza SPI y MIPI, mientras que para controlar la configuración de la cámara utiliza I²C. De esta manera, es posible modificar su configuración sin interrumpir la toma de imágenes mediante el uso de dos protocolos distintos.

Intel Edison es compatible de manera estándar con los protocolos SPI e I²C. Para el desarrollo de este trabajo se desarrolló un algoritmo de comunicaciones basado en el protocolo SPI para la recepción de las imágenes de la cámara termográfica Flir Lepton.

3.2.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIONES SPI EN INTEL EDISON

Es importante señalar que en la versión de Intel Edison hasta la fecha (1.6.2 *Yocto* Linux y placa v2.1) tiene problemas con la interfaz SPI, para solucionar estos problemas en el trabajo, se creó un *kernel* customizado, como se describe en el Anexo III. El protocolo de comunicación SPI [7] es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. El bus de interfaz de periféricos serie o bus SPI es un estándar para controlar casi cualquier dispositivo electrónico digital que acepte un flujo de bits serie regulado por un reloj.

Se define como un protocolo de comunicaciones síncrono, es decir, la sincronización y transmisión de datos es regulada por una señal de reloj. En este protocolo siempre hay un dispositivo maestro (en nuestro caso la placa Intel Edison), que controla una serie de dispositivos esclavos. En este protocolo se definen típicamente 4 líneas o señales:

- MISO (*Master In Slave Out*). La línea por la cual el esclavo manda datos al maestro.
- MOSI (*Master Out Slave In*). Es la línea por la que el maestro manda datos a los esclavos.
- SCK (*Serial Clock*). Es la señal de reloj que sincroniza la transmisión de datos, y es generada por el maestro.
- SS (*Slave Select*). Es el pin a través del cual el maestro selecciona a un esclavo para comunicarse con él. Cuando el pin SS se encuentra en estado LOW o "0", se produce la comunicación con el maestro.

En la siguiente figura se muestra un esquema de conexión maestro-esclavo en SPI:

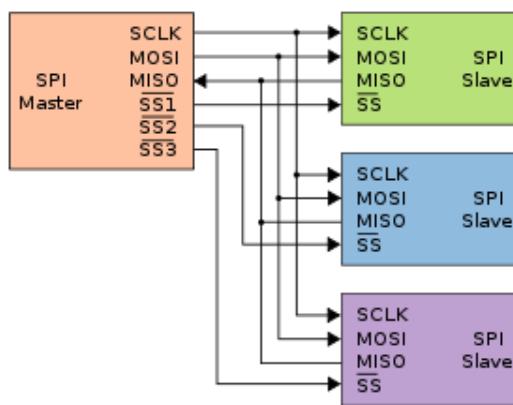


Ilustración 3.6. Esquema conexión SPI Maestro-Esclavo

La cadena de bits es enviada de manera síncrona con los pulsos del reloj, es decir, con cada pulso el dispositivo *Master* envía un bit. Para que empiece la transmisión, el dispositivo *Master* establece la señal SS (*Slave Select*) a cero, de manera que el dispositivo *Slave* se activa y empieza la transmisión, con un pulso de reloj al mismo tiempo que el primer bit es leído. Nótese que los pulsos de reloj pueden estar

programados de manera que la transmisión del bit se realice en 4 modos diferentes, a esto se llama polaridad y fase de la transmisión:

1. Con el flanco de subida sin retraso (Modo 0 en Intel Edison).
2. Con el flanco de subida con retraso (Modo 1 en Intel Edison).
3. Con el flanco de bajada sin retraso (Modo 2 en Intel Edison).
4. Con el flanco de bajada con retraso (Modo 3 en Intel Edison).

La frecuencia máxima de reloj que permite esta placa es 20 MHz. Para la interfaz de comunicaciones SPI en la placa Mini Breakout Board de Intel Edison se dispone de los siguientes pines [7]:

Número MRAA	Pin Físico	Pin Edison	Pinmode0	Pinmode1
9	J17-10	GP111	GPIO-111	SPI-5-CS1
10	J17-11	GP109	GPIO-109	SPI-5-SCK
11	J17-12	GP115	GPIO-115	SPI-5-MOSI
23	J18-10	GP110	GPIO-110	SPI-5-CS0
24	J18-11	GP114	GPIO-114	SPI-5-MISO
29	J19-2	V_V1P80		
30	J19-3	GND		
43	J20-2	V_V3P30		

Tabla 3.3. Pines SPI Intel Edison

En la siguiente figura se muestra el mapa físico de los pines SPI en la placa Mini Breakout Board de Intel Edison:

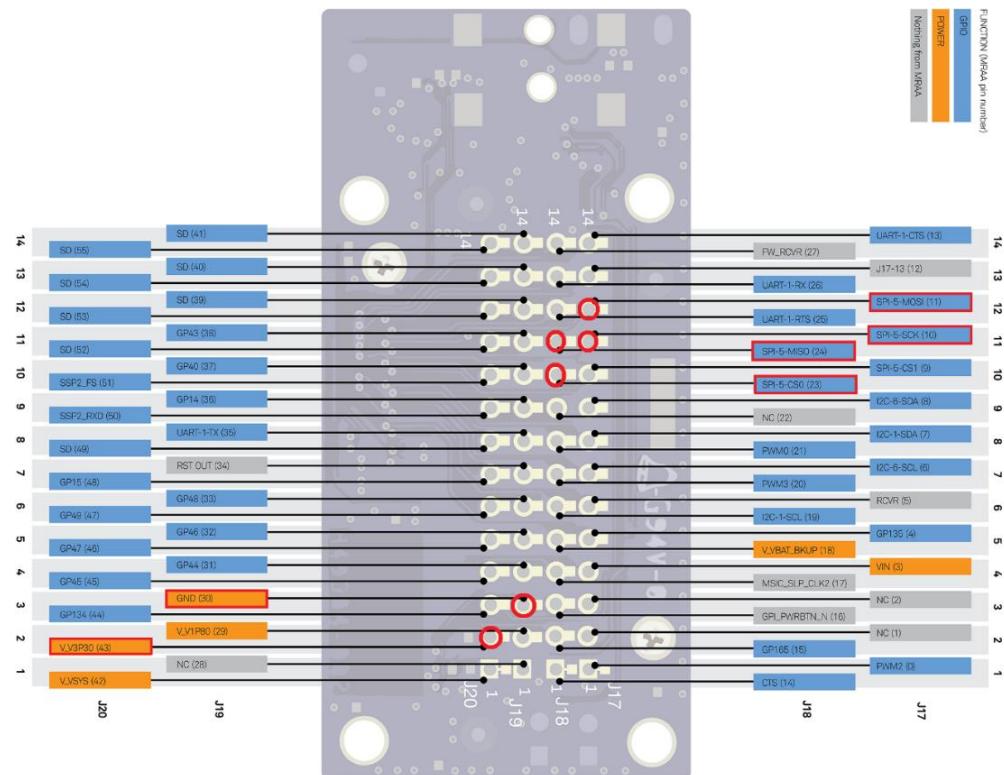


Ilustración 3.7. Mapa de pines SPI Intel Edison Mini Breakout Board

Las funciones para controlar la interfaz SPI en Intel Edison se pueden encontrar en la biblioteca MRAA. A continuación, se detallan las funciones principales utilizadas:

- Inicialización:
 - Activar bus SPI:
`mraa_spi_init (int bus)`
 - Desactivar bus SPI:
`mraa_spi_stop (mraa_spi_context dev)`
- Configuración:
 - Establecer valor frecuencia SPI:
`mraa_spi_frequency (mraa_spi_context dev, int hz)`
 - Establecer modo SPI:
`mraa_spi_mode (mraa_spi_context dev, mraa_spi_mode_t mode)`
 - Cambiar el modo lsb SPI:
`mraa_spi_lsbmode (mraa_spi_context dev, mraa_boolean_t lsb)`
 - Cambiar el número de bits por transacción (8 por defecto):
`mraa_spi_bit_per_word (mraa_spi_context dev, unsigned int bits)`
- Transferencia de información:
 - Escribir un byte de datos en bus a un dispositivo:
`mraa_spi_write (mraa_spi_context dev, uint8_t data)`
 - Escribir dos bytes de datos en bus a un dispositivo:
`mraa_spi_write_word (mraa_spi_context dev, uint16_t data)`
 - Escribir un buffer de bytes de datos en bus a un dispositivo:
`mraa_spi_write_buf (mraa_spi_context dev, uint8_t *data, int length)`
 - Escribir un buffer de 16 uint de datos en bus a un dispositivo:
`mraa_spi_write_buf_word (mraa_spi_context dev, uint16_t *data, int length)`
 - Transferir un buffer de bytes al dispositivo SPI:
`mraa_spi_transfer_buf (mraa_spi_context dev, uint8_t *data, uint8_t *rdbuf, int length)`
 - Transferir un buffer de 16 uint al dispositivo SPI:
`mraa_spi_transfer_buf_word (mraa_spi_context dev, uint16_t *data, uint16_t *rdbuf, int length)`

Un ejemplo de programa sencillo para Intel Edison en el que podemos observar las funciones aquí descritas es el que se muestra a continuación. No necesitamos ningún otro dispositivo, solo conectamos entre sí los pines MOSI y MISO de la placa y mostramos un mensaje si ha funcionado correctamente:

```
#include "mraa.h"
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>

int main() {
    mraa_spi_context spi = mraa_spi_init(0);mraa_spi_mode(spi,
MRAA_SPI_MODE0);
    mraa_spi_frequency(spi, 400000);
    mraa_spi_lsbmode(spi, 0);
    mraa_spi_bit_per_word(spi, 8);
    uint16_t read_data = mraa_spi_write(spi, 0xAA);
    if (read_data == 0xAA)
        printf("data received correctly");
    mraa_spi_stop(spi);
    return MRAA_SUCCESS;
}
```

Programa 3.1. Ejemplo de comunicación básica a través del bus SPI.

3.4.2 PROTOCOLO DE COMUNICACIONES SPI EN FLIR LEPTON

En la hoja de características de Flir Lepton [1] podemos encontrar cómo debemos configurar la interfaz SPI para poder comunicar Intel Edison con la cámara termográfica para la adquisición de imágenes térmicas.

En primer lugar, nos muestra un esquema típico de conexión del bus SPI, donde no es necesaria la conexión MOSI, ya que no se enviará información a Flir Lepton a través de este bus.

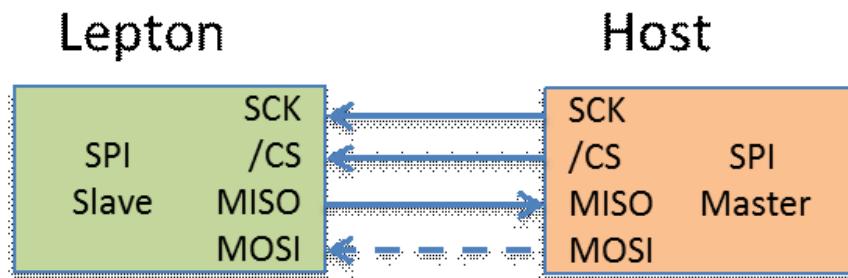


Ilustración 3.8. Conexión bus SPI Flir Lepton

Flir Lepton utiliza el modo SPI 3, explicado en el apartado anterior. Cuando está libre, La señal SCK está en HIGH. Los datos son preparados por Lepton cuando detecta que la señal SCK cambia a LOW y son enviados cuando detecta que la señal SCK vuelve a HIGH como podemos ver en la siguiente figura:

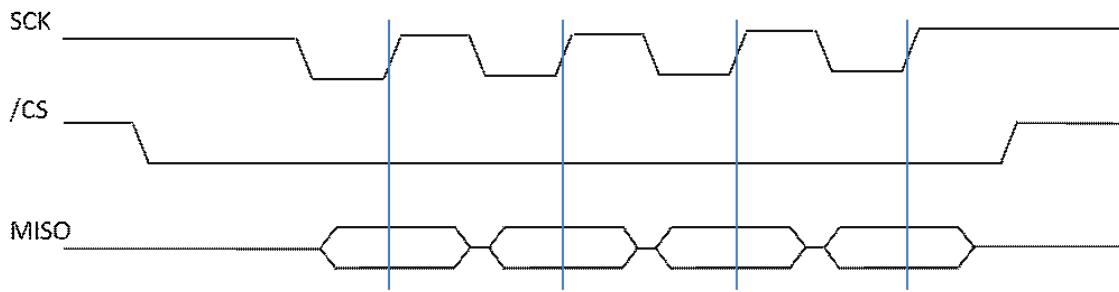


Ilustración 3.9. Señales SPI Flir Lepton

En el siguiente ejemplo de transmisión de información podemos ver cómo es el envío del valor 0x8C08:

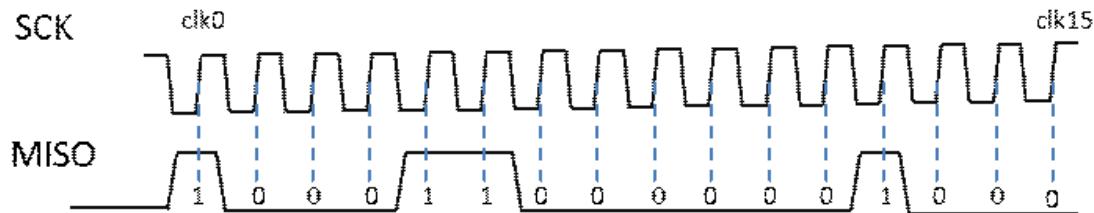


Ilustración 3.10. Ejemplo de transmisión SPI Flir Lepton

La frecuencia máxima para la señal máxima CLOCK que permite utilizar Flir Lepton en la interfaz SPI es de 20 MHz. La tasa de imágenes final obtenida será una función de la configuración del usuario. Por defecto esta configuración se establece como: Formato de video *Raw14* y *Modo Telemetría desactivado*. Con esta configuración se puede tener una tasa de 25,9 imágenes por segundo aproximadamente.

En el manual de Flir Lepton se definen los siguientes objetos en la transmisión de imágenes mediante SPI:

- Paquete VoSPI. Es la mínima transacción entre maestro y esclavo. Cada paquete contiene información de una línea de la imagen.
- Imagen VoSPI. Una imagen VoSPI se define por la composición de una secuencia continua de paquetes VoSPI, obteniendo una imagen completa de píxeles de información.
- Transmisión VoSPI. Se define como una secuencia continua de imágenes VoSPI.

Cada paquete VoSPI contiene una cabecera de 4 bytes seguido por 160 bytes *payload*:

ID	CRC	Payload
xNNN (16 bits)	CRC (16 bits)	Píxeles para una línea de la imagen

Tabla 3.4. Composición paquete VoSPI

El campo ID está compuesto por un número de paquete de 12 bits (Los primeros 4 bits están reservados y no forman parte del número del paquete). El número de CRC (Cyclic Redundancy Check) es de 16 bits y utiliza el siguiente polinomio, que se utiliza sobre el paquete completo (manteniendo a cero los bits de cabecera):

$$x^{16} + x^{15} + x^5 + x^0$$

No es necesario verificar el CRC, pero se recomienda que cuando se compruebe y se encuentre un error, se proceda a re-sincronizar la comunicación SPI.

Por último, el manual nos indica el procedimiento a seguir para establecer/restablecer la sincronización:

- Deseleccionar CS sin utilizar SCK durante, al menos 5 periodos de toma de imagen (>185 mseg). Este paso asegura que Lepton se posicione en un estado adecuado para establecer/restablecer la sincronización.
- Selecciona CS y activar SCLK. Esta acción provoca que Lepton empiece la transmisión del primer paquete.
- Examinar el campo ID del paquete, para identificar que es un paquete de descarte, y leer la información del paquete completo.
- Continuar leyendo paquetes de información. Cuando una nueva imagen esté disponible para ser enviada (al menos 39 mseg después de seleccionar CS y leer el primer paquete), se empezarán a enviar los primeros paquetes de imágenes. A partir de este momento el *Master* y *Slave* están sincronizados.

3.3 PROGRAMA BÁSICO DE TOMA DE IMÁGENES

En este apartado se muestra el algoritmo básico para realizar la captura de imágenes térmicas con Flir Lepton a través de la interfaz de comunicaciones SPI, según lo descrito en el apartado anterior. El programa completo, escrito en lenguaje de programación C, se puede consultar en el Anexo I.

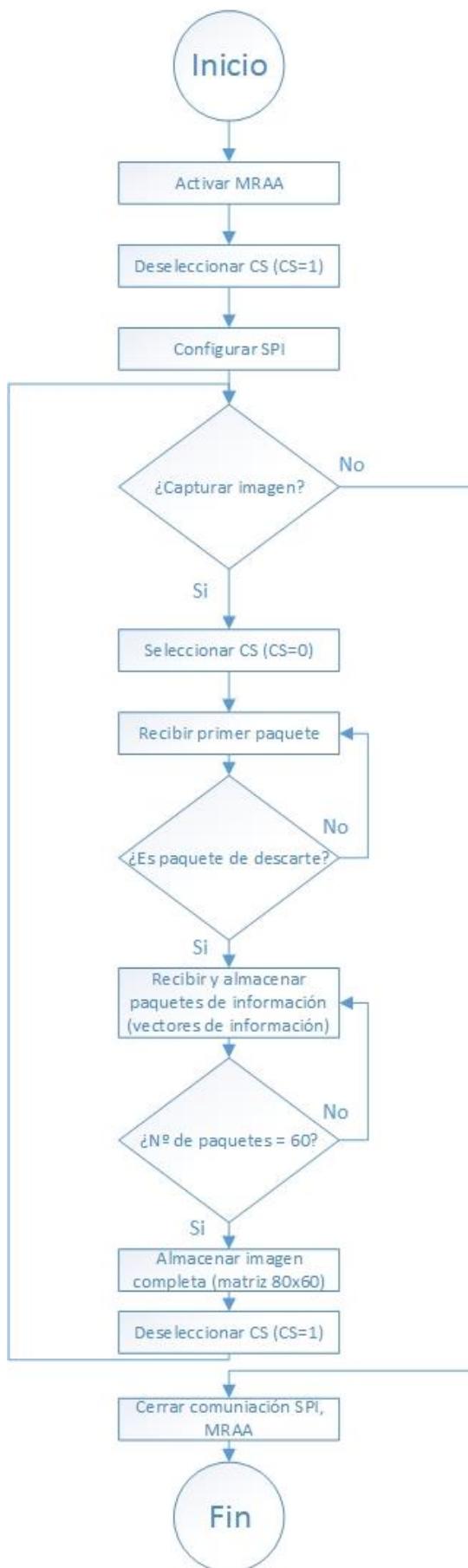


Ilustración 3.11. Flujograma básico de toma de imágenes

3.3.1 DISPARADOR

En el algoritmo anterior que se ha mostrado, para repetir el bucle de captura de imágenes es posible definir dos alternativas diferentes que se muestran a continuación:

- **Disparo automático.** Consiste en que la cámara repite el proceso de captura de imágenes automáticamente después de un periodo de tiempo determinado. Para ello, podemos simplemente definir un tiempo de espera determinado en el programa. Las desventajas de este procedimiento son que el volumen de imágenes obtenidas puede ser muy grande si se definen intervalos de captura pequeños y que las imágenes contiguas tengan un grado de solapamiento muy alto. En cambio, definir un intervalo de espera demasiado alto puede causar que se eleve mucho el tiempo para la toma de mediciones mediante el UAV.
- **Disparo mediante pulsador.** Este método consiste en introducir un pulsador, que puede ser tanto mecánico como una señal digital externa producida por un dispositivo diferente, como la controladora de vuelo de un UAV. Algunas controladoras de vuelo poseen la funcionalidad de generar señales de disparo digitales para cámaras, que se pueden programar para que sea generadas en momentos determinados durante la ruta de vuelo. De esta manera, conocidas las propiedades de la cámara y la lente, y definidos los parámetros de vuelo (altura, velocidad), es posible calcular en qué momento y posición es necesario generar la captura de imágenes para optimizar el uso de la cámara y minimizar el número de imágenes capturadas sin perder información del terreno. A continuación, se muestra un ejemplo de uso de la señal digital para disparar la captura de imágenes en Intel Edison como se ha explicado:

```
#include<stdio.h>
#include<mraa.h>
main() {
    mraa_init();
    mraa_gpio_context button = mraa_gpio_init(8);
    mraa_gpio_dir(button, MRAA_GPIO_IN);
    int button_state;
    while(1){
        button_state = mraa_gpio_read(button);
        printf("Button state = %d\n",button_state);
        if(button_state==1 {
            %Capture Thermal image;
        }
    }
}
```

Programa 3.2. Ejemplo de disparo mediante pulsador en Intel Edison.

3.4 CALIBRACIÓN DEL SENSOR

Para la medición de temperaturas mediante el sensor Flir Lepton es necesario activar el modo radiometría y realizar un procedimiento de calibración. En el manual de Flir Lepton [1] podemos observar el comportamiento teórico del sensor cuando el modo radiometría está deshabilitado y habilitado:

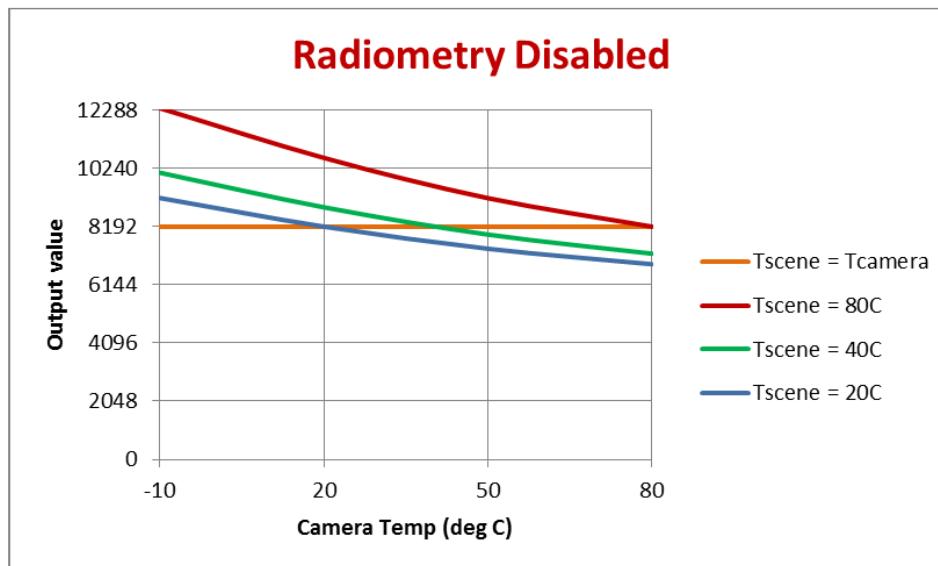


Ilustración 3.12. Comportamiento Flir Lepton Modo Radiometría Desactivado

Como se puede observar, cuando el modo radiometría está desactivado el valor de salida del sensor se sitúa cerca del valor medio de 14 bits (8192) cuando la temperatura de la escena es igual a la temperatura de la cámara. También se puede observar que el cambio del valor del píxel ante diferentes temperaturas de la escena varía con el valor de la temperatura de la cámara. Por tanto, mediante este modo no se pueden realizar medidas de temperaturas.

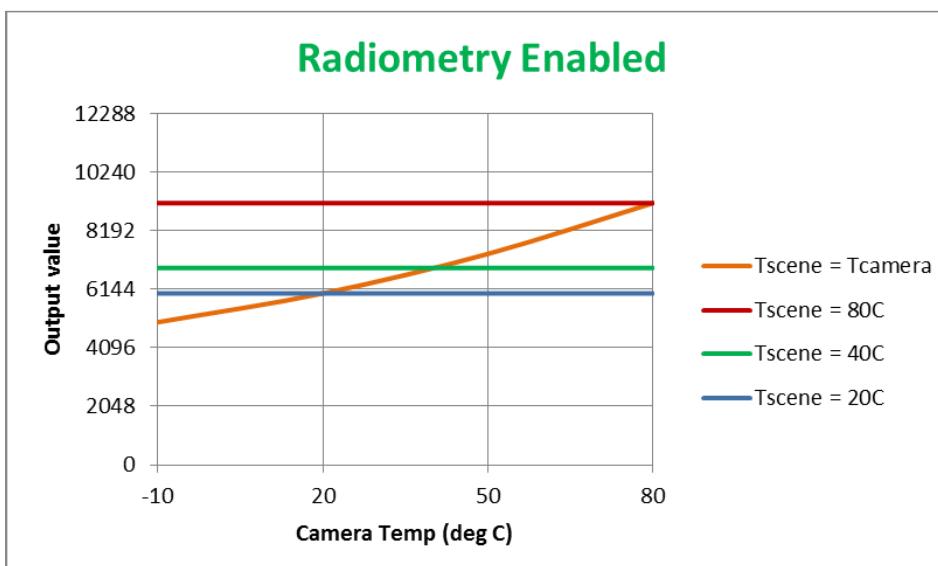


Ilustración 3.13. Comportamiento Flir Lepton Modo Radiometría Desactivado

Con el modo de radiometría activado, Lepton realiza ajustes internos para que el valor de salida sea independiente de la temperatura de la cámara. La salida teórica ante tres temperaturas de escena diferentes se muestra en la figura anterior. Por tanto, el valor de salida depende solo de la temperatura de la escena y es posible realizar mediciones de temperatura. Para activar el modo radiométrico en Flir Lepton se proporciona una serie de comandos que es necesario enviar al sensor a través de la interfaz I²C. No obstante, Flir Lepton es un producto en desarrollo y el fabricante no ha implementado este modo en la versión 1 de Flir Lepton, que es la que se dispone en este trabajo, de manera que no se puede utilizar el modo radiometría y, por tanto, no se pueden realizar mediciones de temperatura. Este hecho implica que no se puede tampoco realizar un procedimiento de calibración, ya que, con el modo de radiometría desactivado, el valor de salida depende dos variables (temperatura de escena y temperatura de la cámara), imposibilitando su calibración. Para disponer del modo radiométrico activado, es necesario adquirir la versión 2.5 de Flir Lepton [5].

El proyecto *PureThermal* [6] del grupo *GroupGets*, es un proyecto que promueve una cámara termográfica de carácter *opensource*, y para ello, también utiliza la cámara termográfica Flir Lepton. Este grupo realizó la siguiente calibración del sensor de Flir Lepton para medir temperaturas:

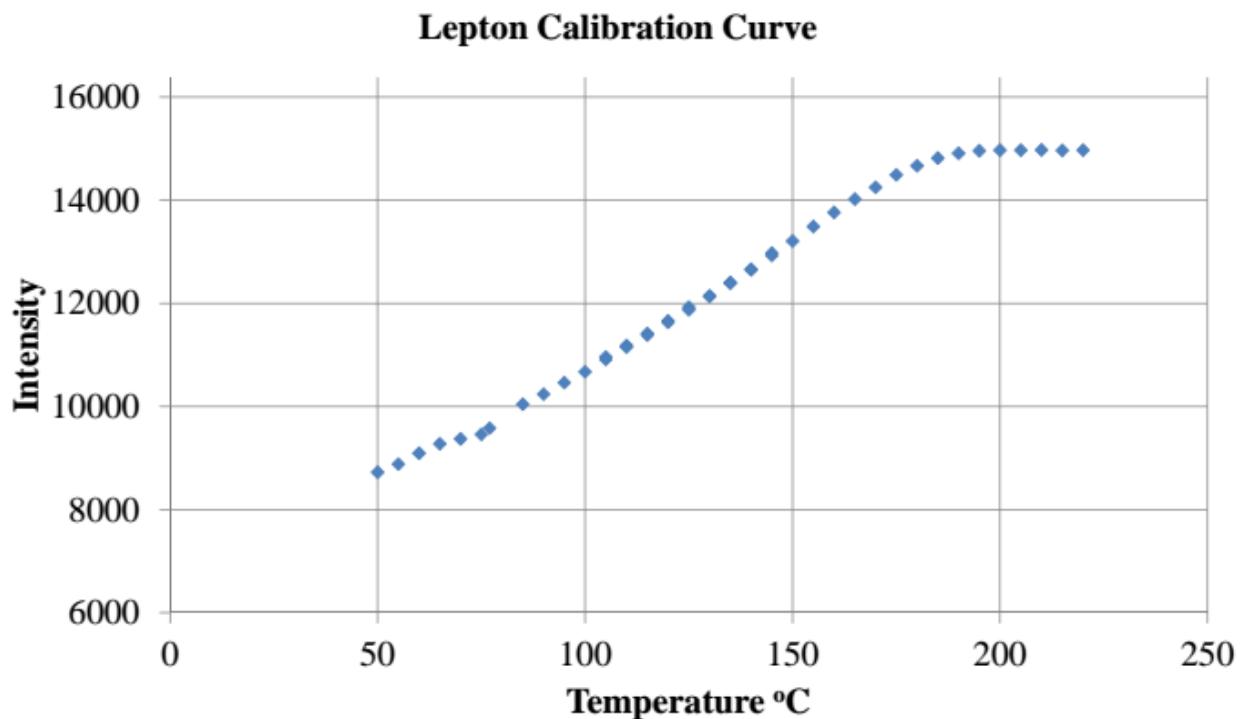


Ilustración 3.14. Resultados calibración temperatura para Flir Lepton según PureThermal

De esta manera, obtuvieron la siguiente ecuación para calcular la temperatura a partir del valor RAW del sensor para un rango de temperaturas entre 50ºC y 200ºC:

$$T(^{\circ}\text{C}) = (0,0217 * \text{ValorSensorRAW}) + T_{\text{Ambiente}}(^{\circ}\text{C}) - 177,77$$

Por ejemplo, para un valor RAW del sensor de 8500 y una temperatura ambiente de 20ºC, obtendríamos una temperatura de 26,68 ºC en ese píxel.

La hipótesis en la que se basan para plantear esta ecuación es que la temperatura del sensor Flir Lepton coincide con la temperatura ambiente. Por tanto, para el valor 8192, obtendríamos con esta ecuación un valor de temperatura próximo a la temperatura ambiente.

Junto con la ecuación no ofrecen valores del coeficiente de correlación R². En resumen, no tenemos información suficiente sobre esta calibración ni las condiciones en las que se realizó. Puesto que no disponemos de otro modo para obtener la temperatura ni se dispone de la versión 2.5 de Flir Lepton, apta para utilizar el modo radiométrico, para este trabajo utilizaremos esta ecuación para medir la temperatura de los píxeles.

3.5 PRUEBAS DE CAMPO DEL PROTOTIPO

3.5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

El objetivo de este apartado es presentar los resultados de las pruebas realizadas sobre el prototipo diseñado en este capítulo, para evaluar y optimizar su funcionamiento.

Para realizar las pruebas que se muestran a continuación se ha trabajado en un entorno de trabajo descrito en el Capítulo 1. En cada una de las pruebas realizadas se detalla de manera particular el objetivo de la prueba y la metodología usada para obtener dicha medición. En último lugar se presenta un análisis de los resultados obtenidos comparando con las características teóricas que hemos visto en este capítulo de los componentes que conforman el prototipo.

3.5.2 TASA DE CAPTURA DE IMÁGENES

Mediante esta prueba se pretende medir la tasa máxima de captura de imágenes del prototipo. Esta característica es interesante para estimar la velocidad máxima a la que se debería desplazar un UAV a una altura determinada para medir todo el terreno.

Para determinar la tasa máxima, se modificará el programa diseñado variando los valores de los comandos que establecen tiempos de espera en el programa, de manera que se minimicen los tiempos de espera y, por tanto, el tiempo global que requiere el prototipo para la captura de imágenes.

El programa diseñado para esta prueba medirá el tiempo utilizado en obtener 100 imágenes, de forma que la tasa se calculará como el número total de imágenes dividido por el tiempo empleado en su captura y almacenamiento, es decir, se calcula el número máximo de imágenes por segundo que es capaz de capturar. Es importante señalar, que como hemos visto en el primer apartado de este capítulo, la tasa máxima teórica que ofrece Flir Lepton es 9 Hz, por tanto, esta será la tasa máxima que se podrá obtener.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta prueba:

Tasa máxima de captura de imágenes	9 Hz
------------------------------------	------

Tabla 3.1. Tasa máxima de captura de imágenes del prototipo

Como podemos ver, se ha comprobado que el prototipo es capaz de capturar imágenes a la tasa máxima que ofrece Flir Lepton.

3.5.3 TASA DE ERROR AL CAPTURAR IMÁGENES

Se entiende por tasa de error la valoración cuantitativa del número de imágenes térmicas válidas para el análisis, que son capturadas y almacenadas por el prototipo. Se considera que una imagen es errónea cuando, al menos, una línea de píxeles de la imagen térmica no contiene valores, es decir, su valor es nulo. Cuando esto ocurre puede generar problemas de procesamiento de las imágenes.

Para realizar esta prueba, se han realizado mediciones con diferentes tasas de captura de imágenes, de manera que para cada velocidad de captura de imágenes se han calculado la tasa de error como: $\frac{\text{Nº de imágenes erróneas}}{\text{Nº de imágenes totales}}$.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta prueba:

Tasa de captura de imágenes (Hz)	Tasa de error
9	22%
8	1%
7	4%
6	1%
5	0%
4	0%
3	19%
2	12%
1	2%

Tabla 3.2. Resultado tasa de error del prototipo

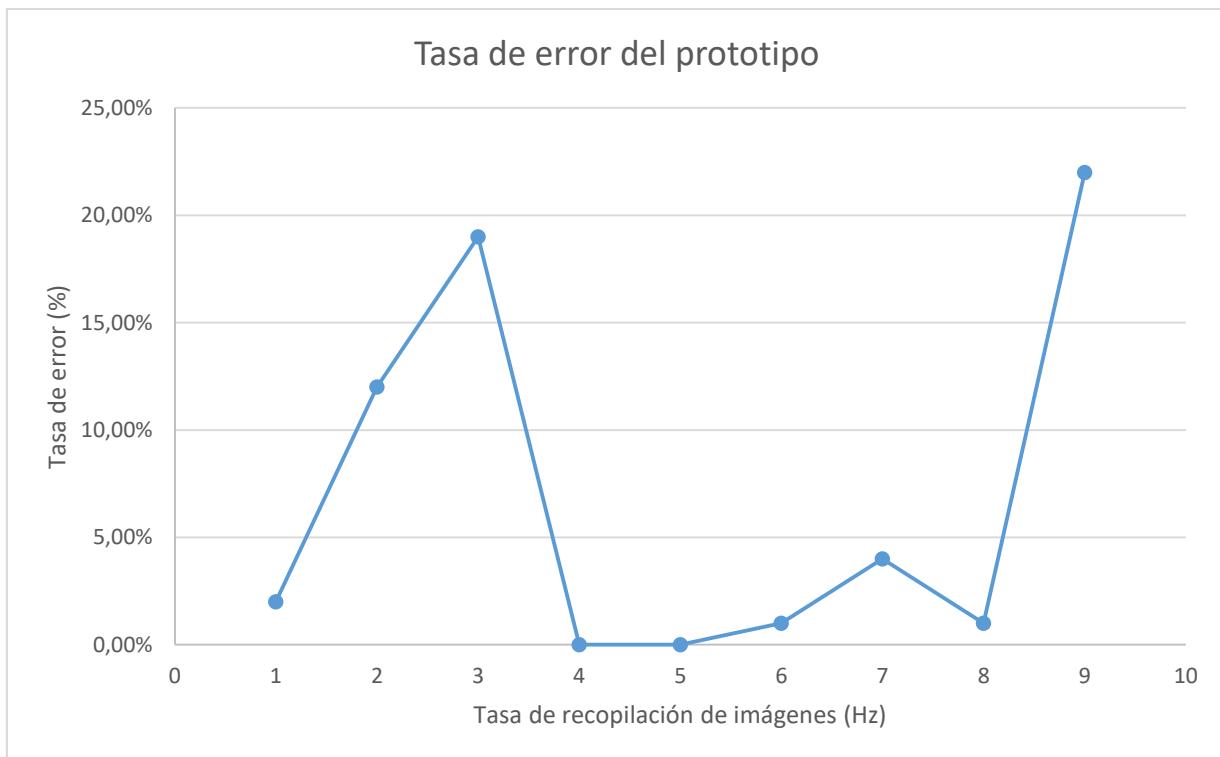


Ilustración 3.15. Resultados tasa de error del prototipo

Como podemos ver, la menor tasa de error se encuentra en el intervalo 4-5 Hz, de forma que este es el intervalo óptimo de trabajo para minimizar los errores durante el proceso de toma de imágenes. No ha sido posible determinar cuál es la causa de la tasa de error obtenida para tasas de recopilación de imágenes bajas, aunque la causa está relacionada con las frecuencias de sincronización en la comunicación entre los dispositivos Flir Lepton e Intel Edison.

Es importante señalar que esta información es interesante cuando se pretende disparar la cámara a una alta velocidad. Cuando la velocidad no es un requisito, es posible establecer un sencillo paso en el programa para detectar imágenes erróneas en el momento de ser almacenadas y repetirlas.

3.5.4 UTILIZACIÓN DE MEMORIA

En este apartado se valorará la memoria disponible en el dispositivo para el almacenamiento de imágenes, de forma que se podrá conocer el número máximo de imágenes que se pueden almacenar en el dispositivo. Este dato es interesante para planificar la toma de datos con el UAV.

Para visualizar el tamaño libre en el disco, utilizamos el comando “*df*” abriendo un terminal de *Linux*. De esta manera, obtenemos un listado de las particiones del sistema con la siguiente información:

Filesystem	1K-blocks	Used Available
/dev/root	1471904	1097300

Tabla 3.3. Espacio de almacenamiento disponible Intel Edison

Cada imagen térmica capturada por Flir Lepton ocupa 24kB, por tanto, el número de imágenes totales que se pueden almacenar son:

Espacio disponible (kB)	1097300
Tamaño de una imagen (kB)	24
Nº de Imágenes totales	45720

Tabla 3.4. Resultado capacidad de almacenamiento de imágenes térmicas de Flir Lepton en Intel Edison

Es importante señalar que Intel Edison tiene una interfaz disponible para añadir tarjetas de memorias SD, de manera que el tamaño de almacenamiento es ampliable en caso necesario.

3.6 ENCAPSULAMIENTO DEL PROTOTIPO PARA UAVS

Para proteger el prototipo, se ha diseñado un modelo 3D de una carcasa sencilla mediante el software *Solidworks*. Esta carcasa se puede imprimir fácilmente y con un coste bajo mediante una impresora 3D.

La carcasa se ha diseñado en dos piezas, de manera que se facilita la tarea de conexión y desconexión de la batería. Se han realizado ranuras externas para el cableado, una lateral para la conexión de los cables USB y en la cara frontal para refrigeración. Los planos de este modelo se pueden encontrar en el Anexo IV.

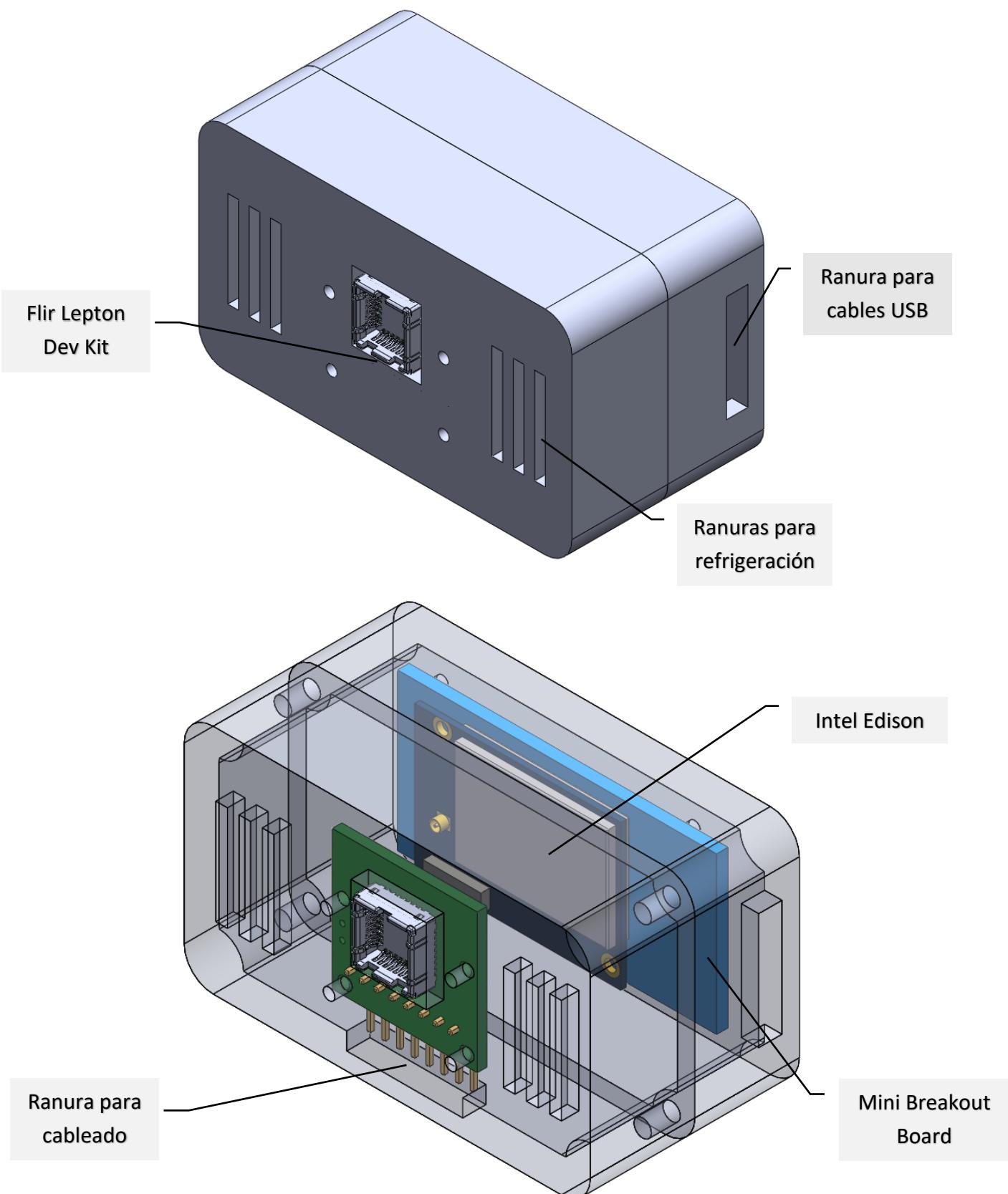


Ilustración 3.16. Vista frontal del modelo 3D de la carcasa del prototipo

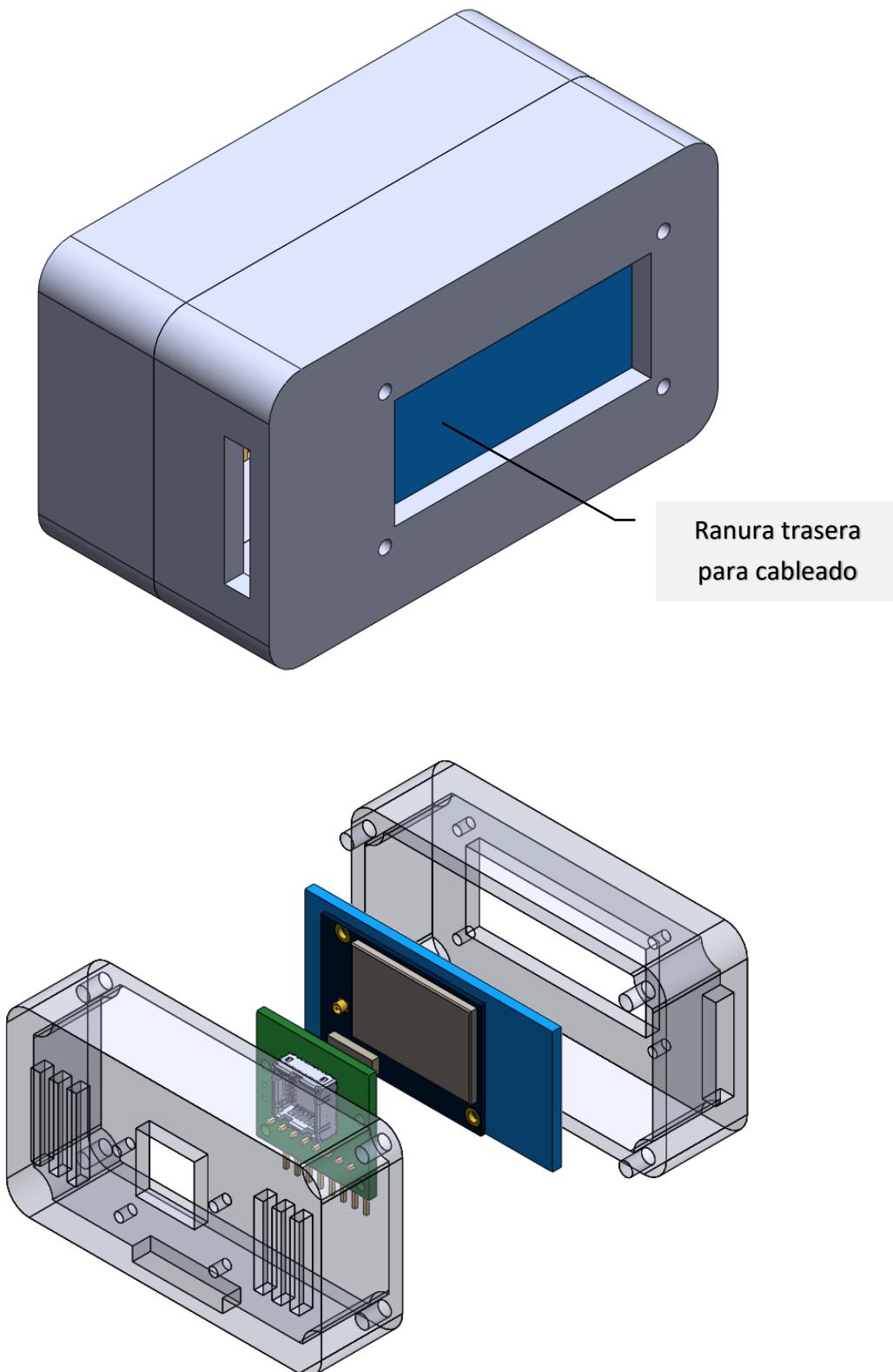


Ilustración 3.17. Vista trasera y explosión del modelo 3D de la carcasa del prototipo

3.7 PRESUPUESTO DE LOS MATERIALES DEL PROTOTIPO

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto detallado del prototipo realizado en este capítulo:

Presupuesto de los materiales del prototipo (Fecha 19/11/2016)		
Componente	Precio	Enlace del componente
Flir Dev Kit	246,09 euros	https://www.sparkfun.com/products/13233
Intel Edison & Mini Breakout Board	70,96 euros	https://www.sparkfun.com/products/13025
Batería 400mAh	4,69 euros	https://www.sparkfun.com/products/13851
Encapsulamiento		Fabricación propia con Impresora 3D
Total	321,74 euros	

Tabla 3.9. Presupuesto Prototipo Cámara termográfica para UAVs

3.8 CARACTERÍSTICAS FINALES DEL PROTOTIPO

Por último, en este apartado se presentarán a modo de resumen las características finales del prototipo que se ha desarrollado en este capítulo.

Resolución de imagen	80x60 Píxeles
Sensibilidad térmica (Según fabricante)	<50 mK
Tasa de captura de imágenes	4-5 Hz
Almacenamiento	45720 imágenes
Consumo de energía (Según fabricante)	185 mW
Coste total de los materiales	321,74 euros

Tabla 3.10. Características finales del prototipo

4. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE FLIR LEPTON

El objetivo de este capítulo es el de tratar todos los procesos de acondicionamiento de las imágenes obtenidas con Flir Lepton que se deben realizar desde que estas son capturadas y almacenadas por el sensor hasta que son aptas para realizar un análisis sobre las mismas. En el primer punto se estudia el formato de las imágenes que se reciben del sensor y cómo realizar conversiones a otros formatos de imágenes con Matlab. A continuación, en el segundo punto se realiza un estudio de creación de macroimágenes con técnicas de “*Stitching*” de imágenes.

4.1 IMPORTACIÓN Y FORMATO DE IMAGEN

Flir Lepton almacena las imágenes en formato *Netpbm Portable Grey Map* (extensión .pgm). *Netpbm* es un paquete de programas gráficos y librerías de programación, que incluye otros formatos como *Portable Pixmap Format* (extensión .ppm) y *Portable Anymap Format* (extensión .pnm) [25].

El formato de imágenes PGM representa una imagen en escala de grises. Está diseñado para ser extremadamente sencillo de aprender y para el que implementar en códigos de programas. En general, una imagen PGM podría interpretarse como una matriz de valores enteros. Por tanto, también podríamos hablar que se trata de imágenes tipo RAW, ya que no poseen ningún tipo de compresión y no hay pérdida de información.

Cada imagen PGM posee los siguientes elementos:

- Número mágico. Se utiliza para identificar el tipo de archivo. Los valores posibles se muestran en la siguiente tabla:

Tipo	Número Mágico				Colores
Portable BitMap	P1	ASCII	P4	Binario	0–1 (negro-blanco)
Portable GrayMap	P2	ASCII	P5	Binario	0–255 (escala de grises)
Portable PixMap	P3	ASCII	P6	Binario	0–255 (RGB)

Tabla 4.1. Valores número mágico en imágenes PGM

- El tamaño de la imagen en píxeles. Se indica con dos números en formato ASCII separados por un espacio que son las dimensiones de la matriz que contiene los datos.
- El valor máximo de gris, también en ASCII decimal. Debe ser menor que 65536 y mayor que 0.

- Matriz que contiene la información de la imagen en escala de grises en número decimales formato ASCII. Cada columna se separa mediante espacios y al final de cada fila se debe situar un carácter de nueva línea.

A continuación, se muestra un ejemplo de imagen en formato PGM:

```
P2
24 7
15
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 3 3 3 3 0 0 7 7 7 0 0 11 11 11 11 0 0 15 15 15 15 0
0 3 0 0 0 0 0 7 0 0 0 0 0 11 0 0 0 0 0 15 0 0 15 0
0 3 3 3 0 0 0 7 7 7 0 0 0 11 11 11 0 0 0 15 15 15 15 0
0 3 0 0 0 0 0 7 0 0 0 0 0 11 0 0 0 0 0 15 0 0 0 0
0 3 0 0 0 0 0 7 7 7 0 0 0 11 11 11 11 0 0 0 15 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Para visualizar fácilmente este formato de imágenes es necesario utilizar *software* de visualización específicos para este formato como *OpenSeeIt* (<http://openseeit.sourceforge.net>) o utilizar paquetes de *software* matemático como *Matlab*, que trabajen con matrices y posean soporte para tratamiento de imágenes.

En este trabajo se ha desarrollado un programa sencillo en Matlab para realizar la importación de imágenes. Este programa permite configurar la imagen con diferentes mapas de color y exportarla en cualquier formato de imagen compatible, aunque se aconseja utilizar el formato TIFF sin compresión para evitar la pérdida de datos. En la siguiente figura se muestran los mapas de color configurables que ofrece Matlab:



Ilustración 4.1. Mapas de colores disponibles en Matlab

En el programa que se ha creado en Matlab se utiliza el mapa de color *Jet*, que es el que se utiliza habitualmente en imágenes térmicas, ya que para valores relacionados con temperaturas bajas utiliza colores fríos (azules) y para valores relacionados con temperaturas altas se utilizan colores calientes (rojos), de manera que visualmente es fácil diferenciar las zonas de alta y baja temperatura.

A continuación, se muestra un código de un programa de Matlab sencillo para importar las imágenes, en este caso se exporta la imagen al formato TIF, que no posee compresión:

Programa 4.1. Importación y cambio de formato de imágenes de Flir Lepton con Matlab

En las siguientes ilustraciones podemos ver el ejemplo de importación de unas imágenes de la salida de humos de una caldera en dos mapas de colores diferentes:

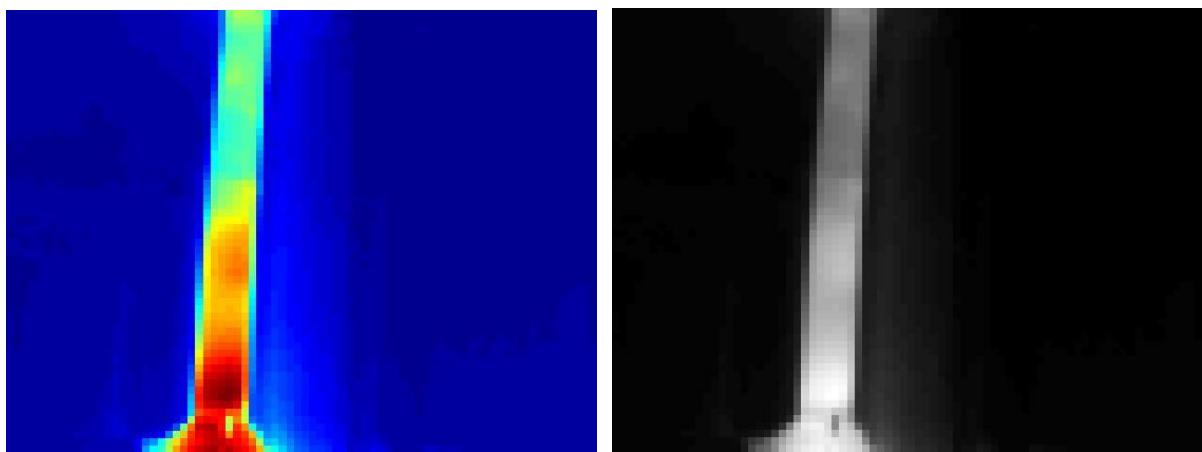


Ilustración 4.2. Ejemplo de importación de imágenes de Flir Lepton mediante Matlab con diferentes mapas de color

4.2 STITCHING DE IMÁGENES

4.2.1 INTRODUCCIÓN AL STITCHING DE IMÁGENES

El *stitching* de imágenes es el proceso por el cual se combinan múltiples imágenes con zonas de solapamiento para producir una imagen panorámica o una imagen de alta resolución. Usualmente el proceso de *stitching* se realiza a través de *software* computacional, y existen una gran cantidad de software gratuitos y comerciales que realizan esta técnica [26].

Esta técnica puede resultar de gran utilidad en este trabajo, ya que la resolución de imagen que proporciona Flir Lepton es baja en comparación con otras cámaras termográficas, y mediante este tipo de técnica, podemos ser capaces de crear imágenes de alta resolución a través de una serie de imágenes de baja resolución.

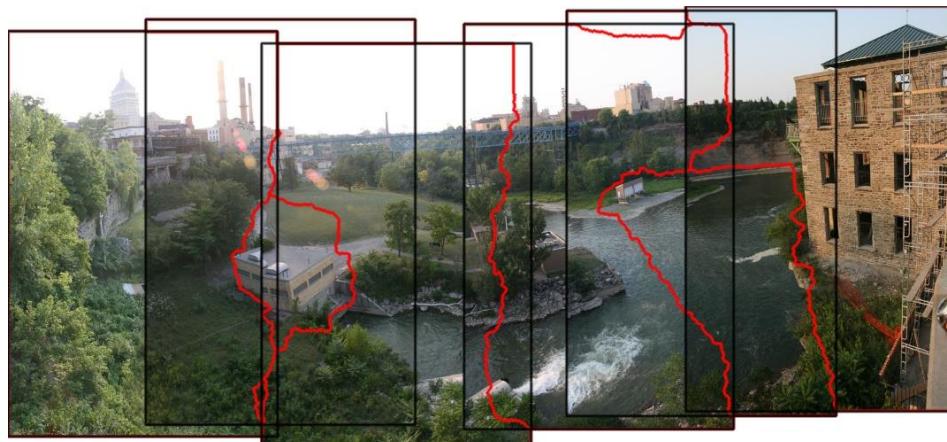


Ilustración 4.3. Ejemplo de identificación geométrica y creación de una imagen panorámica mediante stitching

4.2.2 DESCRIPCIÓN Y COMPARATIVA DE LOS PROGRAMAS DE STITCHING GRATUITOS DISPONIBLES

Actualmente es posible encontrar de manera gratuita un gran número de programas capaces de realizar stitching de imágenes. En este capítulo vamos a presentar los más habituales y a describir sus características, con el objetivo de analizar cuál de ellos es el óptimo para realizar stitching de las imágenes para este trabajo.

En la siguiente tabla [26] se listan los programas de stitching gratuitos disponibles a excepción de *Autopano*, que es el más utilizado por profesionales y se ha incluido porque tiene una versión de prueba gratuita:

Nombre	Desarrollador	Sistema Operativo	Precio	Página web	Notas
Dermandar	Dermandar	Basado en explorador (Adobe Flash)	Gratis	Dermandar.com	Las fotos creadas quedan almacenadas en los servidores de Dermandar
Autopano Pro / Giga / Server	Kolor	Windows, Mac, Linux	Pro: €99 Giga: €199	www.kolor.com	Versión de prueba gratuita
Hugin	Pablo d'Angelo et al.	Windows, Mac, Linux, FreeBSD	Gratis	hugin.sf.net	Basado en el software Panorama Tools.
Image Composite Editor	Microsoft	Windows	Gratis (Para uso no comercial)	research.microsoft.com	Puede trabajar con video (Windows 7+)
Montage Image Mosaic	Caltech/IPAC, JPL, CACR, ISI	Linux	Gratis	montage.ipac.caltech.edu	Utilizado en investigación astronómica

Tabla 4.2. Listado de software de stitching de imágenes

De los programas listados en esta tabla, se realizará la comparativa de Hugin, Image Composite Editor y Autopano, ya que son los más potentes y los que ofrecen más posibilidades de configuración.

4.2.2.1 IMAGE COMPOSITE EDITOR

Image Composite Editor [27] es un sencillo programa creado por Microsoft para la creación de panoramas. Este programa permite crear panoramas a partir de imágenes y vídeo. En la siguiente figura se muestra su pantalla principal:



Ilustración 4.4. Pantalla principal Image Composite Editor

Si seleccionamos crear panorama desde imágenes, nos ofrece una opción automática para crear el panorama y una opción manual, donde podemos modificar diferentes parámetros. La principal ventaja de este programa es que permite crear panoramas estructurados manualmente, es decir, nos permite indicar en qué posición del panorama final se sitúa cada imagen, como si de una matriz se tratara. Para ello nos ofrece una serie de opciones para seleccionar el número de filas y columnas, la dirección y el solapamiento existente vertical y horizontal.

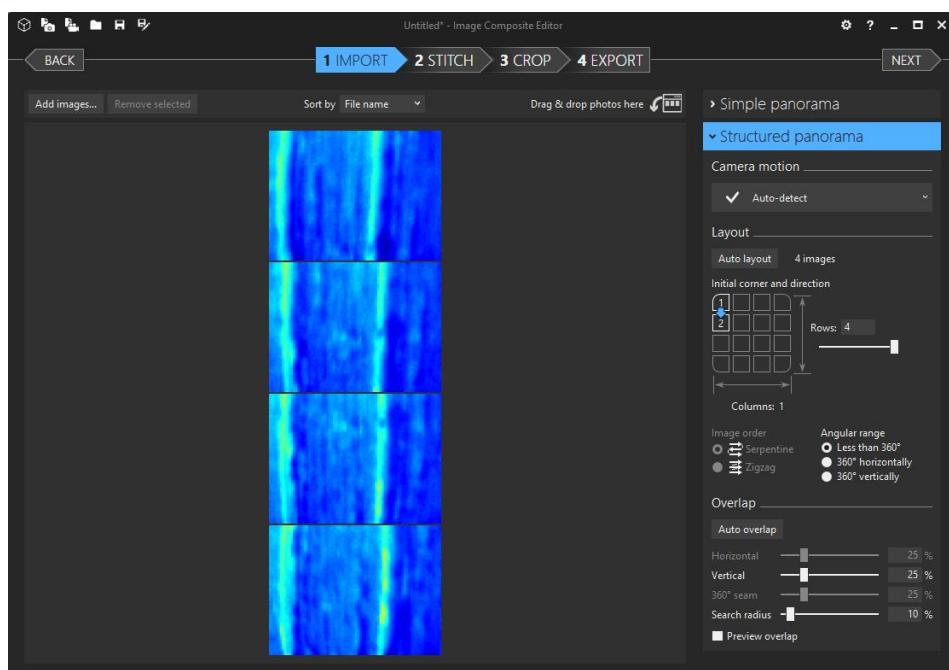


Ilustración 4.5. Opciones manuales Image Composite Editor

Un ejemplo de panorama estructurado se presenta a continuación:



Ilustración 4.6. Panorama estructurado con Image Composite Editor

4.2.2.2 HUGIN

Hugin [28] es un programa *opensource* multiplataforma de creación de panoramas. También posee un asistente para facilitar el ensamblamiento de imágenes de manera automática. Entre sus principales características, es muy configurable, permite adaptarlo a cada cámara fotográfica y lente, y posee una interfaz que permite utilizar *Scripts* en el lenguaje de programación *Python*, de manera que se podría automatizar la creación de panoramas para unos parámetros concretos. Como desventaja, *Hugin* es un programa complejo que requiere altos conocimientos de captura de imágenes y fotografía.

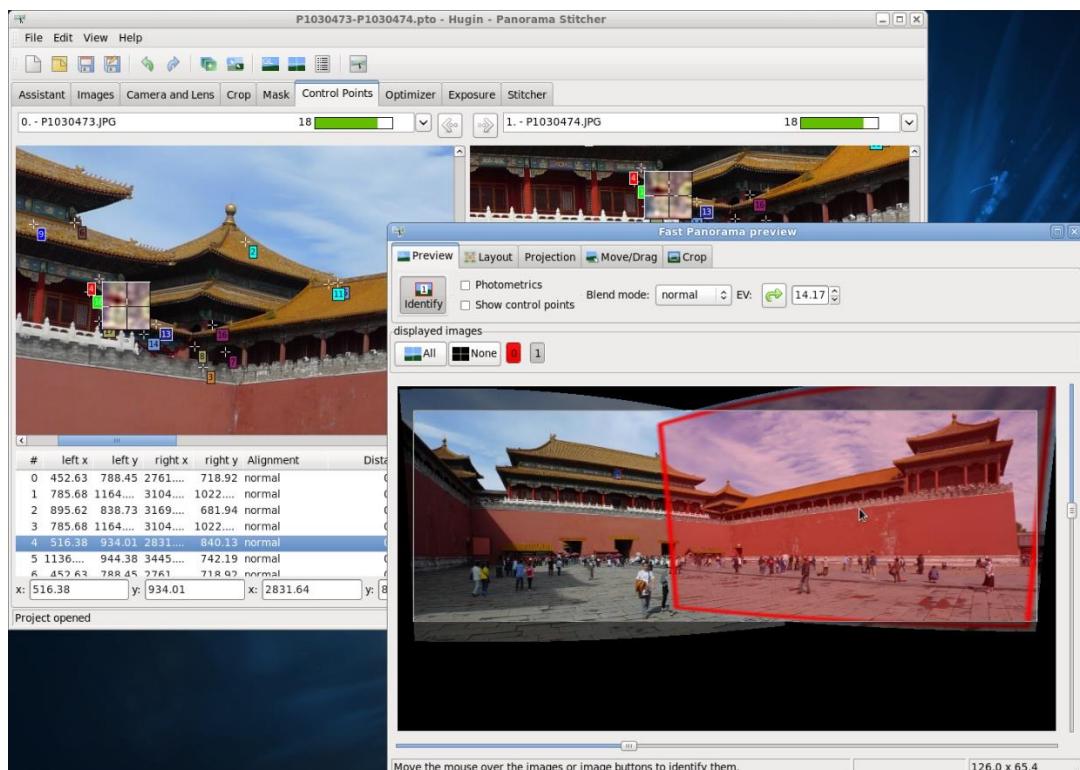


Ilustración 4.7. Interfaz Hugin

4.2.2.3 AUTOPANO PRO

Autopano [29] es el programa de creación de panoramas más utilizado en el mundo profesional de la fotografía y es necesario adquirirlo bajo licencia. Para realizar este trabajo, se ha utilizado la versión de prueba que ofrece en su página web. Dispone de dos versiones *Autopano Pro* y *Autopano Giga*, siendo esta última una versión más potente.

Este programa posee soporte para todo tipo de cámaras de fotografía y lentes, y tiene un alto grado de configurabilidad, aunque también posee un asistente sencillo para la creación de panoramas de manera automática.



Ilustración 4.8. Interfaz Autopano Pro

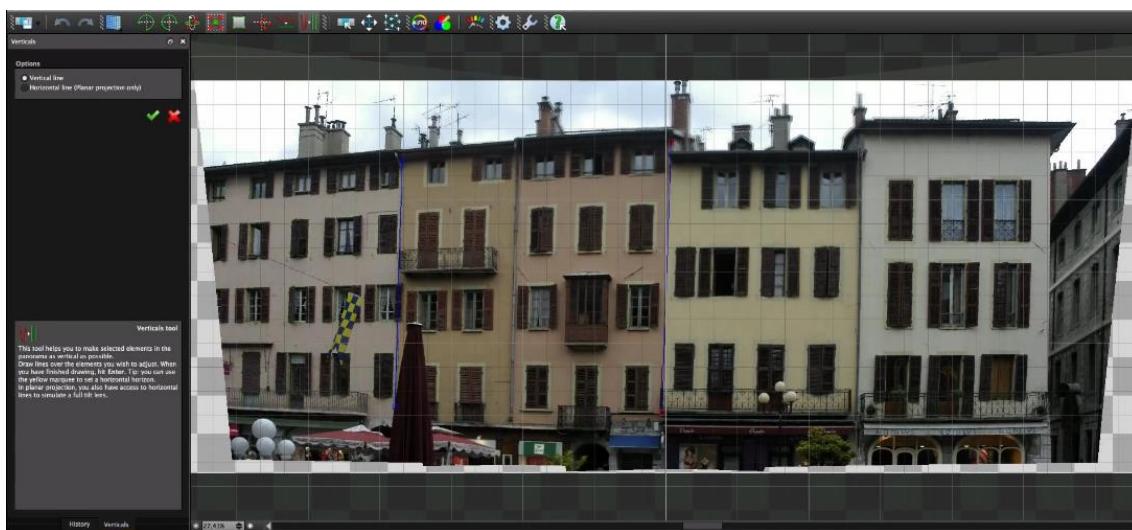


Ilustración 4.9. Panorama creado con Autopano Pro

4.2.3 COMPARATIVA Y EVALUACIÓN DE LOS SOFTWARE PRESENTADOS

Por último, una vez presentados los programas disponibles de *stitching* de imágenes, en este apartado se realizará una comparación con el fin de seleccionar el software que mejor se adecúa a las necesidades de este trabajo.

A modo de resumen se presentan las características vistas en la siguiente tabla:

Programa	Precio	Configurabilidad	Asistente automático	Características
Autopano Pro	Pro: €99 Giga: €199	Alto	Si	
Hugin	Gratis	Alto	Si	Interfaz scripting Python
Image Composite Editor	Gratis (Para uso no comercial)	Bajo	Si	Panoramas estructurales sencillos. Video.

Tabla 4.3. Comparativa de software de stitching de imágenes

En la siguiente tabla se muestran algunas de las características propias de software de fotografía:

Programa	HDR	Fusión HDR desde imágenes LDR	Salida HDR	Mapeo de tono	Fusión de la exposición
Autopano Pro / Giga / Server	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Hugin	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Image Composite Editor	No	No	No	No	No

Tabla 4.4. Comparativa de las características de software de stitching de imágenes

Nota:

- HDR (*High Dynamic Range*). Son un conjunto de técnicas que permiten un mejor rango dinámico de luminancias entre las zonas más claras y las más oscuras de una imagen.
- LDR (*Low Dynamic Range*).
- Mapeo tonal. Es un proceso que consiste en aplicar cambios de contraste local para resaltar de manera zonal las texturas de cada zona de una fotografía.

- **Fusión de la exposición.** Es un proceso de creación de zonas de diferente exposición en la misma escena.

Por último, se realizará unos ejemplos de stitching con imágenes obtenidas con Flir Lepton mediante cada uno de los programas para estudiar los resultados que podemos obtener. La realización de estos ejemplos será útil para estudiar el comportamiento que podemos esperar de estos programas, ya que estos no están diseñados específicamente para trabajar con imágenes termográficas de baja resolución, en las cuales es difícil encontrar puntos de control.

Estos ejemplos se han realizado con las siguientes imágenes, obtenidas mediante Flir Lepton en un UAV sobre un campo de cultivo. Son imágenes secuenciales que deben componerse en columna y que poseen solapamiento:

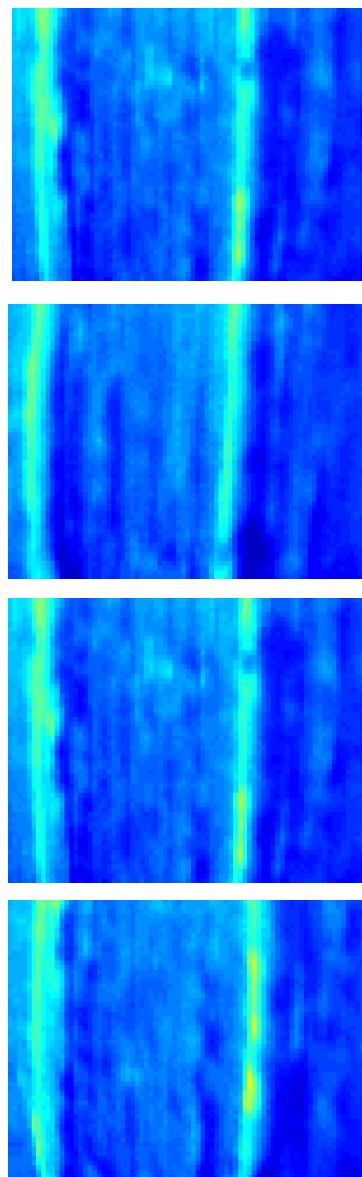


Ilustración 4.10. Imágenes para ejemplo nº 1 de stitching de imágenes de Flir Lepton

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con cada uno de los programas:

- ***Image Composite Editor*** (Modo automático fallido / Modo manual, Imagen estructurada 1 columna x 4 filas con solapamiento).

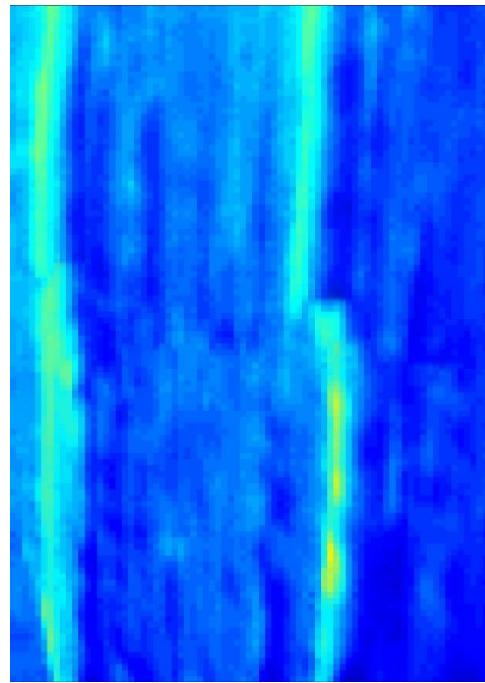


Ilustración 4.11. Resultado ejemplo nº 1 stitching con ICE

- **Hugin** (Modo automático).

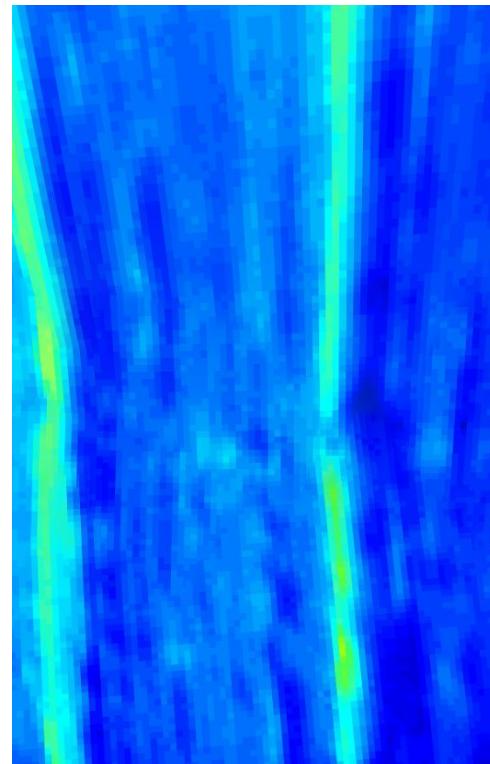


Ilustración 4.12. Resultado ejemplo nº 1 stitching con Hugin

- **Autopano Pro** (Modo automático, sólo ha sido capaz de ensamblar dos imágenes).

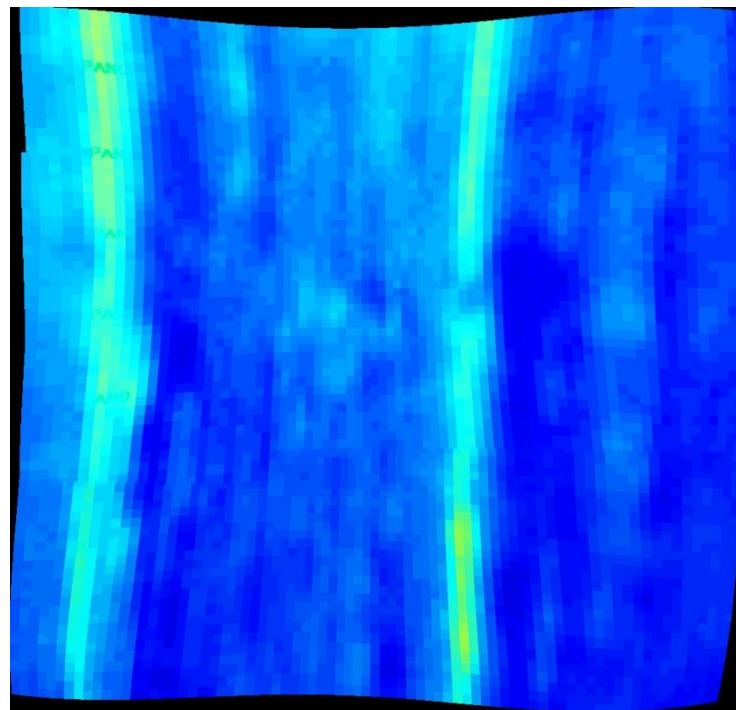


Ilustración 4.13. Resultado ejemplo nº 1 stitching con Autopano Pro

También se presenta un segundo ejemplo, realizado con imágenes similares a las del ejemplo anterior obtenidas en las mismas condiciones. Las imágenes para el segundo ejemplo son las siguientes:

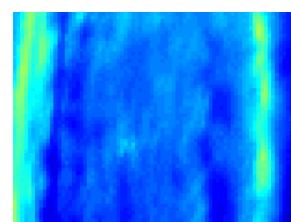
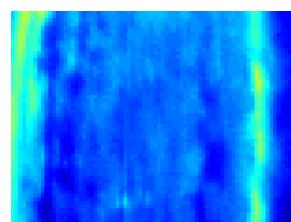
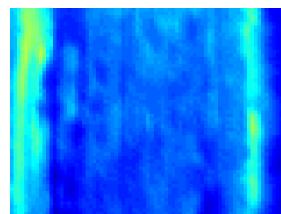


Ilustración 4.14. Imágenes para ejemplo nº 2 de stitching de imágenes de Flir Lepton

- **Image Composite Editor** (Modo automático fallido / Modo manual, Imagen estructurada 1 columna x 4 filas con solapamiento).

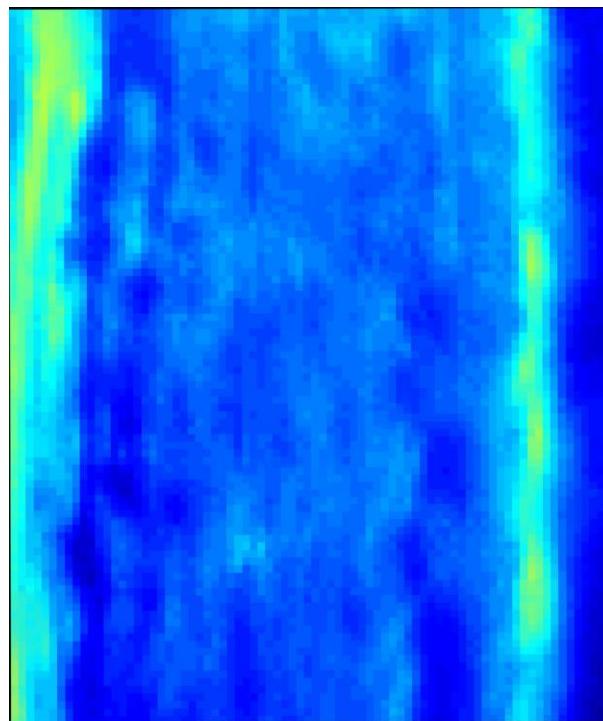


Ilustración 4.15. Resultado ejemplo nº2 stitching con ICE

- **Hugin** (Modo automático. Sólo ha sido capaz de unir dos imágenes).

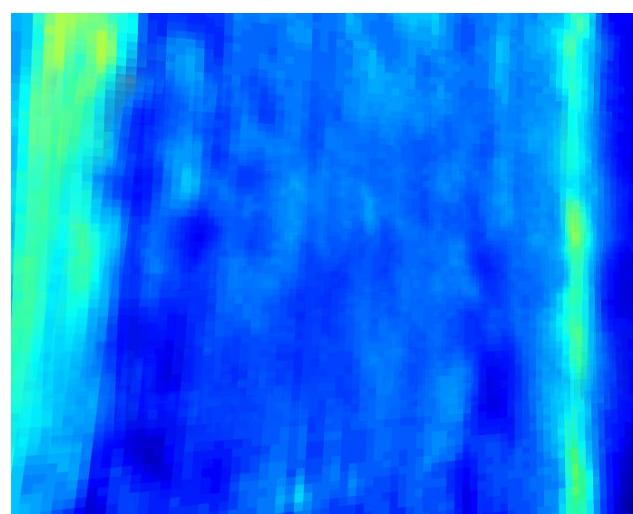


Ilustración 4.16. Resultado ejemplo nº2 stitching con Hugin

- **Autopano Pro** (Modo automático)

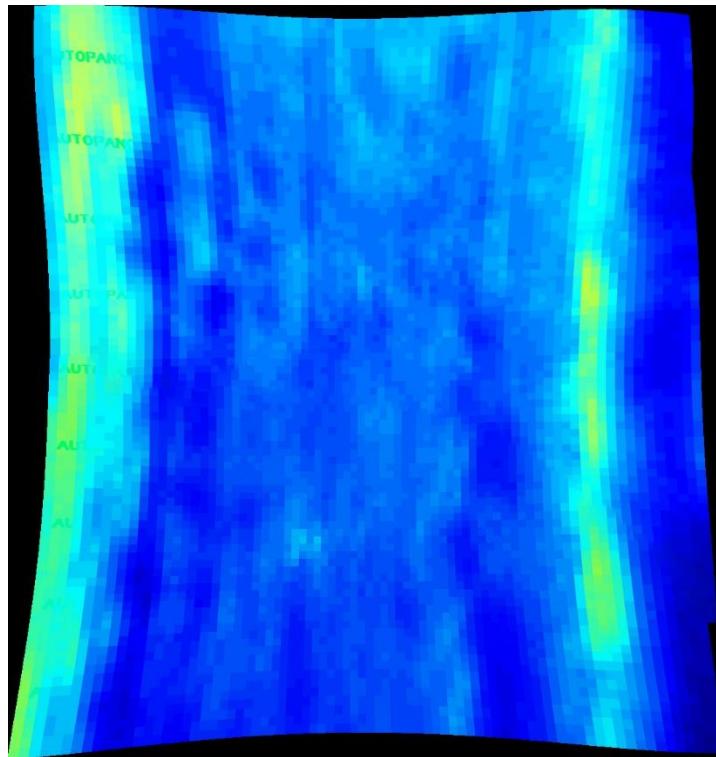


Ilustración 4.17. Resultado ejemplo nº 2 stitching con Autopano Pro

4.2.4 CONCLUSIONES Y PROPUESTA

Una vez estudiados los diferentes programas de *stitching* de imágenes que se han presentado en este capítulo estamos en disposición de realizar una valoración en cuanto a cuál de ellos es el que más se adecúa a las necesidades de este trabajo.

A pesar de que solo es posible realizar una evaluación cualitativa de estos procesos, de los tres programas presentados, *Autopano Pro* y *Hugin* son en general los más potentes y presentan un nivel de configurabilidad más alto, a pesar de esto, muestran dificultades para realizar el proceso cuando no encuentran suficientes puntos de control, lo que será muy habitual, ya que las imágenes de Flir Lepton tienen una resolución muy baja y la naturaleza de las fotos de una parcela dificulta aún más este proceso. En cambio, el programa *Microsoft Image Composite Editor*, que es más sencillo, obtiene generalmente mejores resultados que los dos anteriores mediante la opción manual *imagen estructurada con solapamiento*.

En conclusión, las imágenes térmicas obtenidas con Flir Lepton no tienen suficiente resolución y puntos de control para que un asistente automático detecte dichos puntos de control para componer la imagen. Por tanto, se deberá realizar este proceso manualmente para obtener unos resultados aceptables.

A continuación, se propone el siguiente procedimiento para obtener los mejores resultados posibles en este proceso. Para la captura de las imágenes de la parcela, realizar una programación de las capturas estructurada, de manera que podamos establecer una cuadrícula de la parcela y realizar una toma de imagen para cada cuadrícula. De esta manera conoceremos la posición de cada imagen y podremos estimar el solapamiento entre cada una de las imágenes. Se muestra la siguiente figura como ejemplo:



Ilustración 4.18. Cuadriculado de una parcela

A continuación, utilizaremos la nombrada característica de *imagen estructurada con solapamiento* de Microsoft ICE, colocando cada captura en su lugar correspondiente de la cuadrícula:

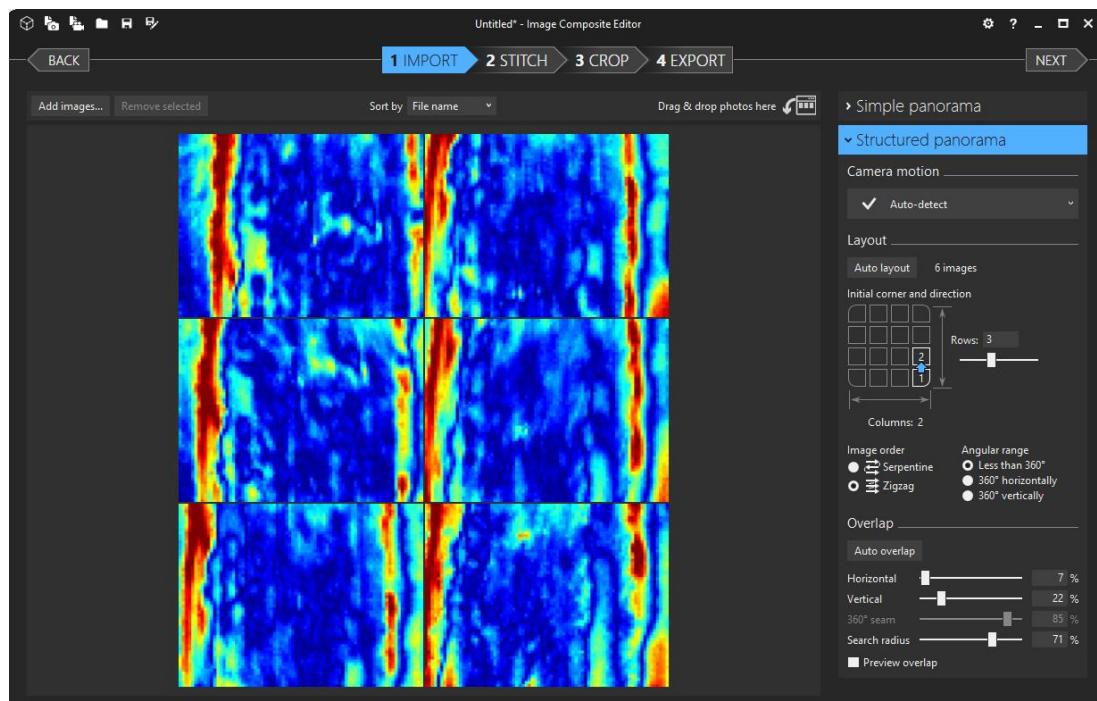


Ilustración 4.19. Stitching de una captura de imágenes estructurada con ICE

5. TEORÍA DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

5.1 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

En este capítulo se desarrolla la teoría del estrés hídrico del cultivo, que ya fue introducida en el Capítulo 2, y cuya finalidad es el control eficiente del riego de un cultivo para optimizar el uso de este recurso y, por tanto, los costes de producción. Se describirá el método desarrollado por *Idso y otr. (1981)* [21] para el cálculo de este índice mediante termómetros infrarrojos, también válido para cámaras termográficas. Después se muestra la aplicación de este método para la programación de riegos y al final de este capítulo se presenta un ejemplo de integración del método desarrollado en el prototipo de cámara termográfica basado en Flir Lepton.

El método del índice de estrés hídrico del cultivo CWSI (*Crop Water Stress Index*), es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. Este enfoque metodológico es necesario para la correcta programación del riego en cultivos agrícolas en campo abierto. Las mediciones del estrés hídrico de los cultivos combinado con sistemas eficientes de riego permiten maximizar el rendimiento a través de un manejo eficiente del riego.

La teoría del índice de estrés hídrico del cultivo se basa en el siguiente enunciado: “El agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera”. A partir de esto, *Jackson y otr. (1981)*[22] presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 – 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo el CWSI es 1.

Idso y otr. (1981) desarrollaron el método empírico (CWSI) para la cuantificación de la humedad atmosférica y de la planta en regiones áridas, la cual depende de la determinación "de las líneas base sin estrés hídrico" que facilitan la normalización de cambios en la temperatura del dosel para condiciones ambientales. Sin embargo, estas líneas base son específicas del cultivo y están influenciadas por el clima. Además, *Jackson y otr. (1981)* modificaron el CWSI para incluir una predicción más teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del dosel que incluye explícitamente el déficit de presión del vapor de agua, la radiación neta y la resistencia aerodinámica. Esta aproximación teórica para determinar la humedad atmosférica que se utiliza en el CWSI es más precisa que la aproximación empírica, particularmente en climas más húmedos.

El índice de estrés hídrico del cultivo según *Idso y otr. (1981)* está definido como:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{LI}}{(T_c - T_a)_{LS} - (T_c - T_a)_{LI}} \quad (1)$$

Donde, T_c = temperatura del cultivo; T_a = temperatura del aire. El subíndice *m* denota la diferencia medida entre las dos temperaturas, el subíndice *l* (límite inferior) denota la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por disponibilidad del agua, de modo que la T_c el valor más bajo para las condiciones del clima, y el subíndice *s* (límite superior) denota la diferencia hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero, como resultado de falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo planta atmósfera.

Se espera que el CWSI varíe entre 0 a 1 cuando las plantas van de una condición bien regada a una condición totalmente estresada. Puesto que no es normalmente factible medir simultáneamente la temperatura del cultivo sin estrés y un cultivo con estrés, los valores del límite inferior y superior de un dosel se pueden calcular mediante el análisis de balance de energía en la superficie.

5.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO EN LOS CULTIVOS MEDIANTE TERMÓMETROS INFRARROJOS

Los termómetros infrarrojos y las cámaras termográficas se usan para medir la temperatura superficial del cultivo. Miden la cantidad de radiación de onda larga emitida de una superficie y se describe por la ley del cuerpo negro de *Stefan–Boltzman* en función de la temperatura.

$$I = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2)$$

Donde, I = radiación emitida por la superficie (W m^{-2}); σ = constante de *Stefan–Boltzman* ($5.674 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); ε = energía que emite un cuerpo a una temperatura dada, para el cuerpo negro es 1 y para otros es menor que 1; T = temperatura en la superficie ($^{\circ}\text{K}$).

Este método utiliza los datos de temperatura para el momento del riego y otra forma de expresarlo, reduciendo términos de la Ecuación 1, se escribe como:

$$CWSI = \frac{(dT - dT_i)}{(dT_s - dT_i)} \quad (3)$$

Donde, dT = diferencia medida entre la temperatura del aire y del cultivo; dT_s = límite superior de las temperaturas del aire menos la temperatura del follaje (cultivo sin transpiración); dT_i = límite inferior de la temperatura del aire menos la temperatura del follaje (cultivo bien regado).

Para determinar el límite superior e inferior en la ecuación del CWSI, se usa el método desarrollado por *Idso y otr. (1981)* que consideran los cambios en los límites superior e inferior debido a la variación del déficit de presión de vapor de agua (DPV). El DPV es la diferencia entre la presión de saturación y la presión actual de vapor (Ecuación 4) y es un indicador preciso de la capacidad real evaporante del aire:

$$DPV = e_s - e_a \quad (4)$$

Donde, e_s = presión de vapor de agua a saturación a una temperatura del aire dada; e_a = presión de vapor de agua actual (presión parcial de vapor de agua en la atmósfera). Cuando el aire no se satura, la presión actual de vapor será más baja que la presión de vapor de saturación.

La presión de vapor de agua a saturación (e_s), en kPa, es la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura (T en $^{\circ}\text{C}$) dada y se calcula con la siguiente ecuación:

$$e_s(T) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right) \quad (5)$$

La presión de vapor de agua actual e_a se puede obtener de la Ecuación 6 utilizando la humedad relativa (HR) y la temperatura del cultivo medidas con el termómetro de rayos infrarrojos:

$$HR = 100 \frac{e_a}{e_s} \quad (6)$$

Un DPV igual a cero indica que el aire sostiene el máximo vapor de agua posible (esto corresponde a una humedad relativa de 100%). El límite inferior del CWSI cambia en función de la presión de vapor del agua debido al DPV. El CWSI varía entre 0 y 1, cuando las plantas se someten a condiciones apropiadas de riego y hasta condiciones totalmente de estrés hídrico. Idso y otr. (1982) demostró que el límite inferior del CWSI es una función lineal del DPV para diversos cultivos y localidades como se puede observar en las tablas 5.1 y 5.2:

Nombre común	Nombre científico	Intercepto (a) °C	Pendiente (b) °C kPa ⁻¹	Autor (año)
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i> L.	0.51	-1.92	Idso (1982)
Cebada (embuche)	<i>Hordeum vulgare</i>	2.01	-2.25	Idso (1982)
Cebada (floración)	<i>Hordeum vulgare</i>	1.72	-1.23	Idso (1982)
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	2.91	-2.35	Idso (1982)
Remolacha	<i>Beta vulgaris</i>	5.16	-2.30	Idso (1982)
Maíz (sin espiga)	<i>Zea mays</i> L.	3.11	-1.97	Idso (1982)
Frijol pelón	<i>Vigna unguiculata</i>	1.32	-1.84	Idso (1982)
Calabaza	<i>Cucurbita maxima</i>	4.88	-2.52	Idso (1982)
Lechuga (hoja)	<i>Lactuca sativa</i> L.	4.18	-2.96	Idso (1982)
Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.	1.17	-1.83	Idso (1982)
Soya	<i>Glycine max</i>	1.44	-1.34	Idso (1982)
Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i>	2.86	-1.96	Idso (1982)
Trigo (embuche)	<i>Triticum aestivum</i> L.	3.38	-3.25	Idso (1982)
Trigo (floración)	<i>Triticum aestivum</i> L.	2.88	-2.11	Idso (1982)
Maíz	<i>Zea mays</i> L.	1.39	-0.86	Irmak et al. (2003)
Sandia	<i>Citrullus vulgaris</i>	0.47	-1.20	Orta et al. (2003)
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i> L.	4.00	-1.88	Ajayi y Olufayo (2004)
Pasto Bermuda	<i>Cynodon dactylon</i>	0.36	-1.84	Emekli et al. (2007)

Tabla 5.1. Parámetros de regresión lineal del índice de estrés hídrico agrícolas en condiciones de cielo despejado

Nombre común	Nombre científico	Intercepto (a) °C	Pendiente (b) °C kPa ⁻¹	Autor (año)
Nogal	<i>Carya illinoensis</i>	0.429	-0.606	Idso (1982)
Ciruelo	<i>Prunus cerasifera</i>	1.050	-1.140	Idso (1982)
Morera	<i>Morus alba</i>	0.332	-0.423	Idso (1982)
	<i>Gleditsia triacanthos inermis</i>	0.947	-0.972	Idso (1982)
Fresno	<i>Fraxinus velutina glabra</i>	2.360	-2.020	Idso (1982)

Tabla 5.2. Parámetros de regresión lineal de la diferencia de las temperaturas del cultivo y el aire respecto al déficit de presión de vapor de agua en algunos cultivos frutícolas

Una vez estimados los parámetros de la regresión lineal, la diferencia de la temperatura del aire y del dosel en un cultivo bien regado (límite inferior) y un cultivo severamente estresado (límite superior) se puede calcular los términos de la ecuación (2) como:

$$dT_i = a + b(DPV) \quad (7)$$

$$dT_s = a + b[e_s(T_a) - e_s(T_a + a)] \quad (8)$$

Donde, DPV= déficit de presión de vapor de agua (kPa); $e_s(T_a)$ = presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (kPa); $e_s(T_a + a)$ = presión de vapor a saturación a la temperatura del aire más el valor del intercepto para el cultivo. De esta manera, con la humedad atmosférica, la temperatura del aire y la temperatura de la hoja es posible determinar el CWSI.

Se han determinado los parámetros de regresión lineal en diversos cultivos anuales (Tabla 5.1) y cultivos frutícolas (Tabla 5.2). Experimentalmente, diversos investigadores (*Calado y otr., 1990; Itier y otr., 1993; Anconelli y otr., 1994; Jones, 1999; Orta y otr., 2003; Yuan y otr., 2004; Erdem y otr., 2005; Simsek y otr., 2005*) han obtenido los parámetros de la regresión lineal en varios cultivos, donde la relación de las diferencias de temperaturas depende del DPV. Por ejemplo, en el cultivo de trigo, *Alderfasi y Nielsen (2001)* encontraron que la diferencia medida de la temperatura del dosel y del aire ($T_c - T_a$) se correlacionó negativamente con el DPV y se obtuvo una $r^2 = 0.88$ con $p = 0.0001$. Sin embargo, en algunos casos, el coeficiente de determinación puede ser bajo ($r^2 = 0.472$) debido a las pequeñas variaciones del DPV ocurridas en campo (*Alkire y Simon, 1992*).

5.3 APLICACIONES DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA PROGRAMACIÓN DE RIEGOS

Según *Idso (1982)*, el CWSI no es apropiado para regiones húmedas, debido a que en estas condiciones, generalmente no se presentan condiciones de sequía. Sin embargo, en climas cálidos húmedos, como el sureste de México, se presentan de tres a cuatro meses con períodos de sequías, principalmente en el ciclo otoño invierno, período donde la cantidad de radiación solar es mayor y los cultivos agrícolas requieren el agua de riego para satisfacer sus necesidades hídricas. *Jones y otr. (1997)* señalan que la humedad relativamente alta en climas húmedos y la variación de la velocidad del viento y de la radiación solar pueden limitar seriamente el uso del método original, pero demostraron que la sensibilidad del método mejora cuando se considera la temperatura de la hoja y no la temperatura del aire (como en el método de CWSI original), es decir, la temperatura de las "hojas modelo" expuestas dentro del cultivo.

Diversos investigadores han desarrollado el método del CWSI en la programación del riego (*Howell y otr., 1984; O'Toole y otr., 1984; Reginato y Howe, 1985; Reginato y*

Garrett, 1987; Wanjura y otr., 1990). Sin embargo, otra de las desventajas de este método es que los valores del CWSI son difíciles de obtener al inicio del ciclo de los cultivos a causa de la cobertura parcial del dosel. Al comienzo del ciclo, cuando las plantas son pequeñas o tienen escasa población, una parte de la superficie del suelo puede ser considerada por la pistola de rayos infrarrojos cuando se efectúa la medición.

En la tabla 5.3 se presenta un resumen de valores umbrales de CWSI en algunos cultivos agrícolas para el momento del riego. La mayoría de los autores señalan que una vez alcanzado el umbral del CWSI es recomendable programar el riego para evitar daños por estrés hídrico y se disminuya el rendimiento de los cultivos.

Autor (año)	Cultivo	Umbral CWSI
Nielsen (1990)	Soya (<i>Glycine max</i>)	0.2
Garrot <i>et al.</i> (1990) y Orta <i>et al.</i> (2003)	Sandía (<i>Citrullus vulgaris L.</i>)	0.41
Hutmacher <i>et al.</i> (1991)	Alfalfa (<i>Medicago sativa L.</i>)	0.1-0.2
Gardner <i>et al.</i> (1992)	Trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>)	0.2-0.3
Anconelli <i>et al.</i> (1994)	Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	0.35
Anconelli y Battilani (2000)	Vid (<i>Vitis vinifera</i>)	0.4
Irmak <i>et al.</i> (2003)	Maíz (<i>Zea mays L.</i>)	0.22
Barbosa y Ramana (2005)	Algodón (<i>Gossipium hirsutum</i>)	0.3
Erdem <i>et al.</i> (2005)	Sandía (<i>Citrullus vulgaris L.</i>)	0.6
Simsek <i>et al.</i> (2005)	Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	0.2
Emekli <i>et al.</i> (2007)	Pasto Bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)	0.1

Tabla 5.3. Valores umbrales del índice de estrés hídrico para la programación del riego en algunos cultivos agrícolas

Un ejemplo de aplicación del CWSI es el siguiente mapa normalizado de un viñedo de 11 hectáreas en Raïmat (Lleida) a las 12:00 GMT [13]:

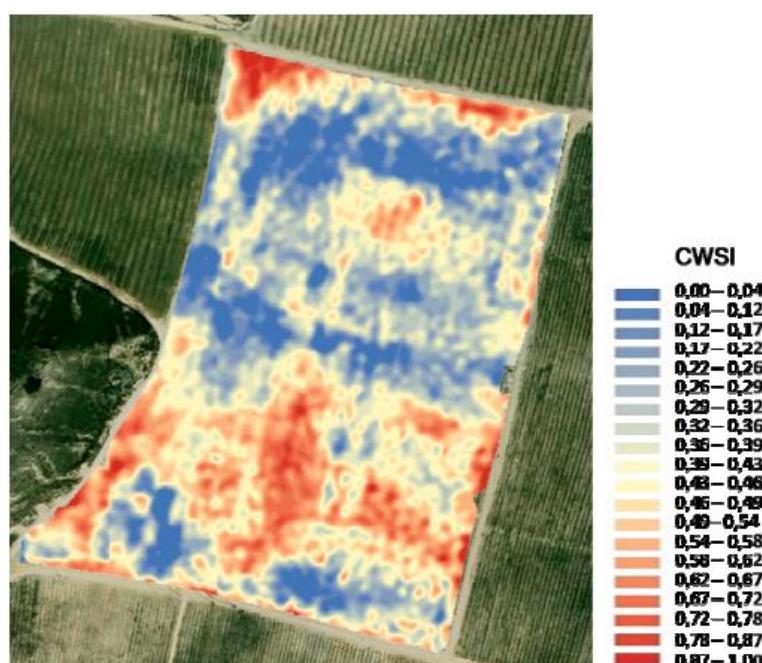


Ilustración 5.1. Mapa normalizado CWSI de un viñedo en Raïmat a las 12:00 GMT

Las condiciones en las que se realizó este estudio fue para $T_a = 32,27^\circ\text{C}$ y $\text{DPV} = 2,37 \text{ KPa}$. Pueden diferenciarse claramente aquellas zonas en las que las vides están sometidas a un mayor déficit hídrico (rojo), de aquellas mejor regadas (azul). A partir de estos mapas, el manejo del riego puede ser más eficiente aplicando la estrategia de riego adecuada solamente en aquellas zonas de la parcela que lo requieran. Para este tipo de cultivo, el umbral por debajo del cual la vid presenta estrés hídrico es 0,4.

5.4 INTEGRACIÓN DEL MÉTODO PARA CALCULAR EL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL PROTOTIPO

Por último, una vez hemos estudiado los fundamentos del índice de estrés hídrico, estamos en disposición de integrar el método descrito en el apartado 2 en el programa de Matlab creado para importar las imágenes capturadas mediante Flir Lepton. De esta manera, podemos obtener de una manera directa los mapas de CWSI a partir de las imágenes capturadas por Flir Lepton en formato PGM.

A continuación, se muestra un programa de *Matlab* ejemplo para el cálculo del CWSI a partir de una imagen ya importada mediante el programa ejemplo del Capítulo 4, y la introducción de los parámetros requeridos para este método (temperatura ambiente, humedad relativa, intercepto a y pendiente b), obteniendo el siguiente resultado:

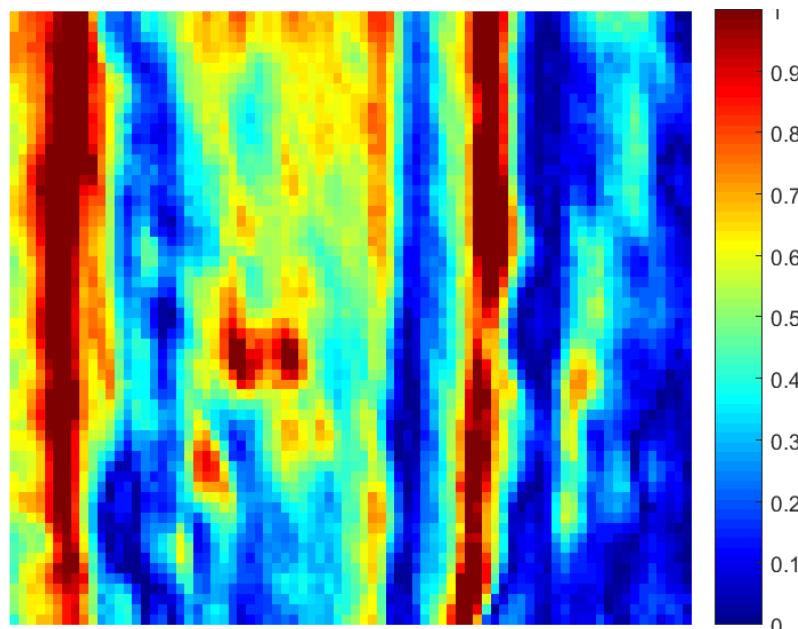


Ilustración 5.2. Resultado del ejemplo de cálculo del CWSI con Matlab de una imagen de Flir Lepton

```

%% Parámetros para el cálculo del CWSI

T_amb = 22;

HR = 60;

a = 4.18;

b = -2.96;

%% Cálculo CWSI

for i=1:60

    for j=1:80

        T = (0.0217*(image(i,j))+T_amb-177.77);

        DPV = (0.611*exp(17.27*T/(T+237.3)))*(1-HR/100);

        dTi = a + b*DPV;

        dTs = a + b*(0.611*exp(17.27*T_amb/(T_amb+237.3))-0.611*exp(17.27*(T_amb+a)/(T_amb+a+237.3)));

        dT = T-T_amb;

        image(i,j)= ((dT-dTi)/(dTs-dTi));

    end

end

%% Mostrar por pantalla el mapa con el CWSI calculado

imagesc(image, [0,1]);

colormap(jet)

colorbar

axis off

```

Programa 5.1. Ejemplo de cálculo de CWSI en Matlab.

6. METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE DATOS MEDIANTE EL PROTOTIPO DESARROLLADO Y ANÁLISIS CON EJEMPLO

En este capítulo se describirá el protocolo que se ha creado para la toma de datos y análisis de los resultados con el prototipo desarrollado en este trabajo, mediante las técnicas descritas en capítulos anteriores. Cada uno de los pasos en los que se divide este protocolo se desarrollará en este apartado con un ejemplo real que se ha realizado con el prototipo. Estos pasos se presentan de una forma resumida a continuación:

1. Planificación y preparación del vuelo del UAV sobre el terreno.
2. Ejecución del vuelo del UAV. Captura de imágenes con Flir Lepton y almacenamiento.
3. Extracción de las imágenes capturadas, exportación de formato y cálculo CWSI.
4. *Stitching* de las imágenes.
5. Análisis CWSI.

Es importante señalar que las condiciones meteorológicas deben ser las adecuadas para la toma de datos de temperatura foliar. Estas condiciones son las que propone *Idso y otr. (1981)* [20,21], que fueron mencionadas en el capítulo anterior.

También es necesario tener en cuenta las restricciones legales que se derivan del uso de aeronaves civiles pilotadas por control remoto. Actualmente, el marco regulatorio para el uso de UAVs se puede encontrar en el BOE del viernes 17 de octubre de 2014, Sección 6^a Aeronaves civiles pilotadas por control remoto, artículos 50 y 51 [30].

6.1 PLANIFICACIÓN Y PREPARACIÓN DEL VUELO DEL UAV SOBRE EL TERRENO

El primer paso es el reconocimiento del terreno sobre el que se va a realizar el estudio. Para este trabajo se realizó el estudio en una finca de San Pedro del Pinatar, en la carretera Tramo de Unión. En la siguiente captura podemos ver una vista de la parcela sobre la que se realizará el ejemplo:

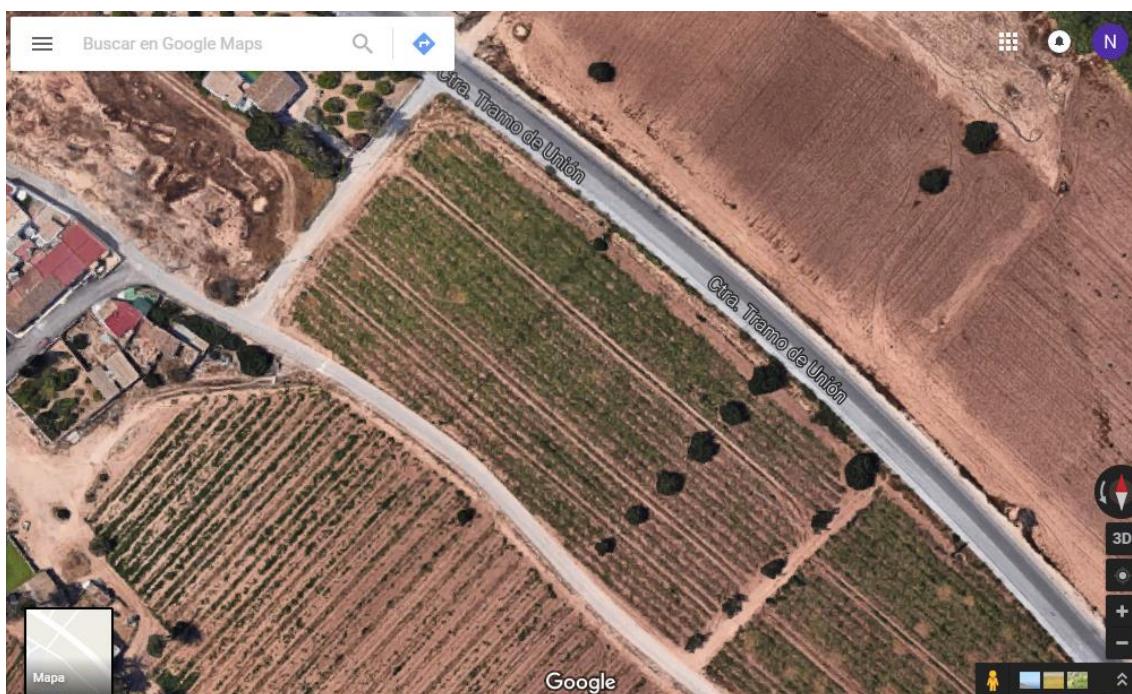


Ilustración 6.1. Captura de la imagen satélite de la parcela sobre la que se realizó el ejemplo

A continuación, se muestra una vista del estado del cultivo en el momento que se realizó el ejemplo, a fecha de 2 de enero de 2017. En este caso se trata de un cultivo de X:



Ilustración 6.2. Fotografía de la parcela sobre la que se realizó el ejemplo

Una vez seleccionados los límites de la parcela sobre la que se va a realizar el estudio, debemos planificar la ruta de vuelo del UAV. Para este trabajo se utilizó un cuadricóptero F450 con una controladora de vuelo APM 2.8, compatible con el *software* gratuito *Mission Planner* [31]. Este *software* nos permite la creación de las rutas que debe seguir el UAV automáticamente, seleccionando la parcela sobre la que queremos realizar el estudio. Para ello, solo debemos seleccionar los puntos que limitan la parcela con la herramienta polígono, y después seleccionar la opción *Survey -> Grid*. De esta manera, visualizamos la siguiente pantalla en el programa:

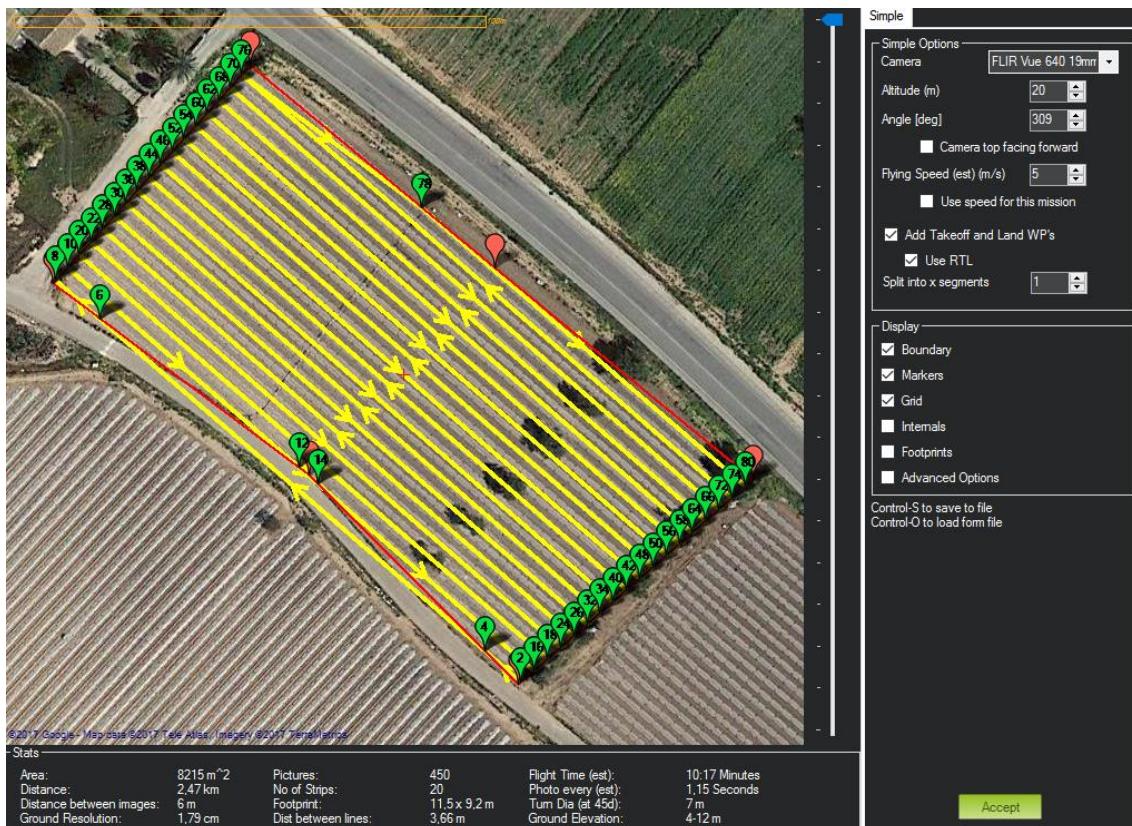


Ilustración 6.3. Ejemplo planificación del vuelo de una parcela

En esta fase inicial del proyecto, es recomendable realizar una ruta más sencilla. En el caso que se muestra a continuación, la ruta seguirá una única hilera:



Ilustración 6.4. Ejemplo de planificación de vuelo de una hilera

Esta pantalla nos permite modificar una serie de parámetros que configurarán la ruta que debe seguir el UAV. Los parámetros principales son:

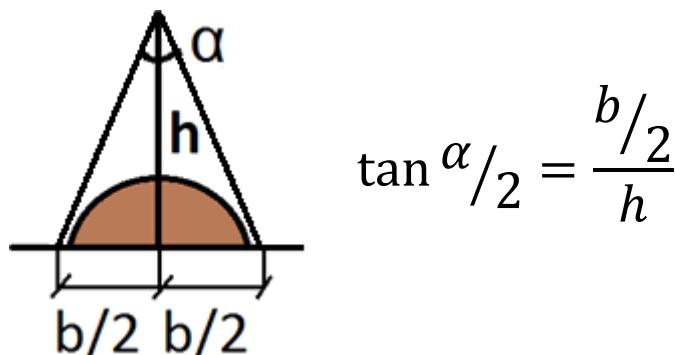
- Cámara. Es posible seleccionar el modelo de cámara y lente que vamos a utilizar, si existe entre las que están definidas. En el caso de Flir Lepton no está definida, pero podemos añadirla manualmente modificando el archivo:

C:\Program Files (x86)\Mission Planner\cameras.xml

Flir no proporciona los datos de distancia focal, tamaño del sensor, etc. de Flir Lepton en su hoja de características. Estos datos son requeridos en este archivo para configurar la cámara y disponer de ella en el software. Por tanto, debemos seleccionar una de las cámaras ya preconfiguradas.

En este caso se ha seleccionado la cámara *Flir Vue 640 19mm*, que es la más similar a Flir Lepton del listado, puesto que es la más pequeña de la marca *Flir* que se puede seleccionar en el programa.

- Altitud (metros). Se entiende altitud en este caso como la distancia sobre el nivel del suelo del terreno en el que se está planificando el vuelo. La altitud la fijaremos en función de la altura del cultivo de la parcela y del ancho de los surcos (si existen). Para su cálculo podemos utilizar el siguiente esquema simplificado:



Donde α es el ángulo de apertura de la lente, en el caso de Flir Lepton el ángulo es 51º. Conocidos el ángulo de apertura y el ancho del surco podemos calcular la altura h con la relación que se presenta junto a la figura.

En el caso de la parcela seleccionada, el ancho del surco es $b = 3$ metros aproximadamente. Aplicando la relación indicada, obtenemos una altura de 3,15 metros aproximadamente.

- Ángulo (º). Mediante este parámetro podemos modificar el ángulo de las pasadas. Se recomienda que este ángulo se aproxime lo máximo posible al ángulo longitudinal de los surcos. En la parcela seleccionada este ángulo es de 309º.
- Velocidad de vuelo (metros/segundo). La velocidad de vuelo no afectará a la ruta del UAV, pero sí es útil cuando se predefinen los puntos donde se realizarán

disparos automáticos de la cámara. En el ejemplo desarrollado no se ha utilizado esta característica.

Una vez configurada la ruta, el programa nos generará un fichero con todos los datos que el UAV necesita para realizarla. Este fichero se podrá utilizar cada vez que se requiera volver a ejecutar la toma de mediciones. Además, este fichero es independiente de la aeronave utilizada, por lo que se podrá utilizar para diferentes modelos de UAV, siempre que sean compatibles con *Mission Planner*.

6.2 EJECUCIÓN DEL VUELO. CAPTURA DE IMÁGENES CON FLIR LEPTON Y ALMACENAMIENTO

Una vez planificada la ruta de vuelo y establecido todas las medidas de seguridad adecuadas, estamos en disposición de realizar la toma de datos con Flir Lepton. Para ello, se recomienda situar la cámara termográfica con un ángulo aproximado de 15º con respecto al suelo si la velocidad de vuelo es lenta, ya que el cuadricóptero se inclina ligeramente durante el vuelo para desplazarse, y la inclinación de este es mayor en función proporcional a la velocidad. En la siguiente figura podemos ver el cuadricóptero F450 con el prototipo creado como se describió en el Capítulo 3, preparado para realizar la toma de datos:



Ilustración 6.5. Drone F450 con el prototipo

A continuación se muestra una fotografía ejecutando la ruta de vuelo:



Ilustración 6.6. Vuelo del UAV sobre la parcela de culvito

Durante el vuelo el prototipo almacenará las imágenes termográficas capturadas en la memoria interna o una tarjeta SD si se dispone de ella.

6.3 EXTRACCIÓN DE LAS IMÁGENES CAPTURADAS, EXPORTACIÓN DE FORMATO Y CÁLCULO CWSI

El siguiente paso es extraer las imágenes capturadas. Para ello podemos utilizar un lector de tarjetas SD en el caso de haber utilizado este almacenamiento, o utilizar software como *WinSCP* [32] que nos permite conectarnos a Intel Edison a través del protocolo SFTP (*Secure File Transfer Protocol*). Para ello, debemos estar conectados en la misma red que Intel Edison. De cualquiera de estas maneras obtendremos las imágenes termográficas capturadas en formato PGM:

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
TCIM_0140.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0141.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0142.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0143.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0144.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0145.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0146.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0147.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0148.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0149.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0150.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0151.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0152.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0153.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0154.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB
TCIM_0155.pgm	31/12/2016 2:43	Archivo PGM	24 KB

Ilustración 6.7. Extracción de las imágenes del ejemplo

A continuación, utilizaremos el programa de Matlab (Anexo II) creado en este trabajo para cambiar de formato las imágenes PGM. En este programa se ha seleccionado el mapa de color *Jet* y un formato de imagen de salida TIFF, como se explica en el Capítulo 4:

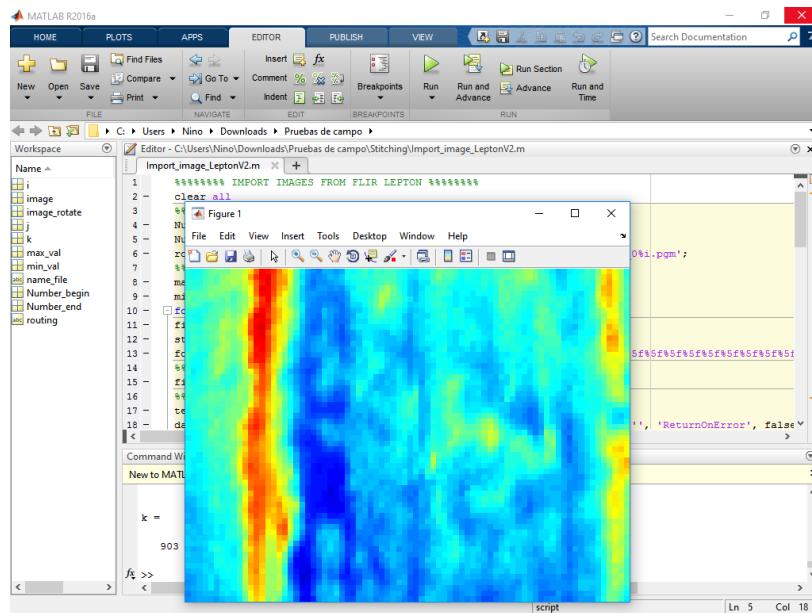


Ilustración 6.8. Proceso Matlab de exportación imágenes del ejemplo

De esta manera, obtendremos en el directorio seleccionado las imágenes termográficas en un formato de imagen compatible con los programas de *stitching* de imágenes:

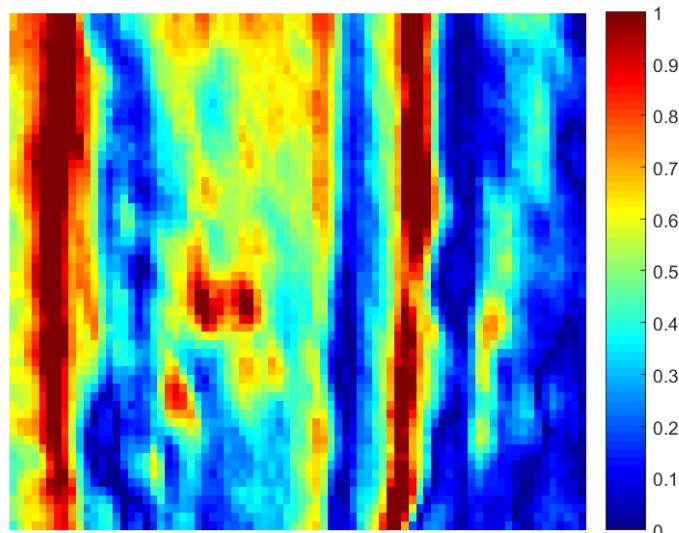
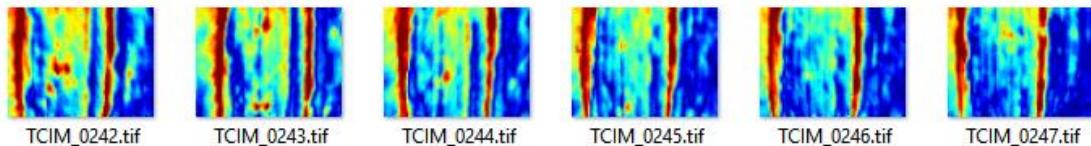


Ilustración 6.9. Resultado de la exportación de imágenes del ejemplo

6.4 STITCHING DE LAS IMÁGENES

Para el siguiente paso, realizaremos un proceso de stitching de las imágenes capturadas y procesadas, mediante los programas descritos en el Capítulo 4, *Image Composite Editor* o *Hugin*.

Es recomendable realizar este proceso por hileras de la parcela y mediante la opción imagen estructurada, ya que será más sencillo que el programa pueda reconocer los puntos de control y pueda llegar finalmente a una solución compuesta por todas las imágenes que le indiquemos. En la captura que se muestra a continuación podemos ver la ventana del programa *Image Composite Editor* con la configuración para realizar el proceso de *stitching* de dos hileras de la parcela:

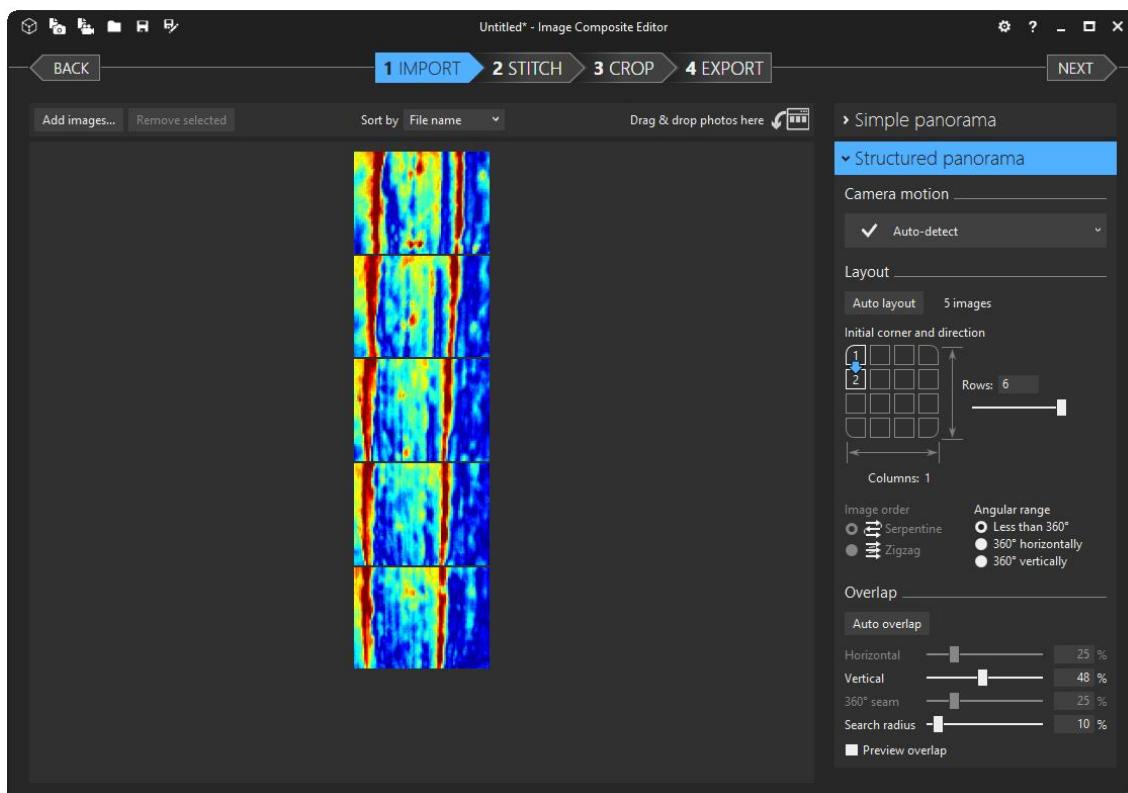


Ilustración 6.10. Proceso stitching hilera ejemplo

En la siguiente figura podemos ver el resultado final obtenido en una hilera:

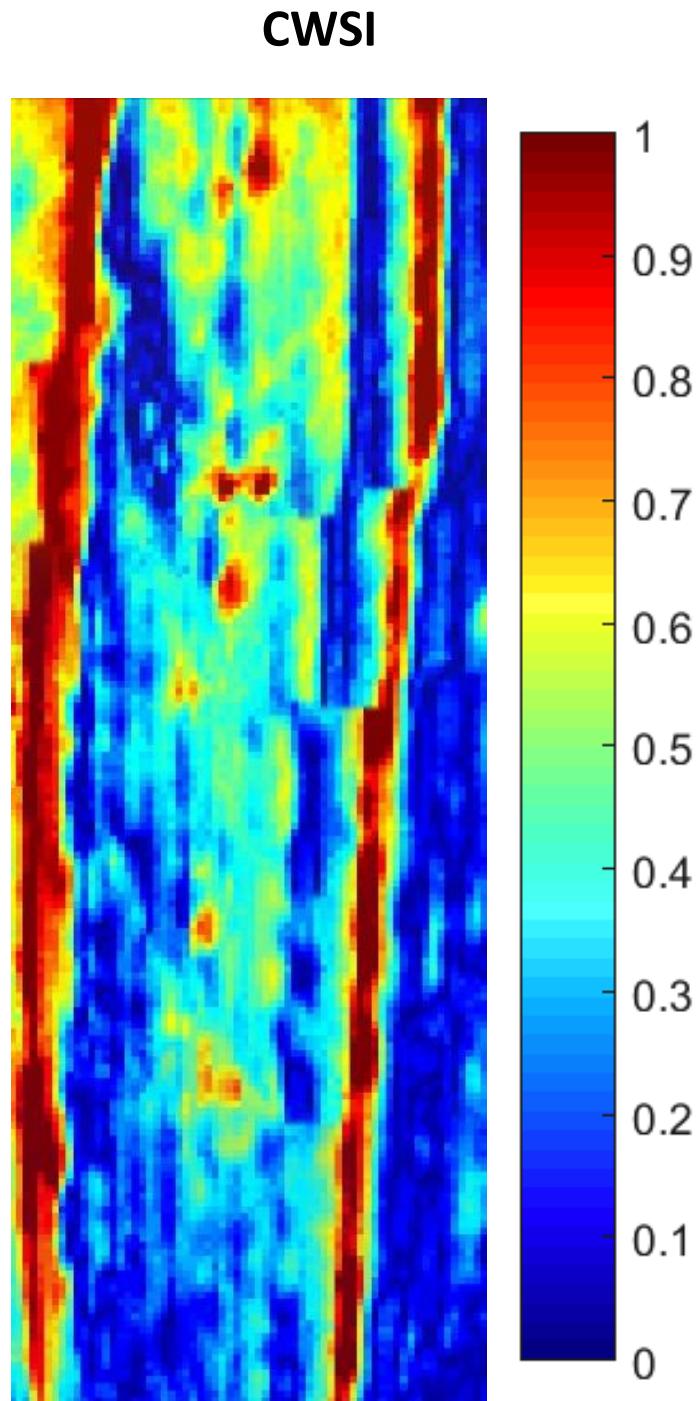


Ilustración 6.11. Resultado de stitching hilera ejemplo

6.5 ANÁLISIS CWSI

Por último, comparamos los resultados obtenidos en el paso anterior con los valores umbrales del índice CWSI. Se espera que el CWSI varíe entre 0 y 1 cuando las plantas van de una condición bien regada (0) a una condición totalmente estresada (1). De esta manera, todas aquellas zonas donde el índice de estrés hídrico se encuentre por encima de su valor umbral para el momento del riego, es recomendable la programación del riego para esas zonas, de forma que se eviten daños por estrés hídrico y esto disminuya el rendimiento de los cultivos.

En la siguiente tabla podemos ver los valores umbrales de algunos cultivos agrícolas:

Autor (año)	Cultivo	Umbral CWSI
Nielsen (1990)	Soya (<i>Glycine max</i>)	0.2
Garrot <i>et al.</i> (1990) y Orta <i>et al.</i> (2003)	Sandía (<i>Citrullus vulgaris L.</i>)	0.41
Hutmacher <i>et al.</i> (1991)	Alfalfa (<i>Medicago sativa L.</i>)	0.1-0.2
Gardner <i>et al.</i> (1992)	Trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>)	0.2-0.3
Anconelli <i>et al.</i> (1994)	Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	0.35
Anconelli y Battilani (2000)	Vid (<i>Vitis vinifera</i>)	0.4
Irmak <i>et al.</i> (2003)	Maíz (<i>Zea mays L.</i>)	0.22
Barbosa y Ramana (2005)	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	0.3
Erdem <i>et al.</i> (2005)	Sandía (<i>Citrullus vulgaris L.</i>)	0.6
Simsek <i>et al.</i> (2005)	Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	0.2
Emekli <i>et al.</i> (2007)	Pasto Bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)	0.1

Tabla 6.1. Valores umbrales CWSI para algunos cultivos agrícolas

Por tanto, en el ejemplo anterior. Si el valor umbral del cultivo fuera 0.4, todas aquellas zonas por encima de este valor deberían ser programadas para el riego.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 CONCLUSIONES

Durante este Trabajo de Fin de Máster se ha pretendido desarrollar un prototipo de cámara termográfica de bajo coste basada en el sensor Flir Lepton, y se ha desarrollado una plataforma de aplicación en el campo de la agricultura para la medición del índice del estrés hídrico de una parcela mediante un UAV y la cámara termográfica.

Para cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo, se ha estudiado la plataforma Intel Edison para el desarrollo de prototipos electrónicos y se han estudiado las capacidades que ofrece Flir Lepton como sensor termográfico. Se ha diseñado una interfaz de comunicaciones y se ha desarrollado un programa para la obtención de imágenes térmicas mediante estos dos dispositivos. Sobre este prototipo se han realizado una serie de pruebas de campo para medir sus capacidades máximas y se ha propuesto también un diseño para su encapsulamiento. A continuación, se ha desarrollado un programa de Matlab para la importación de las imágenes térmicas de Flir Lepton y el tratamiento de las mismas, y se han estudiado y evaluado diferentes programas tanto comerciales como de código abierto para realizar técnicas de *stitching* de imágenes. Seguidamente se ha estudiado el índice de estrés hídrico y cómo obtenerlo mediante el uso de cámaras térmicas. Por último, se ha propuesto un procedimiento para llevar a cabo el cálculo del índice de estrés hídrico de una parcela mediante el prototipo y análisis de resultados, y se ha mostrado uno de los ejemplos que se ha realizado en una parcela real.

Las conclusiones obtenidas de cada uno de estos aspectos de este trabajo son:

- Flir Lepton es el sensor termográfico sin refrigeración más pequeño y de menor coste que se puede encontrar actualmente en el mercado, en consecuencia, dispone de unas capacidades menos potentes que las que ofrecen otros dispositivos con un coste más alto, principalmente en el apartado de la resolución. A pesar de esto, las características de Flir Lepton y del prototipo final desarrollado mediante Intel Edison son suficientes para el caso que se ha tratado en este trabajo.
- Flir Lepton es un producto en desarrollo, esto quiere decir que no se dispone todavía de todas las funcionalidades que esta cámara termográfica puede ofrecer. En este trabajo se ha utilizado la versión 1.0 de este sensor.

Actualmente, la versión más reciente de la que se puede disponer es la 2.5, que dispone finalmente del modo radiométrico para medir temperatura, punto que se ha tratado en este trabajo. Debido a que no se disponía de esta funcionalidad en la versión utilizada para este trabajo no se ha podido estudiar la calibración y la medición de temperatura mediante este sensor, que es una característica fundamental y necesaria para el cálculo del índice de estrés hídrico. Por lo tanto, en este aspecto, la viabilidad de la aplicación de las técnicas, procedimientos y dispositivos desarrollados en este proyecto en situaciones reales pasa por la sustitución del sensor por esta nueva versión, reutilizando toda la infraestructura desarrollada.

- Que nosotros sepamos, no existe software de *stitching* de imágenes gratuito específico para imágenes térmicas, y no se han podido analizar programas comerciales, ya que estos son específicos para los modelos de cámaras termográficas que ofrece cada fabricante. A pesar de que en muchos casos los programas de *stitching* de imágenes RGB que se han analizado en este trabajo han podido trabajar con imágenes térmicas, la naturaleza de estas imágenes junto con la baja resolución del sensor, hace necesario el desarrollo en el futuro de programas específicos para este cometido con el fin de obtener resultados óptimos.
- El índice de estrés hídrico (CWSI) empleado en este trabajo, que ofrece una medición del estado de estrés hídrico de las plantas, parece ser el que más se adecúa para el uso de una cámara termográfica monobanda en la agricultura, y es ampliamente utilizado y avalado por la comunidad científica y por el sector agrario, debido a los grandes beneficios que ofrece para la optimización en la programación de los riegos. En este trabajo se ha calculado este índice a través de unas temperaturas estimadas, pero se hace necesario realizar este cálculo en el futuro con la versión 2.5 de Flir Lepton, para poder evaluar realmente los resultados obtenidos y realizar un análisis de prestaciones que permita comparar nuestro desarrollo de bajo coste con otras propuestas existentes.
- Se ha diseñado una plataforma válida para el cálculo y análisis de un índice agronómico independiente de la versión del sensor utilizado, esto quiere decir que, si se dispone de una versión posterior a la utilizada en este trabajo como la 2.5, tanto el programa desarrollado como los procedimientos propuestos son válidos para esta nueva versión.

Por ello, en vista de los resultados y las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto, se concluye el mismo, apostando por la viabilidad de continuar con la plataforma de aplicación a la agricultura de bajo coste basada en la cámara termográfica Flir Lepton.

Asimismo, también se propone Flir Lepton como una solución de bajo coste para otras aplicaciones que no se han estudiado en este trabajo pero que no requieren de una calidad alta del sensor, como por ejemplo, construcción, comprobación de paneles solares, seguridad y salvamento, detección de fugas de agua, etc.

7.2 LÍNEAS FUTURAS

En cuanto a las líneas futuras de este proyecto se proponen los siguientes puntos:

- Medición de temperaturas con la versión 2.5 de Flir Lepton. Como se ha mencionado anteriormente, resulta fundamental la lectura de temperaturas para el cálculo del índice de estrés hídrico. Por tanto, sería necesario adquirir este sensor, realizar una calibración adecuada y evaluar los resultados obtenidos para evaluar la viabilidad futura del proyecto.
- Elaboración de un programa de *stitching* específico para imágenes térmicas de baja resolución. Como se ha descrito anteriormente, esta es una necesidad que existe debido a que todos los programas de los que se puede disponer con licencia *opensource* están preparados para imágenes RGB de alta resolución.
- Automatización de los procesos. Una vez evaluadas las prestaciones del prototipo desarrollado en este proyecto, el siguiente paso pasaría por automatizar los procesos que actualmente se realizan manualmente mediante Matlab y los diferentes programas de *stitching*. Estos procesos que se realizan en un PC manualmente podrían ejecutarse directamente en Intel Edison, ya que posee potencia suficiente y un sistema operativo Linux que permite el desarrollo de aplicaciones complejas de procesamiento de imágenes y de comunicación en tiempo real.
- Integración con el UAV. En primera instancia sería interesante la comunicación directa de ambos dispositivos para la transmisión de información como las coordenadas GPS donde se realizan las capturas, que se podrían almacenar como metadatos en las imágenes, o indicar al UAV que vuelva a un punto concreto de la parcela para repetir automáticamente capturas que han podido resultar erróneas. Por último, la integración de las funciones de los dos dispositivos necesarios (controladora de vuelo del UAV e Intel Edison para controlar Flir Lepton) en un único dispositivo mejoraría la eficiencia del equipo al reducir el número de componentes necesarios y el peso.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Documentación Flir Dev Kit y Flir Lepton. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://www.sparkfun.com/products/13233>

- [2] Flir Lepton Github. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://github.com/groupgets/LeptonModule>

- [3] Comunidad Flir Lepton. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://groups.google.com/forum/#!forum/flir-lepton>

- [4] Flir Lepton RAW a temperatura. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://groups.google.com/forum/#!topic/flir-lepton/MhCsyeY4HY0>

- [5] Flir Lepton V2.5. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://groupgets.com/manufacturers/flir/products/radiometric-lepton-2-5>

- [6] Groupgets Pure Thermal 1 con Flir Lepton Modulo. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://groupgets.com/manufacturers/getlab/products/purethermal-1-flir-lepton-smart-i-o-module>

- [7] Documentación Intel Edison. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://software.intel.com/es-es/iot/hardware/edison/documentation>

- [8] Intel System Studio IoT Edition. Disponible en (Última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://software.intel.com/en-us/intel-system-studio-iot-edition-guide-for-c>

- [9] Intel Edison biblioteca MRAA. Disponible en (Última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://iotdk.intel.com/docs/mraa/v0.9.6>

- [10] Crear Linux Kernel custom para Intel Edison v2.1. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://shawnhymel.com/724/creating-a-custom-linux-kernel-for-the-edison-yocto-2-1/>

- [11] Termografía y seguimiento de cultivos en Agricultura de Precisión. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://www.adqando.com/termografia-y-seguimiento-de-cultivos-en-agricultura-de-precision/>

- [12] Usos agrarios de los vehículos aéreos no tripulados, Itacalidad. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

http://www.agricolae.es/docftp/pdf_usos_agrarios_de_los_vehiculos_aereos_no_tripulados.pdf

- [13] Utilización del Crop Water Stress Index (CWSI) para la programación del riego en viñedos. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

http://quantalab.ias.csic.es/pdf/Agricultura,%20Agua%20y%20Energia_2011.pdf

- [14] Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas, Ensayo por Rutilo López López, Campo Experimental Huimanguillo, Tabasco, México. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100010

- [15] Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión, TFM de Díaz García-Cervigón, Juan José, Universidad Complutense de Madrid. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf

- [16] Aplicaciones de la termografía de infrarrojos en la agricultura moderna, I. F. García-Tejero, Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos, Rio de Janeiro (Brasil). Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://www.innovagri.es/gestion-del-agua/termografia-infrarrojos-agricultura.html>

- [17] Parrot Sequoia. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://www.parrot.com/es/profesional/parrot-sequoia#parrot-sequoia->

- [18] Sensefly eBee. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/documents/brochures/eBee_es.pdf

- [19] Flir Tau 2. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://www.flir.com/cores/display/?id=54717>

- [20] Idso, S.B.; Jackson, R. D.; Pinter, P. J.; Reginato, R. J. and Hatfield, J. L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteorol. 24:45–55

- [21] Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agric. Meteorol. 27:59–70.

- [22] Jackson, R. D.; Idso, S. B., Reginato, R. J. and Pinter Jr, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resour. Res. 17:1133

- [23] Jackson, R. D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. In: advances in irrigation. Volume 1. Hillel, D. I. Editor. Academic Press. p. 43–85.

- [24] Jackson, R. D.; Kustas, W. P.; and Choudhury, B. J. 1988. A reexamination of the crop water stress index. Irrig. Sci. 9:309–317

- [25] Formato de imagen PGM. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://netpbm.sourceforge.net/doc/pgm.html>

- [26] Comparativa de software de stitching de imágenes. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_photo_stitching_software

- [27] Microsoft ICE. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography-applications/image-composite-editor/>

- [28] Hugin. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://hugin.sourceforge.net/>

- [29] Autopano. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://www.kolor.com/autopano/>

- [30] BOE del viernes 17 de octubre de 2014, Sección 6^a Aeronaves civiles pilotadas por control remoto, artículos 50 y 51. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-7064

- [31] Software Mission Planner. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<http://ardupilot.org/planner/docs/common-install-mission-planner.html>

- [32] Software Win SCP. Disponible en (última consulta: 4 de marzo 2017):

<https://winscp.net/eng/docs/lang:es>

ANEXO I. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA EN C PARA CAPTURAR IMÁGENES DE FLIR LEPTON CON INTEL EDISON

```

#include<stdio.h>
#include<signal.h>
#include<unistd.h>
#include<mraa.h>

void sig_handler(int signum);
void save_pgm_file();

static sig_atomic_t volatile isrunning = 1;
static unsigned int image[80*60];

main(int argc, char **argv)
{
    signal(SIGINT, &sig_handler);

    //CONFIGURACIÓN INICIAL BUS SPI, MRAA, VARIABLES

    mraa_init();
    mraa_gpio_context cs = mraa_gpio_init(9);
    mraa_gpio_dir(cs, MRAA_GPIO_OUT);
    mraa_gpio_write(cs, 1);
    mraa_spi_context spi = mraa_spi_init(0);
    mraa_spi_mode(spi, MRAA_SPI_MODE3);
    mraa_spi_frequency(spi, 6250000);
    mraa_spi_lsbmode(spi, 0);
    mraa_spi_bit_per_word(spi, 8);

    uint8_t payload[164];
    uint8_t *recv = NULL;
    int packetNb;
    int i;
    uint8_t checkByte = 0x0f;

    usleep(200000);

    //LOOP DE CAPTURA DE IMÁGENES

    while(1)
    {

        mraa_gpio_write(cs, 0); //SELECCIONAR CHIP

        //BUCLE PARA DESCARTAR PAQUETES

        while((checkByte & 0x0f) == 0x0f && isrunning)
        {
            if(recv)
                free(recv);
            recv = mraa_spi_write_buf(spi, payload, 164);
            checkByte = recv[0];
            packetNb = recv[1];
        }
    }
}

```

```

        }
        //SINCRONIZACIÓN CONSEGUIDA, RECIBIR PAQUETES A
CONTINUACIÓN

while(packetNb < 60 && isrunning)
{
    if((recv[0] & 0x0f) != 0x0f) {
        for(i=0;i<80;i++)
        {
            image[packetNb * 80 + i] = (recv[2*i+4]
                << 8 | recv[2*i+5]);
        }
    }
    if(recv)
        free(recv);
    recv = mraa_spi_write_buf(spi, payload, 164);
    packetNb = recv[1];
}

//ALMACENAR IMAGEN EN MEMORIA INTERNA

save_pgm_file();

//DESELECCIONAR CHIP

mraa_gpio_write(cs, 1);
checkByte = 0x0f;

//TIEMPO DE ESPERA PARA TOMAR SIGUIENTE CAPTURA
(NANOSEGUNDOS)

usleep(1000000);
}

//CERRAR SPI, MRAA

mraa_gpio_close(cs);
mraa_spi_stop(spi);
return MRAA_SUCCESS;
}

void save_pgm_file()
{
    int i;
    int j;
    unsigned int maxval = 0;
    unsigned int minval = 100000;
    char image_name[32];
    int image_index = 0;
}

```

```

do {
    sprintf(image_name,
"/home/root/Lepton/TCIM_%4d.pgm", image_index);
    image_index += 1;
    if (image_index > 9999)
    {
        image_index = 0;
        break;
    }

} while (access(image_name, F_OK) == 0);

FILE *f = fopen(image_name, "w");
if (f == NULL)
{
    printf("Error opening file!\n");
    exit(1);
}
for(i=0;i<60;i++)
{
    for(j=0;j<80;j++)
    {
        if (image[i * 80 + j] > maxval) {
            maxval = image[i * 80 + j];
        }
        if (image[i * 80 + j] < minval) {
            minval = image[i * 80 + j];
        }
    }
}
fprintf(f, "P2\n80 60\n%u\n",maxval-minval);
for(i=0;i<60;i++)
{
    for(j=0;j<80;j++)
    {
        fprintf(f,"%u ", image[i * 80 + j]);
    }
    fprintf(f, "\n");
}
fprintf(f, "\n\n");
fclose(f);
}

void sig_handler(int signum)
{
    if(signum == SIGINT)
        isrunning = 0;
}

```

ANEXO II. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE MATLAB PARA IMPORTAR IMÁGENES DE FLIR LEPTON Y CÁLCULO DEL CWSI


```

T = (0.0217*(image(i,j)+512))+T_amb-177.77; %%
FÓRMULA TEMPERATURA

DPV = (0.611*exp(17.27*T/(T+237.3)))*(1-HR/100); %%
FÓRMULA DPV

dTi = a + b*DPV; %% FÓRMULA DTI

dTs = a + b*(0.611*exp(17.27*T_amb/(T_amb+237.3))-0.611*exp(17.27*(T_amb+a)/(T_amb+a+237.3))); %% FÓRMULA DTS

dT = T-T_amb; %% FÓRMULA DT

image(i,j) = (dT-dTi)/(dTs-dTi); %% FÓRMULA CWSI

end

end

%% ROTAR IMAGEN

image_rotate = imrotate(image,180);

%% MOSTRAR IMAGEN FINAL POR PANTALLA

imagesc(image_rotate,[0,1]);
colormap(jet)
colorbar
axis off

%% ALMACENAR IMAGEN

saveas(gcf,name_file,'tif')

end

```

ANEXO III. CREACIÓN DE UN CUSTOM LINUX PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS SPI DE INTEL EDISON

Es importante señalar que este parche se utiliza para solucionar los conocidos problemas de Intel Edison con la interfaz SPI en la versión que se ha utilizado en este trabajo (*1.6.2 poky distribution, Intel Edison v2.1*). Este problema debería solucionarse en futuras actualizaciones de Intel. Antes de realizar el procedimiento, comprobar los siguientes requisitos:

- Todos los pasos que se describen en este anexo se deben realizar con una máquina Linux, preferentemente con un sistema Ubuntu, ya que se usarán comandos *apt-get*.
- Son necesarios al menos 50 GB de espacio libre en el disco.
- Deben ser ejecutados en una partición tipo Linux (por ejemplo, Ext4.) ya que con particiones NTFS pueden surgir problemas.

DESCARGA DE LOS ARCHIVOS NECESARIOS

En el siguiente enlace en el apartado descargas seleccionar Linux Source Files con la última versión disponible:

<https://software.intel.com/en-us/iot/hardware/edison/downloads>

Abrir consola e instalar las siguientes herramientas:

```
sudo apt-get install gawk wget git-core diffstat unzip texinfo gcc-multilib build-essential chrpath socat libsdl1.2-dev
```

CREAR BUILD INICIAL

Navegar al directorio de descargas (o donde se descargó el archivo fuente de Edison tipo *zip*):

cd Downloads

Descomprimir y navegar al directorio de la nueva carpeta:

tar xvf edison-src.tgz

cd edison-src/

Ejecutar el script de *setup* para descargar el repositorio necesario:

mkdir bitbake_download_dir

mkdir bitbake_sstate_dir

```
./meta-intel-edison/setup.sh--dl_dir=bitbake_download_dir--  
sstate_dir=bitbake_sstate_dir
```

Configurar el entorno de desarrollo:

cd out/linux64/

source poky/oe-init-build-env

Automáticamente te moverá al directorio *edison-src/out/linux64/build directory*, ejecutar el siguiente comando para crear una imagen inicial de Intel Edison:

bitbake edison-image

Este paso requiere de mucho tiempo (horas), ya que necesita compilar todo el *kernel*. Las siguientes construcciones tomarán menos tiempo.

CONFIGURAR Y CREAR NUEVO KERNEL

Navegar al directorio: *edison-src/out/linux64/build directory*, y ejecutar:

bitbake virtual/kernel -c menuconfig

A partir de este punto, es posible elegir que funcionalidades del *kernel* se desea incluir en la *build*. Para aprender más sobre esto, visitar el siguiente enlace:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Menuconfig>

Una vez se haya acabado, guardar y salir de *menunconfig*. Copiar el archivo de configuración al directorio build de Intel Edison:

```
cp      tmp/work/edison-poky-linux/linux-yocto/3.10.17-r0/linux-edison-standard-
build/.config/../../meta-intel-edison/meta-intel-edison-bsp/recipes-
kernel/linux/files/defconfig
```

Ejecutar bitbake de nuevo para crear la nueva imagen:

bitbake edison-image

Finalmente, ejecutar el *post-build script* para generar el directorio *toFlash*:

cd ../../meta-intel-edison/utils/flash/

Navegar al directorio para realizar el proceso *flash*:

cd ../../out/linux64/build/toFlash/

APLICAR PARCHE CUSTOM PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS SP

Descargar los archivos disponibles en el siguiente enlace:

<https://github.com/drcrallen/meta-primiano-dma>

Añadir el parche al directorio de desarrollo en la lista BBLAYERS en: *conf/bblayers.conf*.

Preparar un estado limpio para la construcción del *kernel* con:

bitbake -c cleansstate linux-yocto

Construir el *kernel* con *bitbake*:

bitbake -k linux-yocto

Volver a construir el *kernel* en la imagen con:

bitbake edison-image

FLASH EDISON

Para flashear Intel Edison con una nueva imagen, conectar los puertos USB de la placa y ejecutar:

sudo ./flashall.sh

Esto flasheará la placa, para realizar este paso guardando los datos de usuario, utilizar el siguiente comando:

sudo ./flashall.sh --keep-data

ANEXO IV. PLANOS DE LA CARCASA DEL PROTOTIPO

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

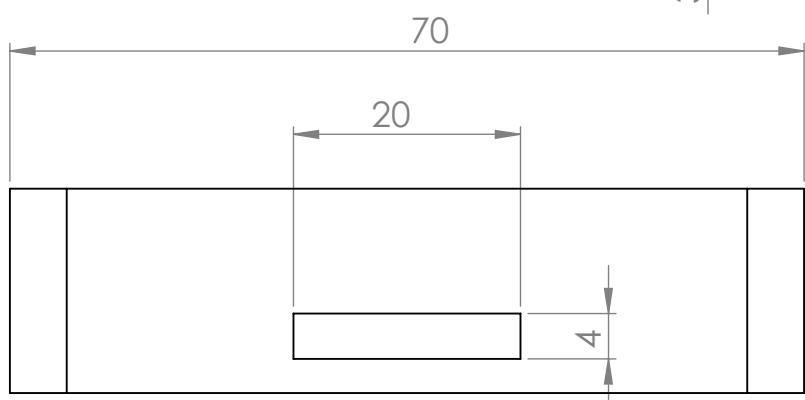
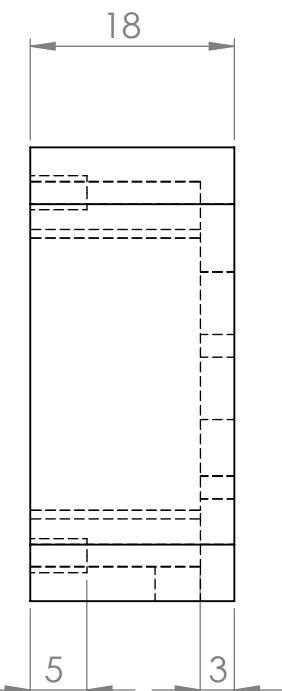
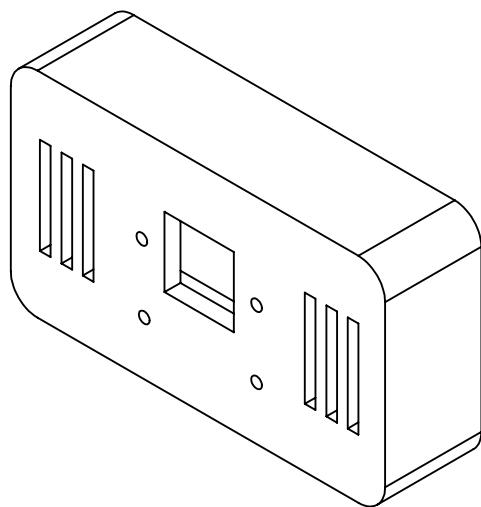
C

B

B

A

A



Desarrollo de una plataforma para adquisición de imágenes basada en dron y cámara térmica con aplicación en agricultura

Universidad Politécnica de Cartagena

Autor: Pedro Celestino López Jiménez



MATERIAL:

Carcasa Flir Lepton Parte 1

A4

ESCALA: 3:2

Cotas en mm

HOJA 1 DE 2

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

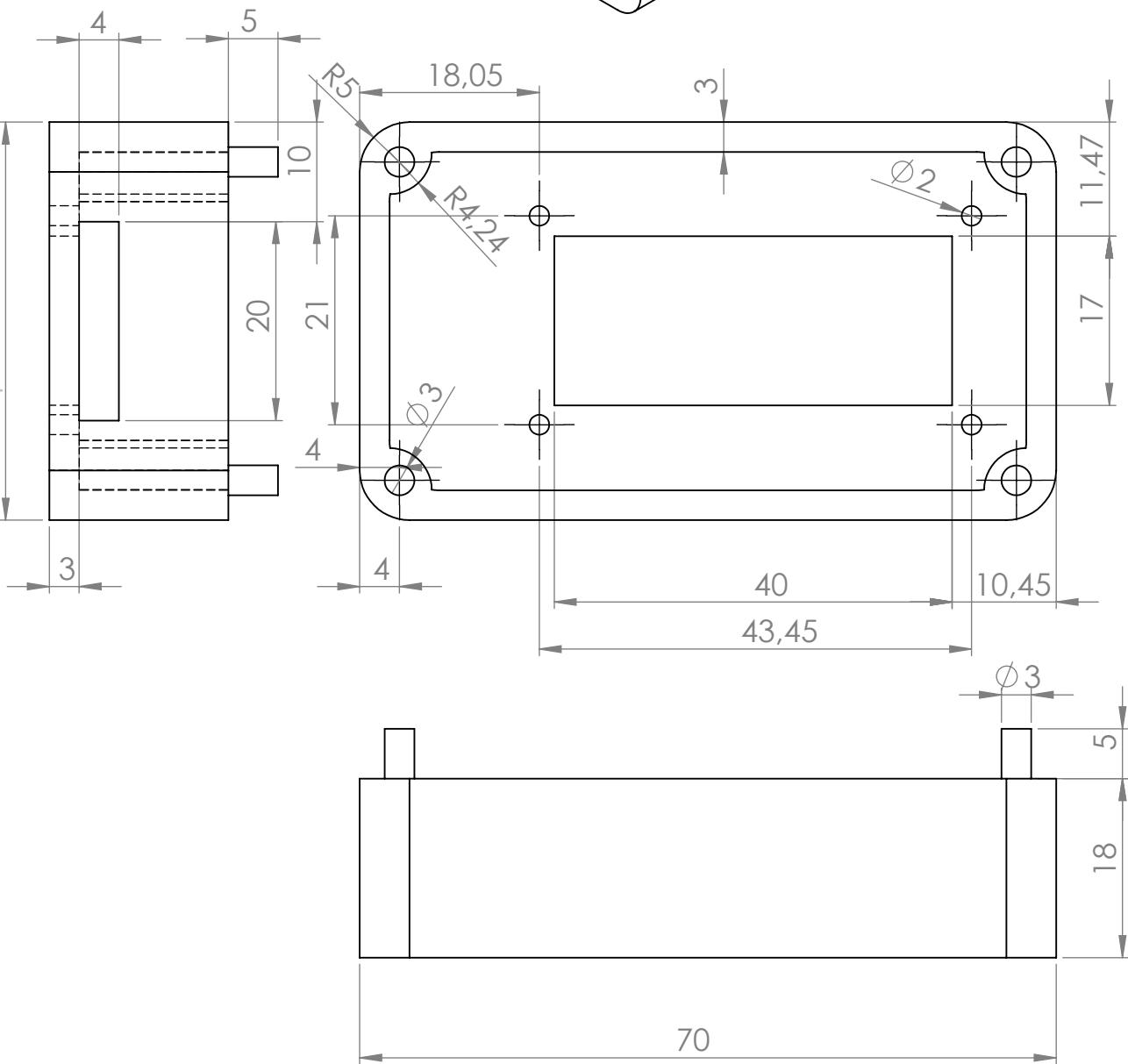
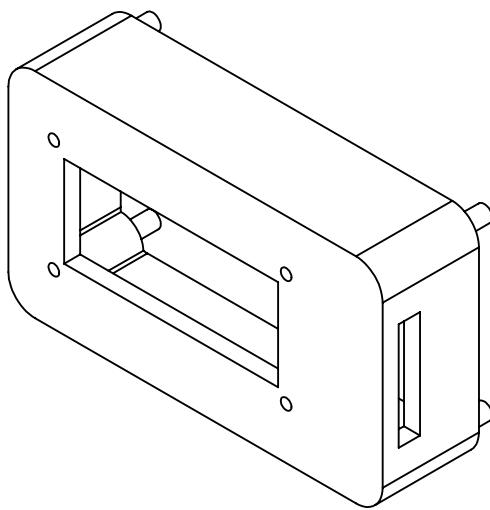
C

B

B

A

A



Desarrollo de una plataforma para adquisición de imágenes basada en dron y cámara térmica con aplicación en agricultura

Universidad Politécnica de Cartagena

Autor: Pedro Celestino López Jiménez



MATERIAL:

Carcasa Flir Lepton Parte 2

A4

ESCALA: 3:2 Cotas en mm HOJA 2 DE 2

4

3

2

1