

ENTREGABLE 12:

INFORME TÉCNICO INFORMACIÓN TERMOGRÁFICA SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR

(VERSIÓN 1.1 - 1/JULIO/2022)

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	4
A.	ANTECEDENTES.....	4
1.	Interés de las imágenes de teledetección en agricultura	4
2.	Datos básicos sobre sensores térmicos de teledetección	5
2.1	Fotodiodos	5
2.2	Micro bolómetros	6
2.3	Termopilas	7
2.4	Dispositivos pyroeléctricos	7
3.	Plataformas	7
B.	OBJETIVO	8
C.	DEFINICIONES	8
II.	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE SENSORES DE TELEDETECCIÓN TÉRMICA.....	10
1.	RESOLUCIÓN	10
1.1	Resolución radiométrica.....	10
1.2	Resolución espectral.....	11
1.3	Resolución espacial.....	11
2.	EXACTITUD (CALIBRACIÓN)	12
4.	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES PARA EL PROCESO DE LOS DATOS	14
III.	EJEMPLOS DE DIFERENTES SENSORES.....	17
1.	SENSOR AHS (Figura 3)	17
2.	SENSOR ZENMUSE XT2 (figura 5)	21
3.	SENSOR HyTES	22
4.	OTROS SENSORES TÉRMICOS AEROPORTADOS	23
IV.	ANÁLISIS DEL CASO DE HAPS TENIENDO EN CUENTA LOS REQUISITOS	24
V.	CONCLUSIONES.....	27
VI.	REFERENCIAS	29



I. INTRODUCCIÓN

A. ANTECEDENTES

1. Interés de las imágenes de teledetección en agricultura

Las imágenes de teledetección tiene innumerables aplicaciones agrícolas. Una revisión reciente se encuentra en (Weiss et al., 2020).

En esta revisión se distingue entre variables primarias y secundarias. Las primarias son aquellas que están directamente implicadas en la interacción de la radiación electromagnética con el cultivo; estas variables necesitan un modelo simple para ser obtenidas a partir de datos de teledetección. Las secundarias están indirectamente implicadas en la transferencia radiativa y necesitan un modelo complejo y mucha información externa para ser obtenidas a partir de datos de teledetección.

Ejemplos de las primeras son:

- Monitorización del índice de área foliar a través del NDVI,
- temperatura, un indicador de stress hídrico y estado de salud,
- humedad del suelo.

Entre las segundas encontramos aplicaciones avanzadas como:

- Identificación de cultivos,
- evapotranspiración real, como indicador de las necesidades de riego,
- predicción del rendimiento de la cosecha.

El diseño de una misión operacional de teledetección que beneficie la capacitación e innovación digital del sector agroalimentario debe considerar prioritariamente esas aplicaciones, manteniendo si es posible la posibilidad de servir a otros usuarios (forestales, calidad de aguas...).

Por otra parte, de las aplicaciones posibles, algunas utilizan información en el rango espectral solar, habitualmente en el tramo visible e infrarrojo próximo (VNIR) y ocasionalmente también en el el infrarrojo medio (SWIR). Otras a cambio necesitan del uso de imágenes en el rango espectral térmico (TIR); estas últimas encuentran más limitaciones a la hora de utilizar datos de plataformas espaciales, y por tanto es necesario explorar la potencialidad de plataformas aéreas o HAPS.

2. Datos básicos sobre sensores térmicos de teledetección

Existe un gran número de tecnologías que nos permiten captar y registrar información en la región térmica del espectro electromagnético. Según las longitudes de onda en las que vayamos a centrarnos serán más indicados unos detectores frente a otros (Figura 1). A continuación se enumeran los tipos de detectores más empleados:

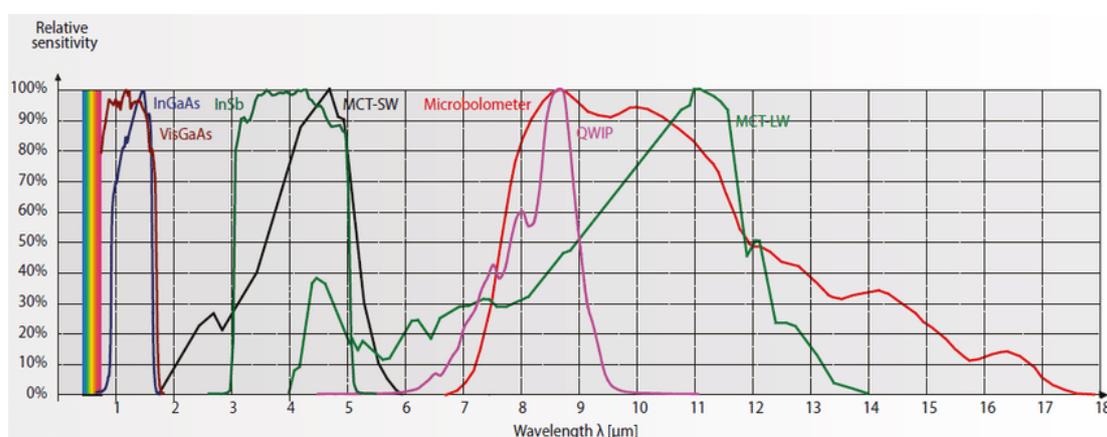


Figura 1. Tipos de detectores según longitudes de onda (FLIR)

2.1 Fotodiodos

Los detectores cuánticos o fotónicos se emplean habitualmente para este propósito. Operan según el principio de interacción directa entre los fotones de la radiación incidente sobre el detector y los niveles de energía de los portadores de carga eléctrica (charge-carriers) dentro del material detector. La energía que incide en el fotodiodo del elemento detector, un semiconductor, modifica la corriente que ya atraviesa al mismo y que es debida a su estado de polarización. La energía supone por tanto un aporte extra de corriente, el cual es proporcional a la radiación recibida. Esta corriente extra puede considerarse como un número determinado de portadores de carga generados a lo largo del tiempo de integración, que generarán un voltaje de salida al final de dicho tiempo y posteriormente se conmutará en la electrónica del elemento sensor para que la señal pueda ser leída por la adquisición analógico/digital. Son capaces de una respuesta muy rápida (menos de un μs). En la región puramente térmica del espectro (8 – 14 μm) se emplean como semiconductores aleaciones tales como mercurio cadmio telurio ($\text{Hg}_{0.2}\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$) o MCT, que puede operarse en modo fotoconductor hasta los 15 μm ,

cubriendo adecuadamente la región infrarroja térmica del espectro. Otros detectores comunes son mercurio germanio (mercury-doped germanium / Ge : Hg) en la región de 3 a 14 μm o indio antimonio (InSb) de 3 a 5 μm .

Es deseable enfriar todo el detector, preferiblemente con nitrógeno líquido a 77K mediante un dewar y un dedo frío, lo que implica una serie de limitaciones operacionales para la mayoría de las plataformas en las que podría instalarse un sensor con esta tecnología.

Hay que tener en cuenta que el cristal es opaco a longitudes de onda mayores a 2 μm , por lo que se deben usar otros materiales para la construcción de lentes y otros elementos ópticos.

2.2 Micro bolómetros

El bolómetro es un dispositivo sencillo que consiste esencialmente en un material cuya resistencia varía con la temperatura. Operan de acuerdo a principios no cuánticos, lo que quiere decir que responden a la energía radiante de un modo que causa un cambio en el estado del material (efecto bolométrico). El efecto de la radiación incidente en la región infrarroja térmica causa una subida de temperatura que puede ser detectada. Los elementos detectores pueden ser tiras de platino, cuya resistencia aumenta con la temperatura o termistores (dispositivos semiconductores construidos normalmente de mezclas de óxidos de metales) en los que la resistencia disminuye con la temperatura, como resultado del aumento en la densidad de portadores de carga. De manera general no requieren enfriamiento lo que permite diseños más compactos y económicos. Generan una curva de respuesta ancha y bastante plana. Proporciona una sensibilidad relativa mayor al 50% entre 7,5 y 12 μm .

Su principal desventaja es un largo tiempo de respuesta, típicamente 10 -15 ms. Cuando se combina un largo tiempo de integración con resoluciones espaciales elevadas en una plataforma móvil (UAS) es importante considerar la proporción de smear causada por el movimiento de avance durante el tiempo de integración del sensor. Esto reduce la resolución espacial del sistema (p.e. un UAV a una velocidad de 50 nudos y un pixel de 15 cm sufrirá un smear del 250% durante los 15 ms de tiempo de integración LWIR – la plataforma se desplazará 38 cm mientras está la apertura abierta)

Todos los sensores requieren algún tipo de calibración si su objetivo es proporcionar medidas precisas. Los microbolómetros tienen un gran número de cualidades atractivas, sin embargo sufren de deriva térmica y de falta de uniformidad a través del plano focal y, en general, han demostrado que la calibración es en cierto modo problemática, especialmente en sistemas donde el peso, tamaño y potencia son limitados.

2.3 Termopilas

Consiste en una serie de termopares. Cada uno de ellos usa el efecto Seebeck (termoeléctrico). Se genera una diferencia de potencial a lo largo de una pareja de uniones entre metales diferentes cuando las uniones se encuentran a distintas temperaturas. Como el bolómetro, la termopila tiene un tiempo de respuesta largo (~10 ms) y además no es particularmente sensible. Es mecánicamente delicado, pero responde bien a longitudes de onda hasta 30 μm .

2.4 Dispositivos pyroeléctricos

Es, en esencia, un cristal que soporta una redistribución de su carga interna como resultado de un cambio en su temperatura. La separación de la carga ocurre en la superficie del cristal, resultando en una diferencia de potencial que puede ser amplificada y detectada. Esto se realiza normalmente mediante el “corte” de la radiación incidente a alrededor de 1kHz y midiendo el componente de la señal de salida que alterna a la frecuencia de corte. La gran ventaja de los detectores piroelectricos es que tienen una rápida respuesta (hasta 1 ns en algunos casos) a los cambios de temperatura y además son sensibles a longitudes de onda hasta alrededor de 70 μm .

3. Plataformas

En la historia de la teledetección existen numerosos ejemplos de plataformas, tanto espaciales como aeroportadas, que han servido de soporte para instrumentos y sensores térmicos. A continuación se detallan algunos de ellos con sus especificaciones más relevantes.

El AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) es un escaner de cinco canales de banda ancha en las regiones visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético instalado en los satélites medioambientales polares (POES) de la NOAA. Los más modernos cuentan con dos canales térmicos en 10,3 – 11,3 μm y 11,5 – 12,5 μm .

Los satélites TERRA y AQUA portan el espectroradiómetro MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) que proporciona 36 bandas en un rango desde 0,4 μm hasta 14,4 μm . Para la adquisición de las imágenes se vale de un espejo giratorio de



doble cara con un FOV de ± 55 grados. Las 20 bandas infrarrojas en dos planos focales (HgCdTe) se enfrían a 83K. Su resolución espacial para estas bandas es de 1000 m.

El Proyecto Landsat de la NASA junto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) dispone en sus dos satélites más recientes (Landsat 8 y 9) del instrumento TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) que registra dos bandas térmicas en 10,60 – 11,19 μm y 11,50 – 12,51 μm con una resolución espacial de 100m. Esta región se encontraba cubierta en los Landsat de 4 a 7 por una sola banda (*Thematic Mapper* - TM y *Enhanced Thematic Mapper* - ETM)

Dentro del Programa Copernicus de la Comisión Europea el satélite Sentinel 3 cuenta con bandas térmicas destinadas a medir con gran precisión y fiabilidad la topografía de la superficie marina y la temperatura en superficie terrestre y marina, de cara a la monitorización medioambiental y climática así como a dar soporte a los sistemas de previsión meteorológica. El instrumento SLSTR embarcado en Sentinel-3 es un radiómetro formador de imagen que dispone de dos bandas térmicas, centradas en 10,8 μm y 12 μm y también cuenta con una banda más en la zona del infrarrojo medio (3,7 μm), que puede utilizarse como una banda térmica adicional durante la noche para mejorar la estimación de la interferencia atmosférica. Los detectores TIR tienen una resolución espacial de 1km en el nadir.

B. OBJETIVO

El objetivo de este documento es describir distintos tipos de sensores en el rango térmico que optimizan su utilidad en zonas agrícola y analizar qué datos pueden proporcionar teniendo en cuenta sus características técnicas y prestaciones.

Se confrontan principalmente sensores de altas capacidades, indicados para grandes plataformas y satélites, frente a instrumentos de reducidas dimensiones y pesos, óptimos para plataformas tipo HAPS.

C. DEFINICIONES

BB: *BlackBody*, cuerpo negro

EO/IR: instrumentación Electro-Óptica en el rango espectral Infra-Rojo

HAPS: *High Altitude Pseudo-Satellites*, Pseudo satélites a gran altitud

LST: *Land Surface Temperature*, temperatura en superficie



MEMS: Microelectromecánico

MIR: *Medium InfraRed*, región del espectro electromagnético entre 3 y 5 micrómetros donde la contribución de energía solar reflejada y la emitida por la superficie terrestre tienen una magnitud equivalente. Es también la región donde se produce el máximo de emisión en fuegos activos.

MODTRAN: MODerate resolution atmospheric TRANsmission - Transmisión atmosférica de resolución moderada, es un programa diseñado para modelar la propagación atmosférica de la radiación electromagnética.

MTF: Función de Transferencia de Modulación

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*, índice espectral proporcional a la cantidad y vigor de la vegetación en una posición dada.

NEDT: *Noise Equivalent Delta Temperature*, temperatura diferencial de ruido equivalente

QWIP: *Quantum Well Infrared Photodetector*, fotodiodos cuánticos

Rango óptico: región del espectro electromagnético entre 0.35 y 15 micrómetros, donde la energía emitida por la superficie terrestre puede ser registrada mediante radiómetros basados en telescopios ópticos (es decir, formados por lentes y/o espejos) y sensores fotovoltaicos o similares.

Rango solar: región del espectro electromagnético entre 0.35 y 5 micrómetros, donde la energía emitida por el sol y reflejada por la superficie terrestre domina la señal detectada mediante instrumentos de teledetección.

Rango térmico: región del espectro electromagnético entre 3 y 15 micrómetros, donde la energía emitida por la superficie terrestre es suficientemente significativa para ser detectada mediante instrumentos de teledetección.

SWIR: *Short Wave InfraRed*, región del espectro electromagnético entre 1.5 y 2.5 micrómetros

TIR: región del espectro electromagnético entre 8 y 15 micrómetros.

VNIR: región del espectro electromagnético entre 0.35 y 1.0 micrómetros

II. CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE SENSORES DE TELEDETECCIÓN TÉRMICA

1. RESOLUCIÓN

1.1 Resolución radiométrica

La resolución radiométrica de un instrumento es el mínimo incremento en radiancia recibida por el sensor (ΔL) que registra el mismo. Esta magnitud viene dada por el valor más limitante entre el ΔL correspondiente a un nivel digital en la imagen de salida, y el ruido instrumental (variabilidad de la señal que no corresponde a información del objeto estudiado y que tiene a su vez múltiples componentes). Las fuentes de ruido instrumental son principalmente electrónicas:

- Lectura: que engloba todas las fuentes de ruido del detector y etapas de preamplificación, y cuyo valor suele ser especificado por el fabricante del detector
- Corriente oscura: la corriente oscura es la salida del detector que se debe a electrones generados térmicamente, y debido al carácter cuántico del proceso presenta una variabilidad igual a la raíz cuadrada de su valor medio
- Digitalización, debido a la incertidumbre en la cuantización de la señal analógica.

Cada una de ellas se caracteriza por la desviación típica que producen en la salida del instrumento, de manera que si asumimos que son normales e independientes (hipótesis muy realista) las combinamos con una media cuadrática para obtener el ruido total.

El ruido así calculado está típicamente en unidades de radiancia (o similares) y por tanto podemos interpretarlo como el cambio en la radiancia recibida por el instrumento que equivale a su ruido: este es el concepto de NEdL (*Noise Equivalent delta radiance*). Cuando realizamos un supuesto de observación (es decir, considerando la iluminación, la superficie observada y las condiciones de observación) podemos traducir ese valor a reflectancia, e interpretar la magnitud correspondiente como el cambio en la reflectancia del objeto que origina una señal equivalente a su ruido: NEdp. En radiómetros térmicos es frecuente convertir el ruido en una variación en temperatura, y especificar así su resolución radiométrica como NEdT.

También está relacionada la calidad radiométrica de la imagen con la Función de Transferencia de Modulación (MTF), que cuantifica la sensibilidad del sensor para detectar el contraste a través de la frecuencia de las variaciones radiométricas de la escena. Para entender la MTF hay que considerar que toda escena puede representarse por un conjunto de ondas en el espacio de frecuencias con diferentes amplitudes, fases y frecuencias. Su propagación a través de la óptica no es perfecta, de manera que las amplitudes se atenúan y el contraste sobre la imagen es menor que en la escena real, aunque las frecuencias de cada onda se mantienen.

1.2 Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione ya que facilita la caracterización de las distintas superficies. Asimismo es conveniente que esas bandas sean lo suficientemente estrechas. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio que puede enmascarar la diferenciación espectral. La elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye el sensor está estrechamente relacionado con los objetivos de su diseño.

Los sensores térmicos compactos, basados en microbolómetros sin refrigerar, suelen contar con una sola banda espectral ancha, a diferencia de los escáneres de altas prestaciones que son multiespectrales con canales más estrechos.

1.3 Resolución espacial

La resolución espacial de una imagen representa el objeto más pequeño que puede ser distinguido en ella, y es de vital importancia para su interpretación, ya que marca el nivel de detalle que ofrece la imagen. En general, para cuantificarla se suele utilizar la proyección del campo de visión instantáneo o IFOV sobre el terreno, que se denomina Ground Instantaneous Field Of View (GIFOV). Este determina el área del terreno observada por el sensor en cada momento, que representa el tamaño de la mínima unidad de información en una imagen, denominado comúnmente pixel. El GIFOV varía con el ángulo de observación respecto al nadir (θ), siendo mayor en los extremos del campo de visión. Así, bajo la plataforma el pixel es cuadrado, adquiriendo forma rectangular en los extremos, siendo la relación entre el IFOV y el GIFOV la siguiente:

$$GIFOV_x = 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{IFOV}{2}\right) \sec^2(\theta) \approx H \cdot IFOV \cdot \sec^2(\theta)$$

$$GIFOV_y = 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{IFOV}{2}\right) \sec(\theta) \approx H \cdot IFOV \cdot \sec(\theta)$$

Donde $GIFOV_x$ es su valor en la dirección transversal al avance de la plataforma (*across-track*) y $GIFOV_y$ en la dirección de avance (*along-track*). En instrumentos con campo de visión (FOV) pequeño se puede despreciar el efecto de θ sobre el tamaño del píxel, pero en sensores con un FOV grande es importante considerarlo, siendo mucho más importante en TD aeroportada que en TD espacial. El caso del HAPS se encuentra en un punto medio entre el aeroportado y el espacial, pero deberá tenerse en cuenta si se quiere obtener una solución adecuada.

El GIFOV no es una función cuadrada uniforme, sino más parecida a una función gaussiana tridimensional, con mayor degradación en los bordes, debido a factores como la difracción del sistema óptico y la limitación del detector, entre otros. Por tanto, el GIFOV no basta para cuantificar la resolución espacial, ya que no asegura la distinción de todos los objetos superiores a este, aunque sí valdría como primera aproximación. También influye su contraste con el fondo, determinado por la Función de Transferencia de Modulación (MTF), que cuantifica la sensibilidad del sensor para detectar el contraste. Una medida de la reducción del contraste es el cociente entre la modulación (cociente entre la amplitud y la media) en la escena real y en la imagen, que proporciona la MTF del sistema óptico para cada frecuencia, importante para la observación de fenómenos con discontinuidades en radiancia.

Una de las principales fuentes de error geométrico es la precisión del Modelo Digital del Terreno (MDT) aplicado. También influye la incertidumbre de los parámetros de orientación externa (posición y orientación del sensor en el momento de adquisición de la imagen), en la que intervienen las características técnicas del sistema de posicionamiento global (GPS) y de la unidad de medida inercial (IMU).

Por otro lado, la evaluación de la estabilidad de parámetros geométricos, como el GSD (Ground Sampling Distance) y el swath (cobertura), también proporcionan información sobre la calidad geométrica. El GSD representa la distancia entre píxeles adyacentes y no es equivalente al GIFOV, ya que en general el área de terreno registrada por 2 píxeles consecutivos se solapa. Por otra parte, el swath o proyección del FOV sobre el terreno, representa la anchura de la franja de terreno cubierta por el sensor.

2. EXACTITUD (CALIBRACIÓN)

Disponer de un sistema de calibración en vuelo proporciona datos de mayor precisión y exactitud. Una de las grandes ventajas de un sensor térmico de altas prestaciones es la calibración mediante cuerpos negros como fuentes de referencia internas. Se pueden incorporar 2 cuerpos negros como fuentes de radiación colocados de tal forma que son registrados durante cada escaneo del sensor. La temperatura de dichas fuentes es controlada de manera precisa y se fija según las condiciones de la escena sobre el terreno, de manera que uno de ellos tiene una temperatura más “fría” que la escena (BB1) y el otro más “caliente” (BB2). En cada vuelta del espejo giratorio la secuencia es la siguiente: registro del BB1 (a menor temperatura), escaneo del terreno bajo la plataforma y registro de la referencia BB2 (mayor temperatura). Esto se repite para cada línea. El resultado es que los dos platos de temperatura se adquieren junto con los datos imagen. Esto proporciona una referencia continuamente actualizada a través de la cual los valores de salida del escáner pueden ser trasladados a temperatura radiante absoluta. Este procedimiento de calibración interna proporciona una precisión adecuada para la mayoría de aplicaciones aeroportadas con diferencias menores a 0,3°C entre la temperatura real y la obtenida. Hay que tener en cuenta de todas maneras que no se tiene en cuenta los efectos atmosféricos en esta calibración.

En la región térmica el ruido se da habitualmente en unidades de temperatura. Por medio de datos obtenidos de fuentes de emitancia (fuentes de referencia a una temperatura conocida) los valores de NEDT pueden ser calculados para cada banda del espectrómetro mediante la expresión:

$$NE\Delta T = \sigma_{BB} \cdot \left(\frac{T_{BB2} - T_{BB1}}{DN_{BB2} - DN_{BB1}} \right)$$
$$\sigma_{BlackBody} = \sigma_{BB} = \left(\frac{\sigma_{BB1} + \sigma_{BB2}}{2} \right)$$

$\sigma_{BlackBody}$ es la media de la desviación estándar de los números digitales registrados cuando el sensor apunta hacia los cuerpos negros usados como referencias internas.

En laboratorio para poder caracterizar un radiómetro infrarrojo en la región térmica es necesario un cuerpo negro externo como fuente de calibración. Existen 3 factores principales a considerar cuando se elige un cuerpo negro:

- Tipo: existen básicamente dos, de placa caliente (*hot plate*) o de cavidad. Según de cual se dispone se deben diseñar los procedimientos adecuados para nuestro instrumento. Las prestaciones globales del cuerpo negro vienen definidas por esta elección.
- Área del blanco/objetivo: nos indica el tamaño del área del BB que podemos cubrir con nuestro sensor. Debe tenerse en cuenta el FOV del instrumento y la



COMPETITIVIDAD

distancia de toma de datos, ya que no se deben medir las superficies de alrededor (a distintas temperaturas). Normalmente se suele colocar a una distancia relativamente cercana (entre 0,2 – 1 m dependiendo del tamaño del área)

- Emisividad: cuanto mayor sea este valor más se aproxima la calibración al caso ideal. Con valores bajos de emisividad del BB, el ancho de banda de los canales entra en consideración, así como la posible radiancia térmica del entorno reflejada hacia el sensor a calibrar por el BB. El caso ideal sería de una emisividad igual a 1.

Cuando realizamos una calibración utilizando como fuente un cuerpo negro, conviene seguir una serie de reglas:

- El espectrómetro debe colocarse apuntando perpendicularmente al área objetivo del cuerpo negro. Si se apunta con ángulo la energía IR reflejada podría afectar la precisión de la calibración.
- El área cubierta por el FOV del espectrómetro a una distancia determinada para la calibración debería ser menor que el área total del BB. Siempre apuntar al centro.
- No se debe acercarse en exceso el espectrómetro al área objetivo del BB, especialmente a altas temperaturas. El calor radiado del mismo puede afectar negativamente a la precisión de la calibración e incluso dañar el instrumento.
- Cuando se cambia la temperatura fijada en el BB, es importante asegurarse que la unidad está completamente estabilizada en la nueva temperatura antes de realizar cualquier medida. Normalmente se necesita menos tiempo al aumentar la T^a que al disminuirla.

4. CARACTERÍSTICAS RELEVANTES PARA EL PROCESO DE LOS DATOS

La generación de productos de valor para el usuario a partir de datos de teledetección requiere procesos sobre los datos. Los más habituales son la corrección geométrica o georreferenciación y la corrección atmosférica y conversión a magnitudes de interés (reflectancia, temperatura).

Para que estos procesos se realicen de manera eficiente, son convenientes algunas características en los propios sensores o equipos auxiliares específicos. En este apartado se discuten esas características.

Los perfiles atmosféricos son clave para corregir efectos de la atmósfera en datos infrarrojos térmicos y poder obtener una estimación de la temperatura en superficie (LST). El método basado en la ecuación de transferencia radiativa (ecuación 1) es uno de los más aplicados para la corrección atmosférica y la obtención de la LST. Consiste en la inversión directa de la ecuación para un canal particular y puede proporcionar de manera precisa la temperatura en superficie. Se requiere también de los perfiles atmosféricos como entrada. Toda esta información se introduce en un modelo de transferencia radiativa para calcular los tres parámetros atmosféricos requeridos para la corrección: transmitancia atmosférica, radiancia atmosférica ascendente y radiancia atmosférica descendente. Para estimar estos tres parámetros se puede utilizar MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*) en el espectro TIR. Se introducen como inputs en MODTRAN los perfiles verticales de presión, temperatura del aire y humedad relativa que pueden ser obtenidos mediante sondas situadas en el momento de la adquisición de los datos de teledetección.

$$L_{\lambda}^{sen} = [\varepsilon_{\lambda} \cdot B_{\lambda}(T_S) + (1 - \varepsilon_{\lambda})L_{\lambda}^{\downarrow}] \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{\uparrow} \quad (1)$$

Siendo,

L_{λ}^{sen}	<i>Radiancia espectral en el sensor ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)</i>
ε_{λ}	<i>Emisividad superficial terrestre</i>
B_{λ}	<i>Radiancia del cuerpo negro ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)</i>
T_S	<i>Temperatura superficial terrestre (K)</i>
L_{λ}^{\downarrow} & L_{λ}^{\uparrow}	<i>Radiancia atm descendente & ascendente ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)</i>
τ_{λ}	<i>Transmitancia atmosférica</i>

Frecuentemente los sensores evitan la región espectral en torno a las 9 micras en misiones por encima de la capa de ozono, que abarca desde los 15 a los 40 kilómetros de altura. Este es el caso por ejemplo de Landsat TIRS y Sentinel-3 SLSTR. La absorción provocada por el ozono atmosférico se encuentra alrededor de 9,6 μm , como muestra la siguiente figura 2. En la figura se emplea MODTRAN para propagar la emisión térmica de la superficie terrestre, a una temperatura de 300 K, hasta una altitud de 20 km donde se encontrará con los sensores embarcados en los HAPS. Se puede comprobar claramente el efecto de la absorción del ozono entre las 9,4 μm y las 10 μm .

En el caso particular de los HAPS, orbitando a 20 km, este factor debe tenerse en cuenta durante el tratamiento de los datos pero el efecto de dicho gas no es tan crítico como en las misiones espaciales.

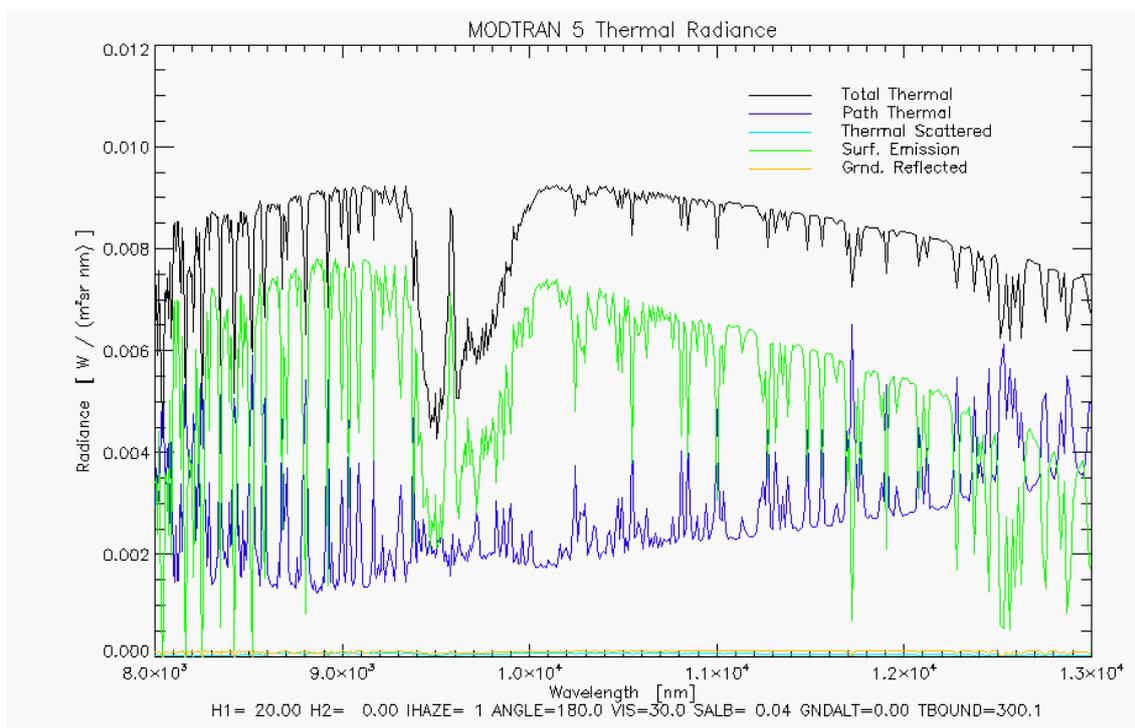


Figura 2. Simulación del efecto de la absorción del ozono en la región térmica del espectro a 20 km altitud

Las correcciones geométricas de la imagen incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman. En este caso no se pretende modificar los niveles digitales de los mismos sino únicamente su posición, es decir sus coordenadas. El objetivo último es corregir las distorsiones geométricas causadas por el movimiento y actitud de la plataforma durante la adquisición y, adicionalmente dotar a la imagen de coordenadas en un sistema de referencia cartográfico (georreferenciación), de modo que la misma pueda ser integrada y cruzada con cualquier sistema de información geográfica (SIG) de la zona.

La georreferenciación de datos adquiridos por sensores aeroportados puede realizarse mediante técnicas paramétricas o no paramétricas. Estas últimas se valen del establecimiento de puntos de control sobre el terreno en base a los cuales se calcula la función polinómica que define la transformación a aplicar a toda la imagen. No proporciona unos buenos resultados para datos aeroportados, ya que la plataforma está sometida a variaciones de alta frecuencia que afectan tanto a su posición como a su orientación angular. Los métodos paramétricos permiten aplicar la georreferenciación directa gracias a dos sistemas auxiliares integrados en el sensor, o en su defecto en la plataforma, como son el GPS y las unidades de medida inerciales (IMU). Estas

tecnologías permiten obtener una determinación precisa de la posición y orientación del sensor para cada instante de tiempo. Partiendo de los datos proporcionados, los métodos paramétricos plantean ecuaciones que resuelven independientemente la posición de cada pixel y la proyectan sobre el terreno apoyados en un modelo digital de elevaciones.

Cuanto más avanzada sea la IMU, mejores precisiones se logran tras el postproceso (0,05- 3 m en posición; 0,008 grados en alabeo y cabeceo y 0,015 grados en rumbo son valores típicos obtenidos gracias a una IMU de altas prestaciones). Aún así las más indicadas para sensores de dimensiones reducidas, integrados en plataformas no tripuladas de tipo HAPS, son las que hacen uso de tecnología MEMS (microelectromecánicos) que reducen significativamente el peso y tamaño de la IMU con una precisión aceptable para aplicaciones como agricultura pero considerablemente menor a las ofrecidas por unidades dotadas de giróscopos laser.

III. EJEMPLOS DE DIFERENTES SENSORES

1. SENSOR AHS (Figura 3)

Los sensores de altas prestaciones están basados en principios físicos cuánticos y permiten medidas con elevada precisión tanto de radiancia como de temperatura. Estas medidas de radiancia son importantes por una serie de factores:

- La relación entre las bandas espectrales que se están empleando es mucho más fácil de establecer al trabajar en unidades de radiancia.
- Para los sensores la radiancia medida se comporta de manera lineal con respecto a la energía incidente. Esto no ocurre del mismo modo con la temperatura y las cuentas digitales en bruto.
- La comparación entre diferentes objetos en términos radiométricos tiene menos incertidumbre (teniendo en cuenta, eso si, la corrección atmosférica)
- Se puede convertir la firma radiométrica, de radiancia a temperatura de un cuerpo negro con una serie de datos auxiliares.

El sensor AHS (*Airborne Hyperspectral System*) es un *line-scanner* de barrido mecánico que comparte conceptos de diseño con sensores espaciales clásicos como el MODIS embarcado en los satélites TERRA y AQUA o aeroportados como el MIVIS, ATM, o MAS. La adquisición se realiza mediante un espejo giratorio *across-track* que barre la superficie terrestre en estudio, pixel a pixel, a medida que la plataforma realiza su

avance. Fue desarrollado por ArgonST (USA) y es operado por el Área de Sistemas de Teledetección del INTA. Consta de 80 bandas espectrales.

Sus especificaciones técnicas más importantes son las siguientes:

- Óptica (FOV / IFOV / ángulo muestreo):
90 DEGREES - 1.571 RAD / 2.5 MRAD / 2.09 MRAD
- Revoluciones por segundo del Espejo giratorio (*scan rate*):
6.25, 12.5, 18.7, 25, 31.2 AND 35 RPS (Hz)
- Píxeles espaciales:
750 PX
- Digitalización:
12 BITS
- Ganancias electrónicas:
x 0.23, 0.35, 0.50, 0.70, 1.00, 1.50, 2.50, 3.50, 5.00, 7.00, 10.00
- Dos fuentes de referencia térmica escaneadas antes y después de cada línea
BB1 & BB2



Figura 3 . AHS instalado en la ventana inferior delantera del avión, junto con sus módulos de control y registro en rack vertical

El AHS es un sistema operacional desde el año 2004 y ha participado en numerosas campañas a lo largo de toda Europa. A continuación se especifican las distintas bandas y las longitudes de onda que abarca el sensor.

PUERTO ÓPTICO	TIPO DE DETECTOR	NÚMERO DE BANDAS	RANGO ESPECTRAL	ANCHO DE BANDA $\Delta\lambda$ (FWHM)	$\lambda/\Delta\lambda$
PUERTO 1 VNIR	Si Sin enfriar	20	429-1016 nm	27-30 nm	≈ 26
PUERTO 2A SWIR	InGaAs Enfriado TE	1	1548-1633 nm	85 nm	≈ 19
PUERTO 2 SWIR	InSb Enfriado LN2	42	1915-2559 nm	16-18nm	≈ 130
PUERTO 3 MWIR	InSb Enfriado LN2	7	3033-5407 nm	197-384 nm	≈ 13
PUERTO 4 LWIR	HgCdTe Enfriado LN2	10	8081-13214 nm	412-566 nm	≈ 21

Tabla 1. Configuración espectral AHS

Se obtienen en laboratorio las curvas normalizadas (figura 4) de cada una de las bandas espectrales mediante el empleo de un monocromador con una fuente térmica. De este modo se comprueba la estabilidad espectral y su coherencia.

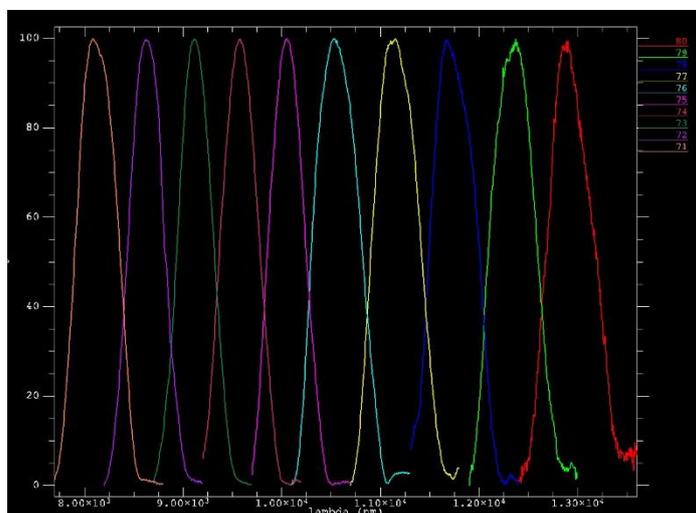


Figura 4. Ejemplo de las curvas normalizadas para los 10 canales térmicos del AHS-PUERTO-4 (LWIR): Rango espectral [8081, 13214] nm / Anchura 412-566 nm

La resolución espacial del AHS (Ground Sample Distance $_GSD_{nadir}$) va ligada a la plataforma sobre la que va instalado. En este caso es un Aviocar C-212 propiedad del INTA. Se trata de una aeronave bimotor de ala alta diseñada inicialmente para

transporte y que ofrece unas prestaciones ideales para la operación de sensores de observación de la Tierra, al contar con dos ventanas en la panza del fuselaje aptas para la instalación de una gran variedad de instrumentos. Dichas ventanas no disponen de ningún cristal ni elemento interpuesto que pueda alterar la energía recogida por los sensores, es decir, las ópticas de los mismos van al aire. Si se dispone de una trampilla corredera para proteger dicha óptica en el momento del despegue, rodadura o aterrizaje, así como para prevenir la condensación en los cambios de altitud, ya que solo se abre cuando se alcanza la altura indicada para la adquisición de datos. Los valores de resolución espacial pueden obtenerse del siguiente modo (siendo GS la velocidad sobre el terreno y H_{AGL} la altitud sobre el mismo):

$$GSD_{alongtrack} = \frac{GS}{Scanspeed}$$

$$GSD_{acrosstrack} = 2 \cdot H_{AGL} \cdot \tan\left(\frac{IFOV}{2}\right)$$

$$SWATH = 2 \cdot H_{AGL} \cdot \tan\left(\frac{FOV}{2}\right)$$

A continuación, en la tabla 2, se muestran una serie de resoluciones espaciales obtenidas con el sensor sensor AHS para distintas configuraciones de vuelo en las que la velocidad de la plataforma se mantiene constante y varía la altitud y con ella el régimen de giro del espejo.

CONFIGURACIÓN DE VUELO (GS -> 140 nudos - 72m/s)					
AGL(FT - pies)	3223	3616	4513	6033	9026
Scan-Speed (scans/second)	35	31.2	25	18.7	12.5
RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)					
Tamaño pixel (@nadir)	2.46	2.76	3.44	4.60	6.88
GSD_{across-track} (@nadir)	2.07	2.32	2.89	3.86	5.78
GSD_{along-track} (@nadir)	2.06	2.31	2.88	3.85	5.76
Swath	1965	2204	2751	3678	5502

Tabla 2. Distintas resoluciones espaciales AHS

Una de las grandes ventajas de un sensor térmico de altas prestaciones como el AHS es la calibración mediante cuerpos negros como fuentes de referencia internas. Incorpora 2 cuerpos negros como fuentes de radiación colocados de tal forma que son registrados durante cada escaneo.

2. SENSOR ZENMUSE XT2 (figura 5)

Sensor de tipo campo completo o matricial (FPA). Todos los elementos detectores están dispuestos en el plano focal y presentan la particularidad de que adquieren la imagen digital en un solo instante. La geometría de dichas imágenes corresponde al caso de la proyección central. Se toma una instantánea de la superficie, que se proyecta a través de las ópticas de la misma sobre una matriz bidimensional de detectores situada en el plano focal del sensor. Una de las mayores ventajas es su excelente fidelidad geométrica que se obtiene gracias a obtener la imagen completa de una vez. Esto tiene el requisito de que el sistema óptico debe tener una respuesta excelente en un amplio campo de visión (FOV) para no introducir grandes distorsiones.

El área adquirida sobre la superficie por una cámara de campo completo es aquella porción de terreno cubierta por la proyección del array de detectores. Cuanto más relieve tenga dicha superficie mayores serán las distorsiones geométricas. Para adquirir largas franjas de terreno en la dirección along track, debemos crear dicha franja tomando sucesivas imágenes de la superficie. Dichas imágenes se solaparán ligeramente en esta dirección para tener en cuenta el hecho de que la topografía de la superficie puede distorsionar la proyección de la matriz de detectores sobre la superficie. Para evitar el smear (distorsión causada por el movimiento) de la imagen a través del plano focal se necesita congelar la imagen en el array de detectores mientras la plataforma se desplaza. Algunos satélites por ejemplo emplean un espejo direccional que se desplaza sincronizadamente con la plataforma para evitar este efecto, pero este no es el caso de sensores aeroportados.

La XT2 es un sensor termográfico basado en microbolómetros VOx (óxido de vanadio) no refrigerado de una sola banda 7.5-13.5 μm .



Figura 5. Cámara Zenmuse XT2

Comparación de las prestaciones más reseñables entre el AHS y el sensor XT2

	XT2	AHS
DETECTOR	Microbolómetro VOx no refrigerado	QWIP
NÚMERO DE BANDAS	Detector monocanal de banda ancha	10 canales
RANGO ESPECTRAL	7,5-13,5 μm	8,081-13,214 μm
FOV	45,46°× 37,02°	90°
iFOV	1,308 mrad	2,5 mrad
NETΔ	<50 mk @ f/1.0	< 0,2°C

Tabla 3. Prestaciones AHS vs XT2

3. SENSOR HyTES

El sensor hiperespectral térmico (HyTES) es un espectrómetro aeroportado formador de imagen con 256 canales entre 7,5 y 12 μm y 512 pixels accross-track. Se ha desarrollado como soporte la misión HypsIRI (Hyperspectral Infrared Imager. HypsIRI incluye 2 instrumentos instalados en un satélite de órbita terrestre baja (LEO), un espectrómetro para la región visible e infrarrojo de onda corta (VSWIR) y un sensor térmico hiperespectral (TIR) ambos con una resolución espacial de 60 m en el nadir. HyTES

proporciona datos con mucha mayor resolución espectral y espacial para simular los datos de satélite y complementarlos. Los primeros vuelos del HyTES fueron en 2012, e incorpora un espectrómetro Dyson, un slit recto y largo, una rejilla de difracción curvada y fotodiodos cuánticos (QWIP)

4. OTROS SENSORES TÉRMICOS AEROPORTADOS

La NASA ha financiado proyectos como FiRE (UAV First Response Experiment), FiREll, WRAP (Wildfire Research and Applications Partnership, <http://geo.arc.nasa.gov/sge/WRAP/>) donde entre sus objetivos principales está el proporcionar el desarrollo tecnológico y realizar demostraciones para probar y extender el uso de vehículos aéreos no tripulados que permitan adquirir información crítica de catástrofes en tiempo real para utilizarla en los procesos de decisión (Ambrosia, 2010). El sistema AMS (Autonomous Modular Scanner – Wildfire Sensor) es un escáner de barrido mecánico con 12 bandas espectrales (VNIR, SWIR, MIR y TIR) desarrollado por la NASA que lleva funcionando desde el 2006 tanto en plataformas tripuladas como no tripuladas (Ikhana UAS), proporciona datos tanto para entidades responsables de la gestión en la lucha contra los incendios forestales como para la comunidad científica. Ha sido utilizado en aplicaciones de calibración/validación adquiriendo datos simultáneamente con MODIS sobre fuegos forestales aportando una alta resolución espacial, temporal y radiométrica en la medida de las propiedades del. El AMS-Wildfire comparte tecnología con el sensor AHS (Airborne Hyperspectral System). Como es un comportamiento radiométrico bilineal en sus 17 canales MIR y TIR (cambio de linealidad para objetos con temperatura superior 80°C), también incorpora dos filtros seleccionables que atenúan la señal para estos canales. El objeto de estos recursos es aumentar el rango dinámico de los canales térmicos.

El sensor Airborne Wide Area Imager (WAI) para la detección y mapeo de fuegos forestales comparte filosofía con los anteriores, desarrollado por Xiomax Technologies bajo un contrato con la NASA (SBI-Small Business Innovative Research Project). El instrumento tiene 5 bandas espectrales (Green, Red, NIR, MIR y TIR), la formación de la imagen se produce mediante la técnica de barrido “step-stare” con un IFOV de 330 μ rad y un FOV programable de hasta 120°. Entre sus objetivos esta ser operado en forma remota o autónoma y ser instalado en un avión ligero o UAV.

IV. ANALISIS DEL CASO DE HAPS TENIENDO EN CUENTA LOS REQUISITOS

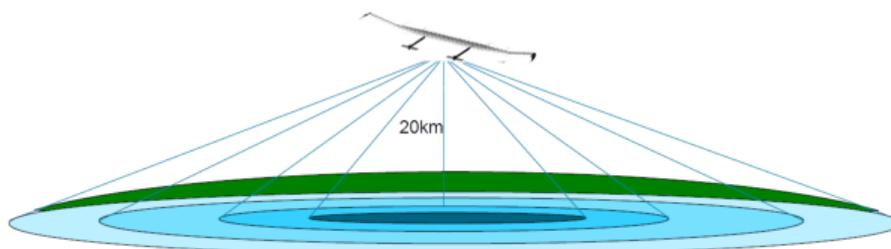


Figura 6. Simulación HAPS

Se toma como modelo una plataforma HAPS que orbita a 20 km de altitud (figura 6) formando pasadas en hipódromo y capaz de mantener la velocidad constante con respecto al terreno. Cuenta además con control de alabeo para que así el tamaño del pixel sea el requerido y con distorsiones mínimas. Se integra un sistema GPS/IMU de tipo MEMS para georreferenciación y corrección de actitud de la plataforma

Dicha plataforma se puede instrumentar con una cámara Zenmuse XT2 de DJI similar a la empleada por la Universidad de Cordoba en sus estudios de cultivos. La resolución del pixel se mide en dos direcciones: en la dirección de vuelo y ortogonal a la dirección de vuelo. En el caso de la cámara Zenmuse XT2 se trata de un sensor de tipo staring con un FPA de 640 x 512.

Para caracterizar el array de detectores son necesarios el tamaño del FPA (D horizontal y D Vertical), el tamaño individual de cada detector, el número de pixels, y la distancia de centro a centro (*detector pitch*). Un dato también fundamental es la distancia focal.

$$EFL = \frac{N \cdot L_{pixel}}{2 \tan\left(\frac{FOV}{2}\right)}$$

Siendo,

EFL Longitud Focal Efectiva

N Número de pixels

L_{pixel} Longitud pixel

FOV Field of View

Las especificaciones de la XT2 nos indican que en su dimensión horizontal tiene 640 pixels y su pixel pitch es de 17 μm . Teniendo en cuenta que la EFL es de 13 mm obtendremos un FOV de 45,46° en su dimensión perpendicular a la dirección de vuelo. En la dirección de vuelo y dado que tiene 512 pixels su FOV será de 37,02°

El tamaño de pixel sobre el terreno será el siguiente según la ecuación;

$$D_C = \frac{2 \tan\left(\frac{FOV}{2}\right)}{N} \cdot H$$

Siendo,

D_C *Tamaño pixel sobre el terreno*

H *Altura de vuelo sobre el terreno*

Dado que el HAPS está previsto que vuele a 20 km sobre el terreno (AGL), de este modo se obtendrá un pixel con las siguientes dimensiones de pixel sobre el terreno 26,15 x 26,15 m. La combinación HAPS - Zenmuse XT2 nos ofrece una resolución espacial muy limitada para la identificación de temperaturas en ejemplares de cultivos leñosos.

El tipo de vuelo habitual de una campaña de teledetección consiste en volar a velocidad constante y altura fija sobre un eje de pasada rectilíneo; es muy importante que el vuelo sea muy estable pues cualquier cambio en la actitud se verá reflejado en las imágenes registradas. Se establecerá un patrón de vuelo atendiendo a la cobertura espacial marcada por los sensores y se realizará con el objetivo de cubrir el mismo, diseñado para obtener datos sobre una zona de interés. Es importante que exista solape entre las pasadas adyacentes.

En el caso de un patrón de vuelos en hipódromo con el sensor apuntando al nadir la adquisición de los datos debe tener en cuenta que en los virajes de la plataforma el apuntamiento del sensor no será el adecuado.

Un procedimiento para la ejecución de un vuelo de adquisición de datos TIR:

1. Especificación de los requisitos por parte del usuario final de los datos: resolución espacial, radiométrica, espectral y temporal.
2. Definición de la configuración instrumental por parte del propietario del instrumento y del plan de vuelo que satisface esos requisitos. Esta definición se debe realizar en coordinación con los responsables de la plataforma HAPS, que serán los encargados de diseñar los patrones de pasada según objetivos.

 **COMPETITIVIDAD**

3. Ejecución del periodo de vuelos para la toma de datos.
4. Proceso y análisis de los datos adquiridos, tanto las imágenes como los datos auxiliares. Evaluación de la calidad y grado de cumplimiento de los objetivos.
5. Entrega al usuario de los productos imagen finales y la documentación auxiliar necesaria.

Es recomendable que el sensor se base en una operación autónoma haciendo uso de los propios datos GNSS para verificar el rumbo y cobertura de las pasadas planificado. Una plataforma tipo HAPS está concebida para orbitar durante largos periodos de tiempo sin tener la necesidad de tomar tierra. Esto quiere decir que todos los datos que obtenga deben ser transmitidos a tierra via data link. Por este motivo el volumen de datos debe ser lo menos pesado posible en términos de memoria. El sistema de enlace con la estación terrestre de control puede ser el del propio HAPS; en caso contrario se hace necesario instalar uno dedicado que añadirá un peso extra a la carga de pago de la plataforma y debe ser tenido en cuenta. Existe como opción alternativa el almacenamiento de datos en vuelo y la descarga de los mismos en el momento que la plataforma tome tierra, pero de este modo se pierde la ventaja competitiva de los HAPS.

V. CONCLUSIONES

Es fundamental definir los requisitos operacionales para la plataforma y con ello nos referimos a parámetros tales como altura de vuelo, velocidad, tipo de maniobra, etc. La configuración de vuelo de adquisición varía en función de las necesidades resolutivas de los usuarios demandantes de los datos. Si las alturas sobre el terreno se encuentran alrededor de los 65600FT (20 km) las resoluciones (espacial, radiométrica y en menor medida espectral) se ven seriamente comprometidas para según que aplicaciones. En el caso de cultivos leñosos la identificación de cada uno de los ejemplares y su análisis de temperatura requiere de instrumentos de mayores prestaciones que la cámara XT2 y similares.

Las temperaturas operativas de la cámara XT2, según su ficha técnica, son las siguiente:

- Alta ganancia: 640×512: -25° to 135°C
- Baja ganancia : -40° to 550°C

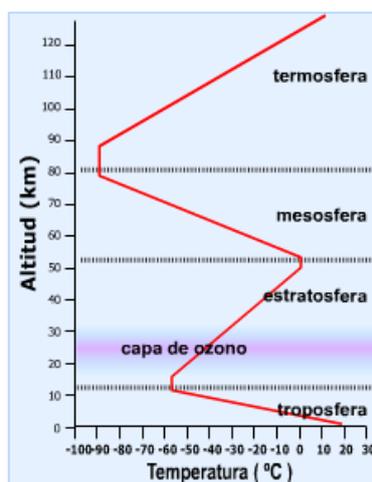


Figura 7. Temperatura según altitud en la atmósfera

La altitud de vuelo de los HAPS son 20 km. La temperatura en esa región de la estratosfera es bastante constante y alrededor de unos -60° C (figura 7); por lo que habría que evaluar si es funcional la cámara XT2 en dicha plataforma. Ya que, incluso para baja ganancia, queda fuera del rango de operación, por lo que habría que valorar instalar la cámara en algún tipo de bahía de la plataforma cuya temperatura pudiese



controlarse, por lo menos para acercarse a los -25°C . Esto sucederá con la mayoría de sensores aeroportados si no son aislados térmicamente en la plataforma.

Son necesarias pruebas operacionales en laboratorio, posiblemente en cámaras ambientales para evaluar el funcionamiento de sensores comerciales de bajas prestaciones antes de su instalación en una plataforma tipo HAPS.

No se encuentran comercialmente cámaras térmicas operacionales a la altitud de vuelo de los HAPS y con resolución adecuada para aplicaciones de agricultura de precisión. Los propios desarrolladores de los HAPS deben tener en cuenta los limitantes requisitos de la aplicación en caso querer incorporar este tipo de sensores.

VI. REFERENCIAS

KIRK J. HAVENS, EDWARD J. SHARP, IN THERMAL IMAGING TECHNIQUES TO SURVEY AND MONITOR ANIMALS IN THE WILD, 2016

ROSELYNE ISHIMWE, K. ABUTALEB, F. AHMED, APPLICATIONS OF THERMAL IMAGING IN AGRICULTURE— A REVIEW, 2014

EDUARDO DE MIGUEL , ALIX FERNÁNDEZ-RENAU , ELENA PRADO ET AL, A REVIEW OF INTA AHS PAF. IN EARSEL EPROCEEDINGS 13, 1/2014

FERNÁNDEZ-RENAU A, J A GÓMEZ & E DE MIGUEL, 2005. THE INTA AHS SYSTEM. IN: SPIE 5978 - SENSORS, SYSTEMS, AND NEXT-GENERATION SATELLITES IX, EDITED BY R MEYNART, S P NEECK & H SHIMODA (SPIE, BRUGES), 8 PP.

DIAZ, L.R.; SANTOS, D.C.; KÄFER, P.S.; ROCHA, N.S.D.; COSTA, S.T.L.D.; KAISER, E.A.; ROLIM, S.B.A. ATMOSPHERIC CORRECTION OF THERMAL INFRARED LANDSAT IMAGES USING HIGH-RESOLUTION VERTICAL PROFILES SIMULATED BY WRF MODEL. ENVIRON. SCI. PROC. 2021, 8, 27.

V. G. AMBROSIA ,S. WEGENER,T. ZAJKOWSKI,D. V. SULLIVAN,S. BUECHEL,F. ENOMOTO,

IKHANA UNMANNED AIRBORNE SYSTEM (UAS) WESTERN STATES FIRE IMAGING MISSIONS: FROM CONCEPT TO REALITY (2010)

