

# ARTÍCULO DE FONDO

# *Exploración Multisensor para la Detección de Anomalías del Terreno y Análisis Espectral En y Bajo Superficie*

Juan Gregorio Rejas  
Mercedes Farjas  
Julián Rejas

## **Resumen**

Se ha contribuido en los últimos años desde distintos organismos y centros de investigación al desarrollo de sistemas multisensor orientados a diversas aplicaciones en el segmento civil con potencialidades en la exploración tridimensional del terreno a efectos de localización de evidencias, restos materiales en o bajo superficie. Dichos diseños permiten realizar una inspección completa en el rango del espectro electromagnético del visible e infrarrojo cercano al infrarrojo térmico, capacitando su instalación en diversas plataformas aéreas y terrestres. El sistema dota e integra dispositivos de navegación y orientación (GNSS/INS) lo que posibilita la georeferenciación directa y precisa de la información obtenida. La propuesta de exploración se realiza mediante un radar laser aéreo (Lídar) para la obtención de nubes de puntos 3D, una estructura inclinable lateralmente con tres cámaras visibles de alta definición orientadas para un apuntamiento multiángulo configurable, radiómetro de ondas milimétricas y una cabeza giroestabilizada con doble cámara multiespectral en el visible e infrarrojo próximo y térmico. La información adquirida sobre diferentes escenarios es explotada de manera automática mediante métodos y algoritmos propios de teledetección y tratamiento de datos. Entre ellos se propone una nueva técnica de detección a partir de espectrometría de imagen de pequeños objetivos infrarrojos basada en la búsqueda de la mejor proyección de valores fuera de rango sobre un fondo térmico. Este método aporta unos resultados altamente correlacionados con diversas entidades lo que posibilita una prospección automática del terreno, identificación de objetivos potenciales y localización de evidencias en investigaciones científicas sobre diferentes escenarios.

**Palabras Clave:** Multisensor, 3D-tridimensional, Detección de Anomalías, Localización Evidencias, Escenario.

## Abstract

In recent years, different organizations and research groups have contributed to the development of multi-sensor systems focused to several applications in the civil segment with great potential in the three-dimensional land exploration in the sense of the evidence location and the detection of the buried or semi-buried material remains. These designs allow us a complete inspection in the range of the electromagnetic spectrum of visible and near-infrared thermal infrared, enabling its installation in aerial or ground platforms. The system provides navigation and guidance devices (GNSS/INS) which enables direct and accurate georeferencing of the information extracted. The exploration proposal is made by an aerial laser radar (Lidar) to obtain 3D point clouds, three visible frame high-resolution cameras oriented for a configurable multi-angle pointing, a millimeter-wave radio-altimeter and a head Gyro-stabilized with double multispectral camera in the visible, near and thermal infrared (VNIR-TIR) spectrum. The information acquired on different scenarios is automatically analyzed by remote sensing methods and algorithms. Among them, we propose a new image spectrometry detection technique based on small infrared target based on the search of the best projection of outliers on a thermal background. This method provides results that are highly correlated with different entities for the detection of potential targets and locate evidences in scientific research in different scenarios.

**Keywords:** Multisensor, 3D three-dimensional, Anomaly Detection, Location Evidence, Scenario.

---

**Juan Gregorio Rejas**, (rejasaj@inta.es) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA.

**Mercedes Farjas**, Universidad Politécnica de Madrid, UPM. Programa de Doctorado en Ingeniería Geográfica.

**Julián Rejas**, Universidad Politécnica de Madrid, UPM. Dpto. de Ingeniería y Morfología del Terreno.

Fecha de Recepción: 31 de julio de 2017, fecha de aprobación: 28 de agosto de 2017.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se ha contribuido en los últimos años a diversos desarrollos multisensor orientados a aplicaciones con potencialidades en la exploración tridimensional del terreno a efectos de localización de evidencias científicas, caracterización de coberturas y restos materiales en o bajo superficie, que permiten una inspección completa en el rango del espectro electromagnético del visible e infrarrojo cercano al infrarrojo térmico, capacitando su instalación en diversas plataformas aéreas y terrestres. Este tipo de sistema está pensado principalmente para que la instrumentación sea instalada en plataformas no tripuladas de tamaño medio, lo que condiciona seriamente el tamaño y su peso, si bien, debido a las limitaciones de operación que presentan estas aeronaves por razones de certificación, su uso es aplicable también desde helicópteros u otras plataformas convencionales. No obstante, todos los componentes del sistema son diseñados en base a su peso y tamaño compatibles con la carga de pago de un UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) medio y plataformas terrestres, de esta forma, es posible aprovechar la experiencia técnica adquirida para su aplicación con menores limitaciones de operación para este tipo de vehículos.

El sistema dota e integra dispositivos de navegación y orientación (GNSS/INS) que posibilitan la georeferenciación directa y precisa de la información obtenida. La exploración se realiza mediante un radar laser aéreo (Lídar) para la obtención de nubes de puntos 3D, una estructura inclinable lateralmente con tres cámaras visibles de alta definición orientadas para un apuntamiento multiángulo configurable, radioaltímetro de ondas milimétricas y una cabeza giroestabilizada con doble cámara multiespectral en el visible e infrarrojo próximo y térmico. El sistema de captación es concebido como una unidad autónoma de fácil enganche mecánico al patín de un Eurocopter 350/355, que no tiene interfaces eléctricas con los sistemas de la plataforma en cuestión. Solo están previstas conexiones con hasta dos unidades de presentación y control (PC portátil / Tablet) operadas desde el control de la plataforma. Es necesario contemplar un enlace de datos para el control de parte de las unidades (Lídar, cámaras fijas, GNSS/INS) de forma remota.

Cameras-visible: Prosilica 2050. (3 units)



LIDAR: LMS240i.



Inertial Navigator  
System: MTI-G-  
700. (2 Units)



Two axis Gimbal System OTUS-L170HD

**Figura 1.** Ejemplo de configuración de carga de pago en un sistema multisensor de exploración del terreno: cámaras fijas (sup-izda), Lidar (sup-dcha.), cámara Gimball multispectral (inf-izda.) y sistema de posicionamiento y orientación GPS/INS (inf-dcha.)

Una de las técnicas de detección y localización aplicables a partir de datos multisensor es la denominada Detección de Anomalías, en inglés *Anomaly Detection* (AD). La detección de anomalías espectrales tiene por objeto extraer de manera automática píxeles de imagen que presenten una respuesta significativamente diferente respecto su entorno. Dado que esta técnica asume que no existe conocimiento previo sobre el objetivo o las características estadísticas de los datos, la única opción disponible es la búsqueda de objetos que se diferencien del fondo. En general, la detección de anomalías se aplica cuando los modelos disponibles no son ni objetivos ni confiables, cuando los datos de *verdad terreno* no están disponibles para la calibración de firmas espectrales, o cuando se sabe poco sobre el tamaño y forma de los objetivos a detectar.

Técnicas para calcular y detectar respuestas anómalas se han estudiado e implementado desde hace varias décadas en imágenes procedentes de diferentes tipos de sensores (Malpica *et al.*, 2008; Nasrabadi *et al.*, 2008). Distintos métodos se han desarrollado en los últimos años que han supuesto la mejora en el establecimiento de relaciones entre la dimensionalidad de los datos y la optimización

de los procesos de búsqueda (Stein et al., 2002), así como la diferenciación subpíxel de la mezcla espectral y su implicación en las respuestas anómalas (Bar et al., 2010; Harsanyi, 1993; Rojas et al. 2014).

Se presenta en este trabajo un método de localización denominado Detector de Anomalías de Fondo Térmico (DAFT) que supone un enfoque novedoso y permite discriminar anomalías respecto fondos segmentados en diferentes grupos de longitudes de onda del espectro, explotando la potencialidad de separación entre el espectro electromagnético reflectivo y emisor, posibilitando la localización de evidencias en o bajo superficie. Se ha estudiado así mismo, la eficiencia de los principales algoritmos de detección de anomalías, contrastando los resultados del algoritmo RX (Reed y Xiaoli, 1990) adoptado como estándar por la comunidad científica, con el método DAFT, con el método UTD (*Uniform Targets Detector*), método SSRX (*Subspace RX*) y método basado en proyecciones de subespacios de imagen OSPRX (*Orthogonal Subspace Projection RX*) (Chang, 2007).

Otro aspecto relevante en el trabajo que se presenta ha sido establecer relaciones que permitan conectar las anomalías detectadas con la información real del terreno que aportan, es decir, información relacionada con la respuesta anómala más allá de ser producto de una diferenciación significativa respecto de un fondo. Interesa por lo tanto conocer qué información nos proporciona la respuesta anómala detectada y caracterizar en qué condiciones y escenarios se produce.

## 2. CALIBRACIONES Y CORRECCIONES GEOMÉTRICAS

Las correcciones geométricas y la georreferenciación de los datos adquiridos deben considerarse desde dos aspectos diferentes, las calibraciones internas (Orientación Interna) y las calibraciones externas (Orientación Externa). En este apartado se describen los procesos de calibración geométrica seguidos.

### 2.1. Orientación Interna

La orientación interna de cámaras normalmente es determinada mediante procesos de calibración de laboratorio. Las condiciones en el laboratorio no son las mismas que durante la operación. En vuelo la altitud habitualmente produce las condiciones térmicas son más frías fuera que dentro de la plataforma, hecho que produce unas

deformaciones en las lentes. Meier (1978) realizó una investigación teórica cuyo objeto eran los cambios en la distancia focal en los sensores basados en una óptica (Tabla 1).

**Tabla 1.** Cambio de la distancia focal dependiendo de la altura de vuelo (Jacobsen, 2002).

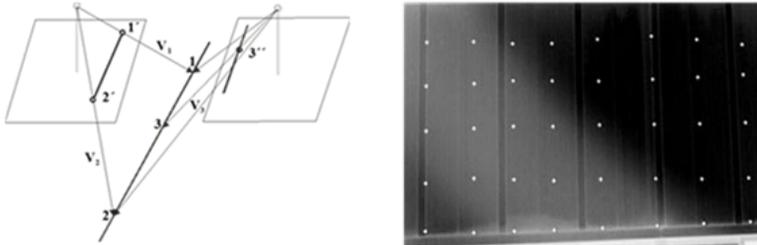
	Lentes en atmósfera libre	
	6 km	14 km
Altura de vuelo	6 km	14 km
Cámara gran angular $f=152$ mm	$-47\mu\text{m}$	$-80\mu\text{m}$
Ángulo normal de cámara $f=305$ mm	$-110\mu\text{m}$	$-172\mu\text{m}$

En general los valores han sido confirmados por test empíricos. El mismo problema existe con el punto principal. La medida de las aberraciones geométricas de las cámaras del sistema de captación es posible realizarla en colimadores ópticos, si bien, se pueden resolver así mismo y en su conjunto unido al resto de parámetros de orientación interna (POI) de los sensores, mediante el Método de Autocalibración. En este sentido, se ha podido comprobar cómo la caracterización interna del sensor, con especial peso de la sincronización con el sistema inercial, resulta crítica para poder alcanzar niveles de precisión adecuados a las aplicaciones potenciales del sistema de captación multisensor.

La autocalibración consiste en un ajuste simultáneo de un conjunto de imágenes en el que como incógnitas aparecen: (i) coordenadas de los puntos, (ii) orientación externa de los puntos de toma y (iii) los parámetros internos de la cámara; y donde, en principio las únicas medidas que se tienen corresponden a las realizadas sobre las imágenes. Se trata, sin embargo, de un modelo de calibración abierto en el que se pueden añadir otros tipos de medidas y nuevos conjuntos de incógnitas.

Antes de discutir el modelo matemático hay que notar que es necesario incorporar en el proceso de autocalibración el solape de imágenes con estructuras lineales rectas, algunos puntos homólogos y de control para estimar los parámetros antes mencionados. La relación entre puntos pertenecientes a una recta y los correspondientes puntos en el espacio objeto es modelado mediante la geometría epipolar. En el espacio imagen, las líneas pueden ser definidas por una secuencia

de puntos intermedios a lo largo de la línea. Es entonces cuando estos puntos se pueden medir monoscópicamente.

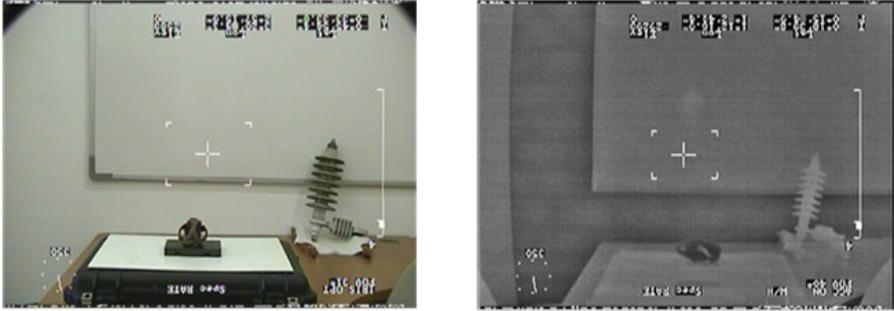


**Figura 2.** Geometría epipolar que opera en Autocalibración (izquierda) y ejemplo de toma de datos umbralizados en Orientación Interna de cámaras y sensores ópticos.

Con este planteamiento tenemos tres vectores que intervienen en la formación del modelo matemático de calibración:

- $V_1$ , vector conteniendo el centro perspectivo y el primer punto en la línea del espacio objeto.
- $V_2$ , vector conteniendo el centro perspectivo y el segundo punto en la línea del espacio objeto.
- $V_3$ , vector conteniendo el centro perspectivo y un punto intermedio en la línea imagen, de tal manera que se consideran a los tres vectores coplanarios. Así:

En el ajuste de haces con autocalibración mediante el modelo matemático obtenido, son considerados los parámetros de deformación/distorsión interna (Parámetros de Orientación Interna) y externa (Parámetros de Orientación Externa), así como las correlaciones que se producen entre ellos.



**Figura 3.** Ensayos de calibración interna geométrica con cámaras, visible (izquierda) e infrarroja (derecha). Se observa (derecha) la distorsión radial acusada en la cámara infrarroja y su gran sensibilidad térmica.

## 2.2. Orientación Externa

El interés de los sistemas inerciales en georreferenciación de imágenes y datos Lidar es que pueden potencialmente proporcionar de manera directa los parámetros de orientación exterior (POE) de sensores instalados en plataformas aeroportadas. Para que resulte operativo el sistema de captación multisensor formado por sensores ópticos, cámaras matriciales, Lidar, y cámaras giroestabilizadas, junto con subsistemas inerciales GNSS/IMU de posicionamiento y orientación, es necesario primeramente integrar (analítica y electrónicamente) y seguidamente o en un procedimiento global, calibrar en condiciones de operación los distintos subsistemas que intervienen (Rejas *et al.*, 2003). Una de las tareas más críticas es la determinación del alineamiento de las unidades de medida inercial (IMU) respecto de los sensores ópticos, conocida como calibración de boresight, de especial complejidad en escáneres lineales, Lidar y cámaras giroestabilizadas con apuntamiento autónomo a la plataforma aérea.

El objetivo que se persigue con esta calibración es poder modelizar la geometría perspectiva de cada línea o matriz del detector (modelo del sensor), modelizar el movimiento de la plataforma a lo largo del vuelo (modelo de plataforma) y calcular los parámetros de calibración de ambos modelos. Esta tarea resulta especialmente compleja en sensores Lidar y en cámaras giroestabilizadas, ya que su geometría de adquisición menos rígida en comparación con cámaras matriciales y la redundancia estadística necesaria en cada pasada o eje de adquisición de datos, dificulta el cálculo de parámetros de orientación externa para cada línea de imagen barrida.

Por este motivo, la aplicación de correlación automática de imagen se presenta como un método que permite obtener resultados satisfactorios en estos casos.

La calibración de *boresight* consiste en determinar la matriz de orientación de los marcos de referencia de los sensores ópticos respecto a los marcos de referencia de los sistemas inerciales GNSS/IMU, en base a tres ángulos en la misma secuencia de giros de estos y tres vectores de posición para cada uno de los ejes en un sistema tridimensional. La calibración de *boresight* se determina en ensayos y vuelos en condiciones reales de operación sobre áreas o polígonos de Test espacialmente caracterizadas, adquiriendo datos de todos los sistemas que intervienen y formando un bloque global con el conjunto de imágenes y datos inerciales tomados.

### **3. PROCESO DE DATOS Y EXPLOTACIÓN DE LA INFORMACIÓN, LOCALIZACIÓN DE EVIDENCIAS**

La información adquirida sobre diferentes escenarios es explotada de manera automática mediante métodos y algoritmos propios de teledetección y procesamiento de datos, tanto geométrico como radiométrico. Se expone a continuación las principales características en la estrategia del tratamiento y la extracción de la información a partir de los datos capturados por el sistema multisensor, siendo el nexo en común en todos los métodos implementados la automatización de los procesos.

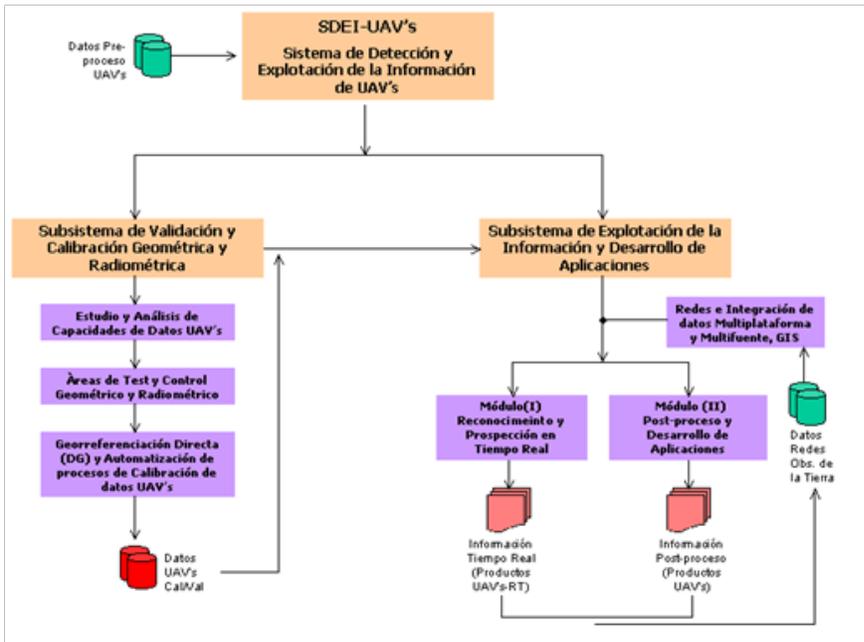


Figura 4. Flujo de Procesado de datos en un sistema multisensor de exploración del terreno.

### 3.1. Georreferenciación Directa

La condición necesaria de automatizar los procesos de adquisición y análisis de datos en aplicaciones de localización y seguimiento del sistema multisensor de captación, requiere inevitablemente de una georreferenciación de forma directa a partir de parámetros externos que permitan detectar y proyectar el elemento de interés localizado sobre el terreno. Se describe en este apartado el conjunto del sistema desarrollado que unido al modelo matemático de colinealidad implementado y calibrado (interna y externamente), permiten la Georreferenciación Directa de todos los sensores independientemente de su estrategia de toma de datos. El sistema es dotado de varias unidades inerciales y GNSS para ejecutar esta tarea que se contempla en tres aspectos diferentes:

- Una INS (*Inertial Navigation System*) es instalada en cuerpo del Lídár y este dispone de una señal de sincronismo con el reloj del GPS lo que permite fusionar y sincronizar los datos de ambos con el objeto de obtener la nube de puntos en coordenadas en un marco de referencia terrestre tridimensional.
- Otra INS se fija en la estructura que soporta las cámaras fijas, paralela a la cámara cenitales. También es posible la sincronización con el reloj del GPS para la posterior fusión de datos.
- La cabeza giroestabilizada suele llevar incorporada su propia IMU (*Inertial Measurement Unit*) y admite la entrada de un GPS externo con lo que se obtiene la información de vídeo georeferenciada de forma directa.

### ***3.2. Extracción de la Información mediante la Detección de Anomalías del Terreno***

Entre los distintos métodos de explotación de los datos adquiridos diseñados e implementados para un sistema multisensor, se propone una nueva técnica de detección de pequeños objetivos basada en la búsqueda de la mejor proyección de valores fuera de rango sobre fondo térmico a partir de ficheros de imagen multifuente fusionando los adquiridos individualmente por cada sensor del sistema. Este método, genéricamente denominado Detección de Anomalías, se particulariza en el denominado Detector de Anomalías por Fondo Térmico o DAFT en sus siglas (Rejas et al., 2014) que aporta unos resultados altamente correlacionados con diversas entidades, lo que posibilita una prospección automática del terreno, identificación de objetivos potenciales y localización de evidencias en investigaciones científicas sobre diferentes escenarios.

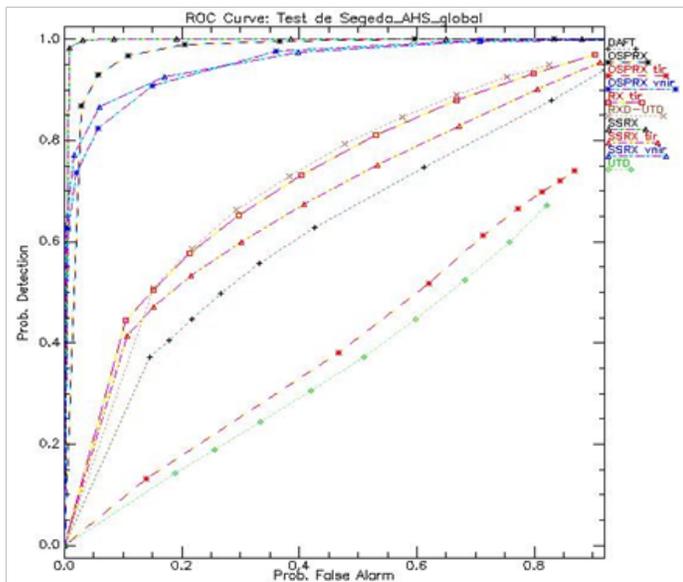
Se han contrastado además los resultados con otros métodos de detección de anomalías como RX (*Reed y Xiaoli, 1990*) adoptado como estándar por la comunidad científica, método UTD (*Uniform Targets Detector*), método SSRX (*Subspace RX*) y método basado en proyecciones de subespacios de imagen OSPRX (*Orthogonal Subspace Projection RX*).

La experimentación desarrollada se ha llevado a cabo con distintas escenas del espectro visible, infrarrojo cercano y térmico agrupadas en escenarios diferentes, buscando con ello considerar la mayor diversidad posible de fondos espectrales y el mayor rango de longitudes de onda. Las escenas utilizadas responden a dos test y están ubicadas en áreas de estudio de Alcalá de Henares y Torrejón de

Ardoz (Test ALC) y de Mara-Belmonte de Gracián, en Zaragoza (Test SEG). Se han definido escenarios de experimentación considerando la presencia en ellos de tipos de objetivos anómalos diferentes y fondos espectrales distintos también. Los métodos de detección de anomalías aplicados, bajo la estrategia común en todos ellos de probarlos con todos los canales de imagen sin ruido y por puertos separados del espectro electromagnético en el VNIR, SWIR y TIR.

#### 4. MÉTODO DE EVALUACIÓN

Una pregunta práctica de suma importancia a plantearse para responder en relación sobre la eficacia del sistema de explotación de la información es dónde establecer el umbral para mantener pequeño el número de errores de detección (objetivos erróneos y falsas alarmas). Un alto índice de falsas alarmas desperdicia fuentes de procesamiento y reporte, y puede dar lugar a una sobrecarga del sistema. De hecho, existe siempre un compromiso entre la elección de un umbral bajo para aumentar la probabilidad de detección  $P_d$  (objetivo) y un umbral elevado para mantener la probabilidad de falsa alarma baja  $P_f$ .



**Figura 5.** Ejemplo de curvas ROC para el test SEG y todos los métodos aplicados (RX, RXD-UTD, OSPRX, SSRX y DAFT) por puertos del espectro electromagnético: significado de subíndices: vnir - espectro visible e infrarrojo cercano, tir - espectro térmico.

Para un determinado detector, la relación entre la  $Pd$  y  $Pf$  puede ser analizada por la curva Característica de Operación del Receptor (Fawcett, 2006), usualmente conocida por sus siglas en inglés ROC–*Receiver Operating Characteristic*, que plotea  $Pd(\eta)$  frente a  $Pf(\eta)$  en función del umbral  $-\infty < \eta < \infty$ . En este trabajo se ha aplicado este método bien conocido, utilizando el área bajo la curva ROC o AUC (*Area Under the Curve*) como indicador para evaluar los distintos métodos de detección de anomalías.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Test ALC

El 15% de las escenas de imagen del test ALC está compuesto por suelo desnudo, un 1.5% de lámina de agua, un 6.4% de masa forestal y otro 15% de vegetación rala o incipiente, existiendo amplias coberturas geométricas de asfalto y hormigón. Las anomalías de valor más alto se corresponden principalmente con cubiertas metálicas de edificios, de PVC y de fibra de carbono, y en menor medida de teja.

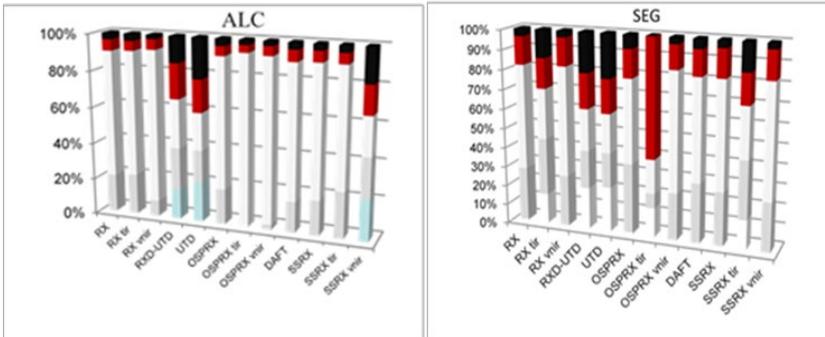
En el test de INTA-Alcalá de Henares todos los métodos obtienen una alta probabilidad de detección, salvo OSPRX y UTD. Los mejores resultados son obtenidos por SSRX, seguido de OSPRX y DAFT, prácticamente equiparados con un AUC de 0.999 y 0.998 respectivamente.

### 5.2. Test SEG

En el análisis ROC en el test SEG (Figura 4) volvemos a obtener un patrón que se repite, el método que mayor probabilidad de detección ofrece es SSRX con un AUC de 0.999, seguido de OSPRX con un AUC de 0.981 y algo por debajo sus respectivas variantes en el visible e infrarrojo cercano. Agrupados por encima de la diagonal les siguen las variantes térmicas de RX y SSRX, y DAFT, por este orden, con un AUC alrededor de 0.7. Los peores resultados, con una probabilidad de detección de verdaderos positivos menor que de falsas alarmas, es para OSPRX y UTD.

DAFT en SEG arroja unos patrones muy marcados sobre elementos enterrados, correspondiéndose con restos de edificaciones semienterrados y otras estructuras contemporáneas creadas por el hombre. De esta manera, superficies particulares pueden caracterizarse en virtud de la anomalía espectral asociada con estructuras que permanecen ocultas bajo el terreno o la vegetación y que en otras áreas del

espectro distinto al emisor se comportan de una manera más homogénea (Rejas, 2014), por lo tanto menos aptas para diferenciar valores atípicos.



**Figura 6.** Resultados globales en % de detección de anomalías para todos los métodos aplicados (RX, RXD-UTD, OSPRX, SSRX y DAFT) por puertos del espectro electromagnético: significado de subíndices: vnir - espectro visible e infrarrojo cercano, tir - espectro térmico.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha presentado el potencial de exploración multisensor a partir de Lidar, cámaras fijas y cámaras giroestabilizadas visibles e infrarrojas, orientado a diversas aplicaciones entre las que se encuentra el potencial uso en la exploración tridimensional del terreno a efectos de localización de evidencias científicas. Los primeros resultados obtenidos en las experiencias iniciales de integración de un sistema multisensor han sido satisfactorios, si bien se ha comprobado la necesidad de considerar la calibración de los sistemas ópticos tanto internas como externas, y de realizar ensayos de test bifrecuencia GNSS para obtener en un proceso riguroso los parámetros de orientación que permitan una localización precisa bajo las máximas prestaciones de los sistemas inerciales.

Se ha evaluado el comportamiento de diferentes métodos de explotación de la información adquirida, entre ellos diversos detectores de anomalías sobre espacios o escenarios de diferente complejidad. Los resultados obtenidos por el método propio DAFT, demuestran la mejora en la definición cualitativa de las anomalías que identifican a objetivos diferentes en o bajo superficie del terreno o de la vegetación. DAFT ha obtenido resultados equiparables en probabilidad de detección de verdaderos positivos a los métodos más eficaces, a lo que se añade

la mejora de detectar anomalías cualitativamente diferentes, incluso de materiales muy absorbentes, demostrando una gran eficacia, lo que facilita su implementación en un sistema de explotación de la información proyectada de forma automática en un marco geográfico operativo.

## REFERENCIAS

- Bar, D.E., Wolowelsky, K., Swirski, Y., Figov, Z., Michaeli, A., Vaynzof, Y., Abramovitz, Y., Ben-Dov, A., Yaron, O., Weizman, L. and Adar, R. (2010). Target Detection and Verification via Airborne Hyperspectral and High-Resolution Imagery Processing and Fusion. *IEEE Sensors Journal* Vol. 10, No. 3.
- Chang C.I. (2005). Orthogonal subspace projection (OSP) revisited: a comprehensive study and analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 3, pp. 502–518.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27: 861–874.
- Harsanyi, J.C. (1993). Detection and classification of subpixel spectral signatures in hyperspectral image sequences. Ph.D. *dissertation*, Dept. Elect. Eng., Univ. Maryland-Baltimore County, Baltimore USA.
- Jacobsen, K. (2002). Calibration aspects in direct georeferencing of frame imagery. *Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale, ISPRS Commission I*, 10-15 November 2002, Denver, CO USA.
- Malpica, J. A., Rejas, J. G. and Alonso, M.C. (2008). A projection pursuit algorithm for anomaly detection in hyperspectral imagery. *Pattern Recognition*, V. 41, Páginas (14) 3313-3327, Editorial Elsevier Ltd. ISSN 0031-3203.
- Nasrabadi, N.M. (2008). Multisensor joint fusion and detection of mines using SAR and Hyperspectral. *Sensors. IEEE Conferences*, Page(s): 1056–1059.
- Reed, I.S. and Xiaoli, Y. (1990). Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions*, V.38, Issue: 10, Page(s): 1760 – 1770.

- Rejas, J.G., Martínez-Frías, J., Martínez, R., Marchamalo, M. y Bonatti, J. (2014). Análisis espectral de materiales geológicos en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica y su relación con la detección remota de anomalías. *Estudios Geológicos*, 70(2): e011. <http://dx.doi.org/10.3989/egeol.41711.313>.
- Rejas Ayuga, J.G., Gutiérrez De La Cámara, O., Callejo Castellanos P., Gómez Sánchez, J.A. (2003). Experiencias en la integración de los sensores multiespectrales aeroportados AMDC y Daedalus 1268 con un sistema GPS/INS. *Congreso Internacional 5ª Semana de Geomática*, Barcelona (España)
- Rejas Ayuga, Juan Gregorio (2014). Detección de Anomalías Espectrales de Fondo Térmico en Aplicaciones de Defensa y Seguridad. *II Congreso DESEi+d*, Zaragoza (España).
- Stein, D.W.J., Beaven, S.G., Hoff, L.E., Winter, E.M., Schaum, A.P. and Stocker, A.D. (2002). Anomaly detection from hyperspectral imagery. *Signal Processing Magazine, IEEE* Vol. 19, pp: 58 – 69