

La campaña CASI en Cataluña: evaluación de un sensor multispectral aerotransportado para la monitorización del territorio

X. Baulies, R. Arbiol, C. Franquesa, V. Pala y O. Viñas

Servei de Teledetecció
Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar las posibilidades del sensor aerotransportado CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), el Instituto Cartográfico de Cataluña organizó una campaña aérea con dicho sensor en mayo de 1991. Se llevaron a cabo seis estudios piloto de temáticas distintas para conocer la respuesta del sensor ante distintos tipos de medios y objetivos. En este artículo se describen las características del instrumento, los resultados obtenidos en dichos estudios y una lista de referencias bibliográficas sobre el sensor.

SUMMARY

In order to evaluate the capabilities of the airborne sensor CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), the Cartographic Institute of Catalonia organized an aerial campaign with this sensor in May of 1991. Six pilot studies were carried out on a variety of environment applications. Instrument characteristics, as well as results from these studies and a bibliographic list about the sensor are described in this paper.

Introducción

Con el objetivo de evaluar las posibilidades del sensor aerotransportado CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) el Instituto Cartográfico de Cataluña organizó una campaña aérea con dicho sensor en mayo de 1991. Con el sensor instalado en un reactor Cessna Citation, del Instituto, se captaron imágenes en diferentes zonas previamente definidas. Estas imágenes sirvieron para llevar a cabo 6 estudios piloto centrados en los siguientes temas: agricultura, vegetación (2 estudios), inventario forestal, análisis de la calidad del agua y geomorfología del río Segre. Los resultados derivados de estos estudios, han permitido hacer una valoración positiva del CASI como instrumento eficaz para la monitorización del territorio. Fruto de esta experiencia, financiado por la CIRIT (Comissió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica), el Instituto Cartográfico de Cataluña ha adquirido el sensor para proyectos de investigación y para dar servicio en temas que requieran alta resolución espectral y espacial.

El sensor CASI

El CASI es un sensor óptico de barrido multispectral basado en un dispositivo CCD (Charge Coupled Device) bidimensional (8.9 mm. (espacial) x 6.3 mm. (espectral)) con posibilidad de selección de bandas para obtener información espacial o espectral. El rango de longitudes de onda sobre el que opera el sensor va de 430 nm hasta 950 nm. La región espectral del CCD contiene 288 elementos cada uno de los cuales corresponde a una franja de 1,8 nm. Para más detalles de información sobre el sensor se pueden consultar las descripciones de Babey (Babey et al. 1989).

El CCD está constituido por 288 hileras espectrales y por 612 columnas espaciales. En realidad de las 612 columnas espaciales 512 son las que se utilizan para la captura de información espacial, mientras que las restantes se usan para obtener los valores de los parámetros de dark y offset en la fase de calibración radiométrica.

La resolución espacial típica transversal respecto a la línea de vuelo (es decir la anchura del píxel) va de 2 a 10 m. dependiendo de la altura de vuelo. La relación entre la altura de vuelo y las dimensiones viene condicionada por la óptica del sensor. El sistema óptico utilizado en esta campaña fue una lente de 12.5 mm., que da un FOV (Field Of View) de 34.5°, con un campo de visión de $0.7069 \times$ Altura de vuelo (metros), y una anchura de píxel en metros de $0.00122 \times$ Altura de vuelo (metros).

Las dimensiones del píxel en el sentido de la dirección de vuelo, es decir el largo del píxel, es un producto más complejo que depende de la velocidad del avión sobre el terreno durante la captura de la imagen, del IFOV (Instantaneous Field of View) y del tiempo de integración del sensor. El tiempo de integración a la vez determina el número máximo de bandas posibles.

La máxima velocidad de grabación es de 245 sectores por segundo (un sector = 1024 bytes). Cada píxel son dos bytes. Para cada línea de imagen (frame) se graban 64 bytes de cabecera y para cada banda de esta línea, 612 píxeles (1224 bytes). Cada frame ocupa un número entero de sectores. Las limitaciones del tiempo de integración vienen determinadas por este ratio.

Toda esta información se registra en exabyte en cintas convencionales de vídeo de 8 mm. En una hora y media de cinta caben 2.3 gigabytes de información.

Se utilizan 12 bits (DN = 4096) para codificar la señal (intensidad) asociada a cada píxel espacial y a cada banda espectral. La saturación se produce cuando se sobrepasa el umbral de 250000 electrones.

El DN para cada banda se calcula a partir de la suma de la señal de las diferentes hileras espectrales que intervienen en la formación de la banda. Cuando una banda es muy ancha es probable que se produzca saturación, y por tanto, habrá que cerrar el diafragma del sistema óptico.

La sensibilidad del sensor describe la capacidad de respuesta para cada longitud de onda del instrumento respecto una fuente de luz de radiancia equivalente en todo el rango espectral. La curva de sensibilidad del sensor muestra una mayor sensibilidad en la región central y menor en las laterales, de modo que dentro del rango 500-850 nm el valor de sensibilidad está por encima de $1000 \text{ DN}(1) / (\text{s} \cdot \text{SRU}(2))$, a 625 nm (peak) es de $2100 \text{ DN} / (\text{s} \cdot \text{SRU})$, a 450 nm es de $500 \text{ DN} / (\text{s} \cdot \text{SRU})$ y a 900 nm es de $600 \text{ DN} / (\text{s} \cdot \text{SRU})$.

(1) DN = Digital Number

(2) SRU = Spectral Radiance Units = $1 \text{ mW} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$

sr = estereoradian (unidad de ángulo sólido)

La radiancia espectral mide el total de energía irradiada por unidad de longitud de onda, por unidad de área y por unidad de ángulo sólido. La unidad de medida de la radiancia espectral es la SRU.

Como ya se ha comentado el sensor puede operar de dos maneras: en modo espectral y en modo espacial:

Modo espectral: (Multispectrometer Mode)

Se pueden seleccionar hasta 39 columnas (look directions) del CCD en modo espectral, es decir para cada una se obtendrá información de las 288 bandas. Es posible establecer el intervalo entre estas columnas y, además, para el resto de columnas se puede obtener información espacial de una hilera espectral (una longitud de onda determinada) previamente definida. El mínimo tiempo de integración en modo espectral es de 200 milisegundos. Este modo de operación se utiliza para extraer curvas de comportamiento espectral del territorio que se quiere estudiar y optimizar la selección de bandas en modo espacial.

Modo espacial: (Multispectral Imaging Mode)

El usuario puede seleccionar hasta 15 bandas como máximo, sin solape, especificando los límites para cada una. El máximo número de bandas registrables viene determinado por el tiempo de integración. Este modo de operación es el más habitual y es el que se utilizó en la campaña de 1991.

Geometría de los datos

Las escenas captadas por el sensor están afectadas por los movimientos del avión. A lo largo de una pasada la actitud del sensor en relación al terreno y a la dirección de vuelo se puede alterar según tres movimientos del avión que normalmente se expresan en ángulos: el cabeceo (pitch), el aleteo (roll), y el cambio de rumbo denominado deriva (yaw).

En la campaña de 1991 no se hizo corrección de cabeceo y de deriva porque los paquetes de software de ITRES Ltd., compañía constructora del CASI, todavía no estaban implementados para este propósito. Actualmente es posible efectuar correcciones de cabeceo y de deriva. Las primeras pruebas introduciendo estas mejoras aplicadas a imágenes CASI, se realizaron en septiembre de 1991 sobre Calgary (Cosandier et al., 1992).

Se partió pues, de imágenes en las que únicamente se habían corregido los efectos del aleteo del avión durante el vuelo.

La corrección del roll se basa en los valores que da un giroscopio instalado a bordo del avión, sensible a los movimientos de aleteo. Los desplazamientos de roll son registrados línea a línea simultáneamente con los datos registrados por el CASI como números enteros. Posteriormente estos números son convertidos a grados por los programas de corrección del roll. La corrección aplica un desplazamiento a cada píxel de una línea (scanline) de acuerdo con este grado.

La corrección del roll mejora muy sensiblemente la calidad geométrica de la imagen, sobre todo cuando los efectos de turbulencia atmosférica han afectado la captación y han introducido distorsiones importantes. Sin embargo, la ausencia de datos completos de posición y de actitud del sensor (o sea conocimiento en cada momento de los tres ángulos en el espacio comentados) hace inviable una corrección basada en ecuaciones de colinealidad sobre un modelo digital del terreno; por otro lado una corrección polinómica no soluciona el problema por el hecho de que el sensor recoge los datos desde una altitud relativamente baja, línea a línea y a lo largo de un intervalo de tiempo relativamente importante (en comparación con los datos captados desde satélite), factores que hacen que las distorsiones no sean generalizables por un polinomio global para toda la imagen.

Se ha desarrollado un método de corrección geométrica adecuado para imágenes de avión captadas con sensor de barrido línea a línea. Este método se basa en la triangulación de Delaunay que a partir de unos puntos de control establece los triángulos

más equiláteros y deforma cada triángulo de forma independiente respetando la posición UTM de los vértices (Devereux et al. 1990).

Dentro del proyecto CASI (PI) de agricultura (véase apartado 4) se ha llevado a cabo una evaluación de la precisión geométrica de este método a partir de un archivo de puntos de control determinados sobre ortofotos 1:5000 y la comprobación del desplazamiento alrededor de un segundo conjunto de puntos de control test. El resultado de la comparación del método con la corrección polinomial sobre una imagen CASI ha sido el siguiente:

La corrección geométrica polinomial de cuarto grado con 98 puntos de control ha dado un RMS de 5.96 m. (2.98 píxeles) calculado sobre 15 puntos test. La corrección geométrica Delaunay con los mismos 98 puntos de control ha dado un RMS de 1.41 m. (0.71 píxeles) calculado sobre 14 puntos test. Este último proceso ofrece mejores resultados pero está, por su propio método, condicionado al número y distribución de los puntos de control.

Radiometría de los datos

Existen dos etapas diferentes de calibración: la calibración del sensor y la calibración de los datos.

La calibración del sensor (Babey et al. 1992) se obtiene utilizando una esfera integrada; la precisión global de la calibración es de $\pm 5\%$. La recalibración se lleva a cabo en el laboratorio y es recomendable hacerla de forma periódica. De esta calibración se derivan tres ficheros: Pure spectra, Contamination y Uniformity. El fichero de uniformidad describe las deficiencias de uniformidad en el conjunto del CCD introducidas por las imperfecciones de la ranura (slit, abertura de entrada de luz en el sistema óptico del sensor, 15 m x 20 mm.) y las variaciones de sensibilidad entre píxeles que son normalmente de una magnitud pequeña.

Además de este calibrado de laboratorio, se lleva a cabo otro proceso que establece la correlación entre las longitudes de onda y las 288 líneas espectrales del CCD. Esta correspondencia se establece mediante el estudio de longitudes de onda conocidas utilizando como fuente elementos químicos como H, He, O, Hg y Ne. En este proceso se utilizan filtros de interferencia y de absorción atmosférica. La función que relaciona las longitudes de onda en función de las hileras espectrales es un polinomio de tercer orden. Este polinomio es conocido y aparece en la cabecera de los ficheros de las imágenes en su formato original. La precisión de este ajuste es de ± 1 nm.

La calibración de los datos tiene por objeto relacionar las intensidades (DN) que da el instrumento con radiancias, es decir, con la energía total que llega al sensor por unidad de longitud de onda, por unidad de superficie y por unidad de ángulo sólido.

La calibración de los datos captados por el sensor tiene en cuenta cuatro parámetros que afectan a todos los DN originales y que se deducen a partir de la "lectura" de determinadas regiones del CCD bidimensional (612 píxeles) distintas a la región de imagen (512 píxeles). Estos parámetros son los siguientes: offset electrónico, dark, scattering y fss (frame shift smear), que a su vez dependen de la luz incidente, abertura del diafragma (f-stop), temperatura y tiempo de integración.

Para obtener un archivo de radiancias definitivo hay que incorporar los datos de un archivo denominado sensitivity [DN / (milisegundos*SRU)], obtenido por calibración del sensor en laboratorio, que está relacionado con la sensibilidad del sensor dentro del rango espectral en el que opera. El sensitivity aplicado al archivo de DN's originales corregidos con los parámetros indicados anteriormente permitirá la transformación a radiancias (SRU).

En resumen el proceso de la calibración de los datos es el siguiente:

- 1) Se obtiene un archivo de radiancias por transformación de los DN originales corregidos:

$$\text{DN original} / (\text{Tiempo de integración} * \text{datos del Sensitivity en DN} / [\text{ms} * \text{SRU}]) = \text{SRU}.$$

- 2) Las SRU se escalan a DN definitivos a partir del valor del peak de SRU. Normalmente se utiliza un único peak SRU para el conjunto de las bandas. Ello se traduce en un mapeo óptimo entre 0-255 para la banda con más intensidad; el resto de bandas puede quedar relativamente "oscurecido". En nuestro caso se usó un valor de 8, para los vuelos sobre el agua y un valor de 12 sobre superficies terrestres.

Se puede mapear de 0-255 cada banda independientemente con un peak diferente. En cualquier caso la posibilidad de calibrar los DN definitivos a partir de los peak más adecuados para cada campaña proporciona una gran flexibilidad al sensor.

$$\text{DN definitivos} = \text{Data SRU} * 255 / \text{peak SRU}.$$

Manipulación del sensor

El control del sensor se realiza a través de un PC desde donde se pueden seleccionar los parámetros de la información deseada:

- En pleno vuelo se puede establecer una nueva configuración de bandas o aplicar un archivo con un bandset previamente determinado.

- Se puede visualizar el área que se está sobrevolando seleccionando una banda determinada. Sobre el monitor aparece el terreno y esto da una primera idea de la calidad de la imagen que se va a obtener.
- Se puede ver en un diagrama dinámico la intensidad para cada banda y por tanto la saturación.
- Es posible determinar el tiempo de integración que configura el largo del píxel, es decir en el sentido de la dirección de vuelo que a la vez está relacionado con el número máximo de bandas registrable.
- Seleccionar el modo de operación: espacial o espectral.
- En el modo espectral se puede establecer el número de look directions y la distancia entre ellas y la banda espectral para el resto de columnas espaciales.
- En modo espectral se puede visualizar en un diagrama dinámico las curvas espectrales que va leyendo una look direction determinada.
- Se puede activar o desactivar la grabación de información sobre el exabyte siempre que se desee.

Respecto al sistema óptico:

Se puede modificar la posición del diafragma en pleno vuelo en función de la intensidad recibida; cerrar si se detecta saturación o abrir si se produce falta de señal.

Quick-look:

Se trata de un programa para reproducir en pantalla el proceso de captación línea a línea de los datos. Los datos registrados se pueden visualizar como play-back del vuelo realizado, reproduciendo las mismas condiciones del momento de ser captadas, a partir de la lectura de la cinta exabyte obtenida. Esta utilidad constituye el primer control de calidad y la primera etapa de postproceso de datos.

El quick-look permite:

- seleccionar el canal a visualizar
- informar sobre las intensidades de las bandas
- conocer los datos asociados a un determinado scanline (tiempo de captación en milisegundos, valores para cada banda y píxel, valores de posición GPS y de actitud (giroscopio))
- saber el número de archivo dentro de la cinta
- la manipulación de la cinta (rewind, skip file, remove...)
- en modo espectral, visualizar la escena entera (con la región espectral seleccionada durante la captación para las columnas no seleccionadas como look direction)
- en modo espectral, representar la curva para las 288 hileras espectrales para una look direction determinada

- la animación de imagen que representa el quick-look puede ser congelada en cualquier momento del display continuo

Estudios piloto de la campaña

Planteamiento de la campaña

El planteamiento de la campaña se basó en aprovechar el conocimiento existente del territorio para poder evaluar con más elementos de juicio las capacidades del sensor. Para la selección de los temas y las zonas de estudio se fijaron una serie de condiciones que debían cumplirse dentro de cada proyecto piloto. Estas condiciones fueron las siguientes:

- temas de ámbito de territorial: forestales, agrícolas y oceanográficos bajo perspectivas diversas: cartografía, inventario, producción, evaluación de impactos, catástrofes, modelos (funcionalismo y estructura), dinámica, etc...
- existencia de equipos de estudiosos con cierta experiencia en la exploración del terreno.
- existencia de información de campo, de las zonas concretas, significativa como para poder contrastar con fiabilidad los resultados que se pudieran obtener.
- proximidad al aeropuerto del Prat (punto de origen y destino del vuelo) de las áreas a volar para facilitar la operatividad y eficacia de la exploración aérea.
- fenómeno a estudiar con máxima actividad posible (fenología) durante las fechas comprendidas entre mayo y junio.

Los estudios piloto

Se concretaron un total de seis temas que cumplieron estos requisitos y que se seleccionaron como áreas piloto. Se les asignó un código 'P' para facilitar la gestión de las imágenes y de la información en general. Los proyectos piloto, con su zona correspondiente fueron los siguientes:

- P1 Agricultura - Comarca del Maresme
- P2 Vegetación I - Zona de Susqueda i Sau
- P3 Vegetación II (Ecología) - Macizo del Montseny
- P4 Inventario forestal - Comarca del Solsonés
- P5 Calidad del agua litoral - Comarcas del Barcelonés y Baix Llobregat
- P6 Geomorfología - Comarca del Segrià

A continuación se resumen los objetivos de cada uno de los estudios y se citan las instituciones con las que se llevaron a cabo dichos estudios:

- P1 Agricultura (Objetivo: discriminar cultivos de parcelado pequeño / pruebas de corrección geométrica) en colaboración con la Dirección General de Producción e Industrias Agroalimentarias (Departamento de Agricultura Ramadería i Pesca).
- P2 Vegetación (Objetivo: cartografía por fotointerpretación con una leyenda botánica tipo Mapa 1:50000 de vegetación de Cataluña) en colaboración con el Departamento de Biología Vegetal (Universitat de Barcelona).
- P3 Vegetación (Objetivo: fotointerpretación y clasificación multiespectral para una leyenda ecológica) en colaboración con el CREA (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals).
- P4 Inventario forestal (Objetivo: análisis multivariante de radiancias y parámetros del inventario ecológico-forestal de Cataluña, obtención de representaciones de estos parámetros a partir de las imágenes) en colaboración con el CREA.
- P5 Calidad del agua del litoral (Objetivo: análisis multivariante de radiancias y parámetros de contaminación del agua, obtención de representaciones de estos parámetros a partir de las imágenes) en colaboración con EMSSA (Empresa Metropolitana de Sanejament S.A.) y el Departamento de Microbiología (Universitat de Barcelona).
- P6 Estudio geomorfológico del río Segre (Objetivo: cartografía por fotointerpretación geomorfológica) en colaboración con el Departamento de Geomorfología (Universitat de Barcelona).

Datos multiespectrales

Como ya se ha comentado anteriormente el sensor ofrece la posibilidad de configurar distintos conjuntos de bandas espectrales (bandset). Para esta campaña se utilizaron 4 configuraciones espectrales distintas, de acuerdo con las especificaciones de cada tema. Tres de ellas se basaron en estudios previos realizados con el sensor en Gran Bretaña (Wilson, 1989). Estas configuraciones se detallan a continuación expresadas en nm, así como la resolución espacial para cada estudio:

Para el estudio P1, se utilizó la configuración del sensor SPOT-XS:

- 500-590
- 610-680
- 790-890

Para los estudios P2, P3 y P4, se utilizó la configuración de ocho bandas denominada GEBOBTTTS:

460.2-488.2
542.8-555.2
592.4-604.9
674.4-681.6
704.9-713.8
730.0-738.9
742.5-751.5
791.1-809.1

Para el estudio P5 se utilizó la configuración CHLOROTS:

436.2-478.2
539.8-550.4
585.8-596.4
631.9-644.4
658.6-672.9
674.7-687.2
708.6-714.0
746.3-758.9

Para el estudio P6 se utilizó la configuración GEOBOT:

474.7-501.1
546.9-557.5
596.4-607.0
676.4-684.5
708.6-715.8
733.7-740.9
744.5-751.7
784.1-789.5

La resolución espacial aproximada de las imágenes se determinó también en función de los temas:

P1 = 2 m. Resolución obtenida a una velocidad y altitud de vuelo sobre el terreno de 150 nudos y 1700 m.

P2, P3, P4 y P6 = 5 m. Resolución obtenida a 190 nudos y 4200 m.

P5 = 10 m. Resolución obtenida a 288 nudos y 8400 m.

Resultados

A continuación se resumen los resultados obtenidos en los estudios realizados:

P1. Agricultura. La clasificación multiespectral de las imágenes obtenidas no permitió discriminar de manera satisfactoria los tipos de cultivos intensivos deseados. La resolución espacial y espectral con respecto a la fenología y cobertura de los cultivos resultó inadecuada.

Los resultados de las pruebas de corrección geométrica fueron los siguientes:

- Corrección geométrica polinomial (4º grado) rms= 5.96 m (sobre 15 puntos test).
- Corrección geométrica Delaunay rms= 1.41 m (sobre 14 puntos test).

P2. Vegetación I. Se editaron documentos aptos para la interpretación visual. Se dispuso de información de campo. Se llegó de forma satisfactoria a discriminar una leyenda de 12 categorías; sin embargo no fue posible llegar al nivel de unidades fitosociológicas deseado.

P3. Vegetación II. Por fotointerpretación se pudo delimitar una leyenda de clases fisionómicas de vegetación. Se dispuso de información de campo que se digitalizó sobre las imágenes para confeccionar archivos de parcelas de entrenamiento y test. Se realizó una clasificación digital con una reducción de la leyenda a 9 categorías y se obtuvo una calidad global del 83%.

P4. Inventario Forestal. (Figura 1). Se realizó un análisis multivariante de las radiancias obtenidas con el sensor y 12 parámetros del inventario ecológico-forestal. Se dispuso de información de campo sobre 29 estaciones con información completa sobre dichos parámetros forestales. Estas estaciones se digitalizaron sobre las imágenes y se relacionaron con los valores radiométricos promediados dentro de ventanas de 3x3 píxeles. Se obtuvieron ajustes por regresión múltiple para 9 variables. Los valores del coeficiente de correlación R, se situaron entre 0.76 y 0.82. Se realizaron tests con estaciones independientes obteniéndose valores de R entre 0.7 y 0.94 (intervalo de confianza 99%).

P5. Calidad del agua del litoral de Barcelona (comparación con una imagen Landsat-TM). (Figura 2). Se dispuso de información de campo gracias a una campaña marina que se llevó a cabo simultáneamente al vuelo del sensor. En dicha campaña se estudiaron 15 parámetros de contaminación recogidos en 97 puntos del litoral por tres barcas posicionadas por GPS. Estos puntos se localizaron sobre las imágenes corregidas geoméricamente. Se estableció una relación de los parámetros analizados en los puntos de muestreo con los valores



FIGURA 1
Imagen falso color del proyecto piloto
CASI-P.4. (A. 9)



FIGURA 2
"Mapa" de la variable
coliformes totales del proyecto
piloto CASI-P.5. (A. 10)

radiométricos promediados dentro de ventanas de 3x3 píxeles. Se obtuvieron ajustes para 7 variables con valores de R entre 0.68 y 0.98. Se realizaron tests con puntos independientes obteniéndose valores de R entre 0.61 y 0.95 (intervalo de confianza 99%).

Se reprodujo la experiencia con una imagen Landsat-TM captada el mismo día y se obtuvo valores de R entre 0.62 y 0.81.

P6. Estudio geomorfológico del río Segre. Se llevó a cabo una interpretación visual sobre documentos papel con apoyo de observaciones de campo. Se pudo diferenciar de forma satisfactoria una leyenda de 12 categorías.

Conclusiones

El sensor CASI ofrece información temática del territorio de forma rápida y eficaz si nos basamos en su fácil operatividad. A pesar de que no capta información radiométrica en las regiones del infrarrojo medio y térmico, el hecho de poder configurar un conjunto de bandas estrechas, le confiere una alta resolución espectral y una gran capacidad de adaptación a objetivos concretos. Aunque opera en un rango espectral limitado del visible-infrarrojo próximo, es posible discriminar elementos del territorio que en el mismo rango utilizando bandas más anchas podrían quedar enmascarados.

Los resultados derivados de los seis estudios piloto planteados en la campaña CASI-91 (ICC), se han valorado globalmente como positivos. El comportamiento del sensor en los temas de inventario forestal y polución de agua ha sido especialmente notorio, así como en los temas de vegetación y geomorfología, aunque con menos elementos de valoración con respecto a los dos primeros, y no así en los temas de alta resolución para discriminación de cultivos intensivos. Este último estudio, planteado con únicamente 3 bandas espectrales y 2 m de resolución espacial, ha puesto de manifiesto la necesidad de ajustar adecuadamente las resoluciones a los objetivos.

Este mismo estudio basado en las imágenes de mayor resolución espacial se ha utilizado para estudiar la calidad geométrica de estas imágenes. Se aplicaron algoritmos de triangulación Delaunay y modelos polinomiales que requirieron un conjunto importante de puntos de control.

Fruto de esta aproximación de georreferenciación se constató la necesidad de registrar simultáneamente a los datos radiométricos, datos de posición y actitud del sensor asociados a cada scanline.

Actualmente las scanlines del sensor incorporan además de los datos sobre el aleo, también datos de cabeceo y GPS, ambos obtenidos por un receptor sincronizado con el sensor. Se dispone pues de la mayor parte de parámetros necesarios para orientar el sensor, (falta la deriva absoluta respecto del terreno) lo cual ha de permitir rectificar las imágenes con mayor precisión.

La correcta georreferenciación de las imágenes es condición indispensable para abordar temas con requerimientos de multitemporalidad y para la integración de estos datos de alta resolución en los SIG.

Bibliografía

Se incluyen algunas referencias bibliográficas sobre el sensor CASI además de las citadas en el texto, estas últimas marcadas con un asterisco.

- Anger, C.D., Babey, S.K. and Adamson, R.A.:** 1990. A New Approach to Imaging Spectroscopy. *Proceedings of SPIE*, vol. 72, pp. 72-86.
- ***Babey, S.K. and Anger, C.D.:** 1989. A Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI). *Proceedings, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'89*. Vancouver, Canada, julio de 1989 (Vancouver: IGARSS), vol. 2, pp. 1028-1031.
- ***Babey, S.K. and Soffe, R.J.:** 1992. Radiometric Calibration of the Airborne Spectrographic Imager (CASI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n° 4, 11 pp.
- Borstad, G.:** 1992. Ecosystem surveillance and monitoring with a portable airborne imaging spectrometer system. *First Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*. New Orleans, Louisiana, USA, 10 pp.
- ***Cosandier, D., Ivanco, T. and Mah, S.:** 1992. The Geocorrection and Integration of the global positioning system with the Compact Airborne Spectrographic Imager. *15th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Toronto, Canada, 6 pp.
- Cosandier, D., Chapman, M.A. and Ivanco, T.:** 1993. Low Cost Attitude Systems for Airborne Remote Sensing and Photogrammetry. *The Canadian Conference on GIS*. Ottawa, Canada, 8 pp.
- ***Devereux, B.J.:** et al. 1990. Geometric correction of airborne scanner imagery by matching Delaunay triangles. *International Journal of Remote Sensing*. 12:2237-2251.
- Franklin, S.E.:** et al. 1991. Sensitivity of CASI data to anisotropic reflectance, terrain aspect, and deciduous forest species. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 17, 314 -320.
- Franklin, S.E. and McDermid, G.J.:** 1992. Empirical relations between digital SPOT HRV and CASI spectral response and lodgepole pine (*Pinus contorta*) forest stand parameters. *Department of Geography, The University of Calgary*. Calgary, Canada, 18 pp.
- Freemantle, J.R., Pu, R. and Miller, J.R.:** 1992. Calibration of imaging spectrometer data to reflectance using pseudo-invariant features. *Remote Sensing Laboratory, Forestry University, Nanjing, Jiangsu, China, Proceedings of the 15th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Toronto, Canada, 7 pp.
- Harron, J.W. et al.:** 1992. Methodologies and errors in the calibration of a Compact Airborne Spectrographic Imager. *Proceedings of the 15th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Toronto, Canada, 7 pp.
- Held, A.A. and Jupp, D.L. B.:** 1994. Use of the Compact Airborne Spectral Imager (CASI)

*La campaña CASI en Cataluña: evaluación de un sensor
multiespectral aerotransportado para la monitorización del territorio*

- for remote sensing of vegetation function and dynamics. *CSIRO Division of Water Resources*. Canberra, Australia, 8 pp.
- Mah, S. and Kirchner, F.F.:** 1993. An integrated and cooperative international remote sensing technology transfer program, *16th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Quebec, Canada, 8 pp.
- Mah, S., Pearce, S. and Lethaby, J.: 1991. The application of digital airborne for municipal environmental studies: preliminary analysis prepared for the city of Calgary. *Department Land Information Services*. Calgary, Canada, 9 pp.
- Matthews, A.M. and Boxall, S.R.:** 1994. Novel algorithms for the determination of phytoplankton concentration and maturity, *Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*. New Orleans, Louisiana, 8 pp.
- Pahner, D., Borstad, G.A. and Boxall, S.R.:** 1994. Airborne multiespectral remote sensing of the January 1993 Shetlands oil spill, *Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, New Orleans, Louisiana, 13 pp.
- Saunders, J.F.:** et al. 1994. Mapping optical water quality of the Hawkesbury river using CASI airborne spectrometer data, *Australian Remote Sensing Conference*, Melbourne, Australia, 13 pp.
- Staenz, K.:** 1992. Development of imaging spectrometry in Canada. *International Symposium of Spectral Sensing Research (ISSSR)*, Maui, Hawaii, U.S.A. 14 pp.
- ***Wilson, A.K.:** 1990. The NERC 1989 Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI). *Proceedings Natural Environment Research Council Symposium on Airborne Remote Sensing*, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, U.K. pp. 259-283.

