

Aplicaciones del sensor CASI en la realización de inventarios forestales: Aspectos metodológicos y resultados

X. Pons¹ - X. Baulies²

(1) Unitat de Botànica

Universitat Autònoma de Barcelona

(2) Servei de Teledetecció

Institut Cartogràfic de Catalunya

RESUMEN

En este estudio presentamos una evaluación de las posibilidades del sensor aerotransportado CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) para la cartografía de variables propias de un inventario ecológico-forestal, como biomasa de madera, biomasa de hojas, índice de área foliar (LAI), recubrimiento arbóreo, etc. La utilización de técnicas de regresión múltiple ha permitido obtener valores de correlación entre 0.76 y 0.94 ($p < 0.05$) entre los datos radiométricos y los forestales. Se ha comprobado la extrapolabilidad de los modelos obtenidos a partir de la comparación entre pasadas diferentes con diversos conjuntos de estaciones de test.

SUMMARY

In this study we evaluate the possibilities of the airborne sensor CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) when applied to cartography of variables characteristic of an ecologic and forestry inventory, *i.e.* wood biomass, leaf biomass, leaf area index (LAI), canopy cover, etc. The use of multiple regression techniques has made possible to obtain correlation values between 0.76 and 0.94 ($p < 0.05$), between radiometrical and forestry data. The extrapolability of the models obtained has been verified starting from the comparison among different flight lines and several groups of sample areas.

Introducción y objetivos

Durante el año 1991 el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) organizó una campaña con el objetivo de evaluar el sensor CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) (Baulies *et al.*). Entre otros aspectos se estudiaron las posibilidades de dicho sensor para la cartografía de variables propias de un inventario ecológico-forestal (diámetro medio, índice de área foliar, biomasa de madera, hojas y ramas, volumen de madera, etc.). Este trabajo se hizo gracias a la existencia del inventario que lleva a cabo el Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF).

Los objetivos del proyecto han sido los siguientes:

- 1.- Evaluar y cuantificar la correlación entre los datos del "Inventari ecològic i forestal de Catalunya" y las obtenidas por el sensor CASI.
- 2.- Determinar las regiones espectrales que resulten más adecuados para cada variable forestal.
- 3.- Estudiar las ventajas e inconvenientes del uso de estos datos en un proyecto cartográfico forestal.
- 4.- De cara a futuras campañas sobre grandes extensiones, estudiar aspectos operacionales como la extrapolabilidad de los datos multispectrales, captadas con este o con de otros sensores.

Problemática y antecedentes

Ante el objetivo de encontrar una correlación entre datos de un sensor remoto en la espectro visible e infrarrojo próximo y datos de campo de un inventario ecológico-forestal, podríamos plantearnos modelos *a priori*, con significado físico, y basados en la búsqueda de la respuesta que postulamos que tenga la vegetación en cada región espectral. Esto implicaría conocer como cambia la respuesta radiométrica de cada cubierta vegetal bajo el efecto de diferentes variables, como por ejemplo las condiciones atmosféricas y de iluminación (relieve), los diferentes estados fenológicos y estructura de las cubiertas vegetales (edad, geometría, tratamiento silvícola, grado de mixtura), etc.

Existen estudios previos, especialmente en cultivos, centrados en la respuesta espectral a nivel de hojas (parénquimas foliares) que sugieren algunas ideas para plantear modelos de significado físico; en cualquier caso, cuando se trata de las estructuras forestales estos planteamientos se vuelven mucho más complicados. Estas dificultades vienen determinadas por la falta de un número importante de estudios previos y, especialmente, por la dificultad intrínseca de modelizar la respuesta de una estructura forestal. En efecto, un modelo de este tipo tendría que contemplar los gradientes de edad, densidad, mixtura de especies, pendientes y orientaciones de las masas forestales. También en relación a los estudios previos, tenemos de mencionar la dificultad de relacionar las diferentes configuraciones espectrales utilizadas (MSS, TM, XS, ATM y otros) y el hecho que muchos trabajos planteen aproximaciones parciales, que contemplen sólo algunas de las variables implicadas en un modelo ideal; adicionalmente, no es raro que la evaluación de estos modelos se implemente únicamente en el plan puramente teórico (*e.g.* Cavayas y Teillet 1985).

Ante las dificultades que plantea, en el caso de un inventario forestal, la utilización de un modelo físico, es frecuente en percepción remota abordar el problema mediante planteamientos empírico-estadísticos. Estos planteamientos se basan en el conocimiento de relaciones, directas o indirectas, de los parámetros forestales con la

respuesta espectral. Así, dada una determinada cubierta forestal, los aspectos estructurales tienen un efecto de primer orden en la variación de la respuesta radiométrica, tal como confirmaron las experiencias de Danson y Curran (1991). De todas formas, no todos los parámetros forestales son directamente detectables por los sensores remotos (e.g. la biomasa de corteza no es ni tan solo visible por el sensor y sólo será posible intentar establecer una relación de manera indirecta). Así, Spanner *et al.* (Spanner *et al.* 1984) y Running *et al.* (Running *et al.* 1986) muestran la estrecha relación lineal entre el *normalized difference vegetation index*, NDVI, y el *leaf area index*, LAI, en bosques de coníferas del NW de los Estados Unidos de América, al mismo tiempo que Gholz (Gholz 1982) y Waring (Waring 1983) habían mostrado la fuerte relación funcional entre el LAI y la biomasa de madera o la producción primaria neta (Sader *et al.* 1989).

Después de estudiar otras posibilidades (Foody 1992, Sader *et al.* 1989, Cihlar *et al.* 1991, Chacón-Torres *et al.* 1992, Cohen y Spies 1992), nuestra opción ha sido intentar utilizar la información presente en todos los canales para establecer una correlación con los datos del inventario. Hemos seleccionado con esta finalidad métodos de regresión múltiple, que nos han permitido establecer cuáles eran los canales más ligados a cada variable y con qué peso había que combinarlos.

Datos del inventario forestal

Introducción

El Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) inició a finales del 1988 la elaboración del "Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya" con la intención de hacer un estudio completo y actual de los recursos forestales de la zona, no sólo desde el punto de vista "productivo", sino también desde un punto de vista más ecológico, es decir estructural y funcional. Así, por ejemplo se toman muestras de acumulación de biomasa, producción, hojarasca del suelo, de área transversal de albura, de contenido de nutrientes, etc.

En este inventario se toman datos aleatoriamente a razón de una estación de muestreo (de 20 m de diámetro) cada km² de superficie forestada. Las superficies forestadas se determinan a partir de fotointerpretación de pares estereoscópicos de escalas 1:18,000, 1:22,000 y 1:30,000. Las estaciones se georreferencian sobre ortofotomapas 1:5,000. Para detalles sobre la metodología de obtención de datos al campo y su tratamiento posterior se puede consultar CREAF (1992a).

VARIABLES DE INTERÉS EN ESTE ESTUDIO

Del conjunto de variables de que se dispone para cada estación se valoró cuáles eran susceptibles de presentar una cierta correlación, con los datos del sensor. Algu-

nas variables, como el diámetro normal o *mean diameter at breast height* (MDBH en adelante) o la densidad de pies, presentaban unas expectativas de correlación muy bajas, ya que un mismo valor puede corresponder a tipo de bosque estructuralmente muy diferentes, de los cuales esperaríamos también una muy diferente respuesta radiométrica; no obstante, pareció oportuno hacer las pruebas, aunque sea como test de coherencia de método, debido a la gran importancia forestal de estas variables.

Las variables con que finalmente abordamos el estudio fueron:

1. área basal total del tronco (m²/ha, en adelante ABT)
2. DBH medio (cm, en adelante simplemente MDBH)
3. índice de área foliar (adimensional o, si se quiere, en [m² de hoja]/[m² de terreno], en adelante LAI)
4. recubrimiento arbóreo (tanto por uno, en adelante CC)
5. densidad de pies (pies/ha, en adelante densidad)
6. biomasa de madera (t/ha, en adelante BFT)
7. biomasa de corteza (t/ha, en adelante BE)
8. biomasa de ramas (t/ha, en adelante BB)
9. biomasa de hojas (t/ha, en adelante BF)
10. biomasa total (t/ha, en adelante BT)
11. volumen de madera (m³/ha, en adelante VF)

Área de estudio

El estudio se realizó sobre bosques de la comarca del Solsonés, en la parte central de Cataluña. Los trabajos de campo se realizaron entre octubre de 1989 y mayo de 1990. Como hemos dicho, la vegetación forestal predominante en la área volada está compuesta casi exclusivamente por pinos (*Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* ssp. *salzmannii*) aunque se puede encontrar *Quercus ilex* y *Quercus x cerrioides*. Una descripción más completa de este área puede ser encontrada en Bach (Bach 1981) o en CREAM (1992b). En el ámbito del área cubierta por el vuelo se habían mostreado 29 estaciones de campo.

Digitalización de la información de campo

Dada la dificultad de realizar una precisa corrección geométrica de las imágenes (Baulies *et al.*), y dado el carácter piloto del estudio, la referenciación de los datos de campo con la imagen digital se hizo visualmente, sobre el monitor, a partir de la posición conocida de las estaciones sobre los ortofotomapas 1:5,000. Los datos espectrales fueron recogidos como la media de un entorno de 3x3 píxeles para generalizar la radiometría de la zona y disminuir en el posible los errores de posicionamiento de las estaciones. Un procedimiento parecido con imágenes SPOT fue usado en el estudio de Chacón-Torres *et al.* (Chacón-Torres *et al.* 1992).

Banda	Región espectral	Centro	Ancho de banda
1	460.2-488.2	474.20	28.0
2	542.8-555.2	549.00	12.4
3	592.4-604.9	598.65	12.5
4	674.4-681.6	678.00	7.2
5	704.9-713.8	709.35	8.9
6	730.0-738.9	734.45	8.9
7	742.5-751.5	747.00	9.0
8	791.1-809.1	800.10	18.0

TABLA 1
Configuración del sensor (Geobotts) para este estudio (nm)

Datos multispectrales

El sensor

El CASI es un sensor óptico de barrido multispectral basado en un CCD, que puede captar datos en las longitudes de onda que de 430 nm a 950 nm y que permite programar la configuración de las bandas según el interés del usuario (anchura mínima 1.8 nm). El sensor puede operar de dos maneras: en *Spectral mode* y en *Spatial mode*. Para detalles véase Babey y Anger (1989) o Baulies *et al.* en estas mismas comunicaciones.

Configuración de bandas

Para este estudio se utilizó la configuración llamada GEOBOTTTS (Tabla 1), basada en una configuración parecida que había sido experimentada en una campaña CASI llevada a cabo en el Reino Unido para estudios de vegetación en general (Wilson 1989). El *peak SRU* utilizado fue el común en estudios de vegetación con el CASI, igual a 12 SRU para todas las bandas espectrales. Esto implica que en el rango DN [0, 255] disponemos de radiancias comprendidas entre [0, 12] SRU. En el presente estudio hemos adoptado un rango que no sería útil para superficies muy reflectantes, pues saturarían rápidamente el sensor, pero, en cambio, ganan detalle en el rango dinámico de respuesta frecuente en la vegetación. Este aspecto puede ser muy importante, hasta al punto que Danson y Curran (1991), en un estudio con parcelas de *Pinus nigra* var. *maritima*, atribuyen la falta de correlación del XS2 de SPOT con los datos forestales al hecho que sólo disponían de un rango dinámico de 4 DN.

La campaña de vuelo

La campaña de vuelo se llevó a cabo con el CASI instalado a bordo de un avión Cessna Citation del Institut Cartogràfic de Catalunya. La fecha y hora de captura de las imágenes fue el 14 de mayo de 1991 entre las 10 y 11 solares. Se recorrieron 3

pasadas paralelas con un cierto solape entre ellas. La central se realizó de N a S, mientras que las laterales de S a N. En el momento de seleccionar la información, y debido a que las pasadas laterales recubrían la práctica totalidad de las estaciones de campo, se descartó la pasada central (Figura 1).

Las dimensiones de las pasadas finalmente utilizadas fueron de 20 x 2.6 km para la imagen más occidental, que denominaremos LLARIB, y de 14 x 2.6 km para la más oriental, que denominaremos FORADADA; la dimensión de píxel fue de ≈ 5 m. LLARIB contenía 12 estaciones de muestreo de campo y FORADADA 17.

Metodología

Cómo hemos comentado en el apartado 2, hemos abordado el tratamiento de los datos forestales mediante técnicas de regresión múltiple (Ott 1984, Spiegel 1991, Norusis 1985). En nuestro caso, la variable dependiente (Y) ha sido una de las variables ecológico-forestales obtenidas mediante el trabajo de campo. En cada caso hemos hecho cinco ensayos transformando la variable mediante: $\log(Y)$, \sqrt{Y} , $\sqrt[3]{Y}$, Y , Y^2 , Y^3 . Las variables independientes fueron los valores en cada uno de los canales espectrales.

El uso de componentes principales en lugar de las bandas originales carece de sentido en una aproximación mediante regresión múltiple, como puede demostrarse algebraicamente. Por otro lado, y dada la alta colinealidad existente entre las diferentes bandas originales, es necesario realizar los ajustes utilizando aritmética en coma flotante de doble precisión (8 bytes).

Para estimar el grado de ajuste de la regresión lineal hemos utilizado el coeficiente de correlación (R). La significación estadística del ajuste la hemos obtenido a partir de su nivel de significación (p) en la distribución F de Fisher-Snedecor.

En cuanto a la selección de la mejor regresión de entre las posibles, podíamos plantear dos estrategias (Ott 1984): 1/ Calcular todas las posibles regresiones con 1 variable independiente, con 2, etc. hasta las p variables independientes y de entre todo el conjunto seleccionar la mejor. 2/ Evitar el cálculo de todas las regresiones mediante criterios "paso a paso" (*stepwise*, *backward* y *forward*), que sacando y/o añadiendo variables en función de criterios de más correlación, más variancia explicada, etc. Siguiendo la opinión de varios autores (Ott 1984, Frane 1990, Chaterjee 1977, Norusis 1985 y Price 1977) nos hemos inclinado por el primer grupo.

La selección de la mejor combinación de variables independientes (*spectral bands*) no se puede basar únicamente en un criterio de máximo grado de ajuste (má-

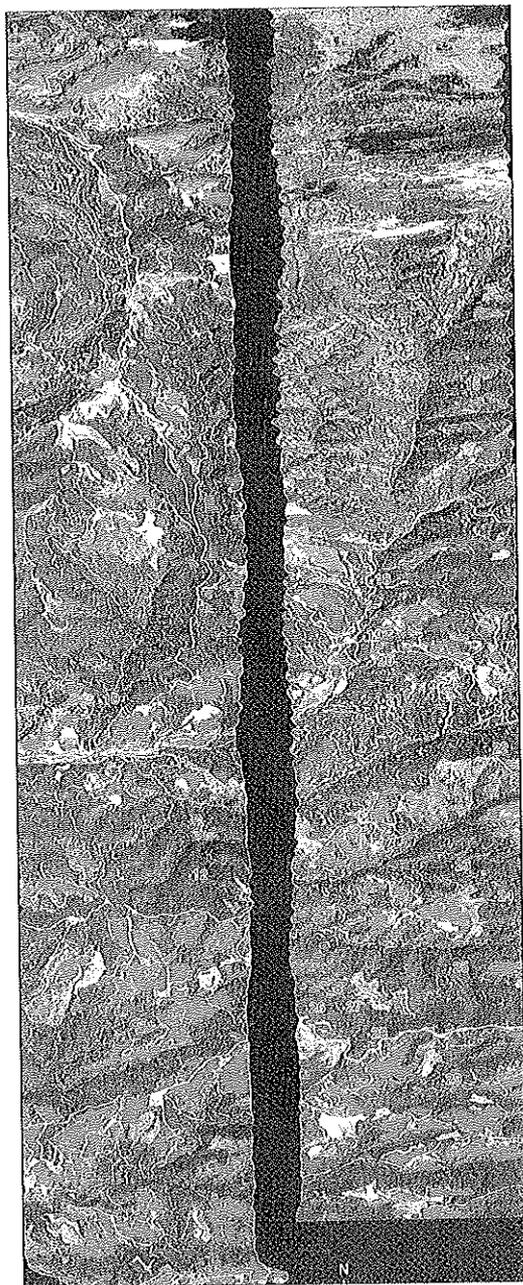


Fig. 1
Pasadas del sensor CAS I de S a N el día 14 de mayo de 1991. (A. 31)

xima R), por lo cual, siguiendo a Ott (1984), Hocking (1972) y Chatterjee y Price (1977), hemos utilizado la Cp de Mallows. Se determina como mejor combinación la que presenta el valor de Cp menor. En nuestro caso, la mínima Cp coincidía en general con las combinaciones que presentaban máxima significación estadística, es decir presentaban un valor de p (Fisher-Snedecor) menor. El estudio de la dispersión de los residuos ha permitido confirmar la naturaleza de los resultados. En todos los casos, y como prueba adicional de fiabilidad, se ha realizado un test comparando la verdad-terreno de un conjunto de estaciones de campo que no habían intervenido en el ajuste con los valores predichos por el ajuste sobre estas estaciones.

Consideraciones radiométricas

Como se comenta en Baulies *et al.*, no se georreferenciaron las imágenes, por lo cual no fue posible efectuar una corrección radiométrica para reducir los efectos de la topografía, aspecto que esperamos tener en cuenta en futuras campañas. A pesar de ello, podemos considerar que las diferentes imágenes son radiométricamente equivalentes, pues fueron captadas correlativamente y en la misma dirección de vuelo (S a N).

Resultados y discusión

Regresión con todos los canales

En este apartado exponemos y discutimos los resultados de los diferentes ensayos que hemos hecho con combinación lineal de canales a partir de los datos ecológico-forestales globales de cada estación. Estos ensayos han sido fundamentalmente cinco. Los tres primeros estudian la extrapolabilidad entre pasadas tomadas con poca diferencia horaria y bajo condiciones atmosféricas similares. El cuarto y quinto estudian la consistencia del hecho de considerar las diferentes pasadas como una única imagen.

Los cinco ensayos fueron:

1. Estudio de una imagen (pasada FORADADA).
2. Estudio de una segunda imagen tomada inmediatamente después y comparación de los resultados con los del ensayo anterior (pasada LLARIB y comparación con FORADADA). Estos dos primeros ensayos permiten comprobar la constancia de los resultados entre los datos forestales y la radiometría de pasadas diferentes.
3. Estudio del ajuste de una imagen cuando se utilizan coeficientes obtenidos sobre otra imagen tomada en las mismas condiciones (aplicación de los coeficientes de FORADADA sobre la imagen LLARIB). Este ensayo permite comprobar la fiabilidad de extrapolar sobre imágenes que no contengan estaciones de campo.

4. Estudio del conjunto de las pasadas considerándolas como una imagen única y comparación de los resultados con los obtenidos en los ensayos 1 y 2 (unión de las dos pasadas, FORADADA y LLARIB para formar el conjunto que denominaremos SOLSONES).
5. Calibración del ensayo anterior (selección de un subconjunto aleatorio para obtener los ajustes definitivos; test sobre las restantes estaciones). Este ensayo constituirá la prueba que definirá el modelo a utilizar para obtener los mapas forestales.

En caso de ofrecer resultados satisfactorios, el conjunto de estos ensayos indicaría que existe una relación coherente entre las imágenes y los datos forestales y, por otro lado, permitiría obtener un modelo operativo, basado en el tratamiento integrado de pasadas independientes tomadas en condiciones similares (extrapolabilidad).

En cada ensayo se ha trabajado alrededor de los siguientes aspectos:

- a. Qué transformaciones de la variable forestal permiten una mejor correlación con los datos radiométricos ($\log(Y)$, EY , EY , Y , Y^2 , Y^3)
- b. Cuál es el grado de ajuste de las diferentes variables. Significación estadística. Selección de la mejor combinación de canales.
- c. Cuáles canales se utilizan en la ecuación de regresión.

Qué transformaciones de la variable forestal permiten una mejor correlación con los datos radiométricos

En los cinco ensayos, las transformaciones que proporcionaban un mejor ajuste se repitieron de forma prácticamente invariable. Estas transformaciones fueron potenciales (Y^3 , Y^2) para el diámetro normal y logarítmicas ($\log[Y]$) para el resto de los casos, a excepción del recubrimiento arbóreo, en donde la no transformación produjo los mejores resultados. En general apreciamos una mayor correlación al hacer transformaciones del tipo logaritmo a los datos. Creemos que esto es debido al hecho de que el comportamiento de la respuesta espectral es "saturante" respecto a la variable biológica, es decir, a partir de un cierto umbral, al crecer el valor de esta, casi no aumenta la respuesta radiométrica (e.g. Tucker 1977; Ripple 1985). Podemos pensar que este fenómeno es lógico por ejemplo para la biomasa de hojas, en que una vez el bosque ha alcanzado una cierta densidad, doblar aquel parámetro casi no hará modificar la respuesta radiométrica. El uso de transformaciones logarítmicas con variables forestales también ha sido utilizado por otros autores, como Ripple *et al.* (1991) con datos del satélite SPOT y datos de volumen de madera.

En el caso de MDBH es lógico que el mejor ajuste se obtenga con los valores forestales elevados al cuadrado o al cubo. En efecto, el sensor capta datos superficiales

y, desde el punto de vista dimensional, para convertir los diámetros a datos superficiales la transformación adecuada es de tipo potencial.

Cuál es el grado de ajuste de las diferentes variables. Significación estadística. Selección de la mejor combinación de canales

La Tabla 2 recoge los resultados de este apartado por lo que respecta a los cuatro primeros ensayos, y la Tabla 3 recoge los resultados para el quinto ensayo (selección aleatoria de 20 estaciones a partir de las cuales obtener los coeficientes definitivos; de esta manera se reservaron 9 estaciones para que sirviesen de test al modelo finalmente usado). En todos los casos se dan los valores correspondientes a la mejor de todas las regresiones posibles, tal como hemos expuesto en el apartado de metodología. En cuanto a las variables MDBH y Dens., se constata que, si bien puede parecer que presentan un ajuste aceptable en los dos primeros ensayos, en el tercero, cuarto y quinto presentan correlaciones no significativas, hecho que era previsible, como hemos comentado anteriormente. En consecuencia, serán rechazadas como variables cartografiadas en este estudio. La falta de correlación de la variable Dens. se pone de manifiesto únicamente cuando se utiliza un conjunto de estaciones independiente de las utilizadas en la fase de ajuste (tercero y quinto ensayos). Este último hecho evidencia la necesidad de efectuar validaciones con fuentes independientes para obtener las máximas garantías de fiabilidad

En cuanto a las nueve variables restantes, es posible construir un modelo de regresión aceptable en la mayoría de casos. En concreto, podemos ver que en el quinto ensayo es posible obtener buenos resultados tanto en el ajuste (20 estaciones) como en el test (9 estaciones), con R entre 0.76 y 0.94 y p en general <0.05.

En este punto, podemos indicar que los presentes resultados parecen mejores que los obtenidos por regresión lineal simple en otros estudios (Danson y Curran 1991, Ripple *et al.* 1991). En el caso de la estudio de Danson y Curran se constata la correlación significativa de parámetros como MDBH o Dens., en que nosotros no hemos encontrado correlación. Esta discrepancia puede ser explicada por el hecho de que estos parámetros están relacionados directamente con la estructura del bosque y, por tanto, con su tratamiento silvícola. El bosque estudiado por estos autores tiene un único propietario, el cual también se encarga de gestionar su explotación. La superficie estudiada por nosotros comprende un área con mucha diversidad estructural y una alta fragmentación de la propiedad, lo que determina diferentes tipos de tratamiento silvícola.

Cuáles se utilizan en la ecuación de regresión

Como resultado de las experiencias realizadas podemos indicar qué canales y, por tanto, qué regiones espectrales, han sido más utilizadas. Creemos que esta informa-

	Ensayo 1 FORADADA (17 estaciones)		Ensayo 2 LLARIB (12 estaciones)		Ensayo 3 LLARIB con coef. de FORADADA (12 estaciones)		Ensayo 4 FORADADA + LLARIB (29 estaciones)	
	R	p	R	p	R	p	R	p
log(TBA)	0.83	0.005	0.96	<0.001	0.89	<0.001	0.85	<0.001
MDBH ^a	0.65	0.061	0.76	0.060	0.49	0.011	0.21	0.269
log(LAI)	0.82	0.002	0.76	0.062	0.68	0.002	0.77	<0.001
CC	0.83	0.001	0.88	0.005	0.72	0.002	0.83	<0.001
log(Dens)	0.77	0.020	0.93	<0.001	0.46	0.008	0.66	0.006
log(WB)	0.76	0.026	0.96	0.009	0.72	0.003	0.79	<0.001
log(KB)	0.78	0.017	0.91	0.008	0.85	0.001	0.81	<0.001
log(BB)	0.83	0.001	0.94	0.011	0.81	<0.001	0.81	<0.001
log(LB)	0.83	0.001	0.95	0.004	0.82	<0.001	0.82	<0.001
log(TB)	0.79	0.015	0.97	0.001	0.80	<0.001	0.82	<0.001
log(WV)	0.76	0.025	0.96	0.003	0.90	<0.001	0.81	<0.001

Tabla 2
Resultados de los primeros cuatro ensayos

ción tiene una importancia de primer orden en la decisión de la configuración de bandas óptima en futuras campañas.

En la Tabla 4 se puede ver las combinaciones de canales seleccionadas como mejores regresiones en todos los ensayos realizados. Se puede observar una alta regularidad en la presencia de canales para cada variable, excepto para MDBH y para Dens.

Obtención de mapas de las variables estudiadas

La posibilidad de hacer mapas a partir de unas muestras de campo e imágenes multispectrales presenta un interés elevado por el grado de objetividad que supone. En este estudio los resultados no pueden ser calificados propiamente de "mapas", ya que las imágenes no han sido corregidas geométricamente.

En cada uno de estos "mapas" el valor de un píxel es el resultado de aplicar una combinación lineal de los canales seleccionados en el ajuste. La incorporación de esta información casi-continua en un sistema de información geográfica de tipo ráster es prácticamente directa. En cambio, para facilitar la lectura de los datos, es preferible discretizar esta información. La Figura 2 recoge los "mapas" de dos de las variables estudiadas (ABT y LAI), en que hemos definido intervalos de clase de interés para el gestor forestal.

	AJUSTE (20 estaciones)		TEST (9 estaciones)	
	R	p	R	p
log(TBA)	0.80	0.002	0.94	<0.001
MDBH ²	0.47	0.122	0.37	0.416
log(LAI)	0.84	0.006	0.86	0.088
CC	0.76	0.003	0.87	0.010
log(Dens)	0.76	0.020	0.29	0.119
log(WB)	0.79	0.004	0.77	0.007
log(KB)	0.81	0.006	0.83	0.002
log(BB)	0.80	0.003	0.84	0.033
log(LB)	0.82	0.002	0.87	0.024
log(TB)	0.80	0.003	0.86	0.002
alog(WV)	0.80	0.003	0.86	0.002

Tabla 3
Resultados del quinto ensayo

Lógicamente, los píxeles situados fuera de las áreas forestales (básicamente espacios agrícolas) presentaran valores absurdos por lo cual hemos elaborado, con técnicas de clasificación, máscaras para cubrirlos (en color ocre claro).

Conclusiones

Los resultados obtenidos sugieren que la cartografía de variables forestales de tipo continuo como ABT, LAI, CC, BFT, BE, BB, BF, BT y VF puede ser abordada con datos del sensor CASI, al menos bajo las condiciones y configuración espectral de esta campaña. Las técnicas de regresión lineal múltiple han permitido obtener valores de R entre 0.76 y 0.94, ($p < 0.05$); consideramos que estos resultados son satisfactorios por el hecho de que se trata de variables biológicas, de obtención costosa y difícil con las técnicas forestales tradicionales. Las variables MDBH y Dens., tal como era previsible por la diversidad estructural de nuestros bosques, no han presentado buenas correlaciones con las variables radiométricas.

La aplicabilidad en trabajos de cartografía extensivos precisa de imágenes georreferenciables con facilidad. Debido a que la georreferenciación de las imágenes aerotransportadas es compleja, la óptima corrección de las distorsiones requiere disponer de parámetros de posición y actitud del sensor asociados a las *scanlines*. Los avances en sistemas GPS integrados durante el vuelo y el registro de *roll*, *pitch* y *yaw* sugieren una rápida mejora de este problema.

*Aplicaciones del sensor CASI en la realización
de inventarios forestales: Aspectos metodológicos y resultados*

Banda	Dens.				WB				KB				BB			
	F	L	S	SA	F	L	S	SA	F	L	S	SA	F	L	S	SA
1		*		*		*						*				
2	*		*	*	*	*			*	*	*	*				*
3	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*		
4					*	*		*		*			*		*	*
5	*	*	*		*		*	*	*		*	*	*	*	*	*
6				*	*	*								*		
7			*	*									*	*	*	*
8	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*		*		

Banda	TBA				MDBH				LAI				CC			
	F	L	S	SA	F	L	S	SA	F	L	S	SA	F	L	S	SA
1		*			*	*					*	*				
2	*		*	*	*	*		*	*		*	*				*
3	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*
4									*	*	*	*	*			*
5	*	*	*	*					*	*	*	*	*	*	*	*
6					*				*							
7									*	*	*	*	*			*
8	*	*	*	*			*						*	*		*

Banda	LB				TB				WV			
	F	L	S	SA	F	L	S	SA	F	L	S	SA
1					*				*			
2					*	*					*	*
3		*			*	*	*	*	*	*	*	*
4	*		*	*	*			*	*			
5	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*
6				*	*				*			
7	*		*	*	*				*	*		
8		*			*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 4

Mejores combinaciones de las bandas espectrales para regresión lineal múltiple.

F: FORADADA (ensayo 1); L: LLARIB image (ensayo 2);

S: FORADADA + LLARIB images (ensayo 4);

SA: Random selection of 20 stations from FORADADA + LLARIB images (ensayo 5)

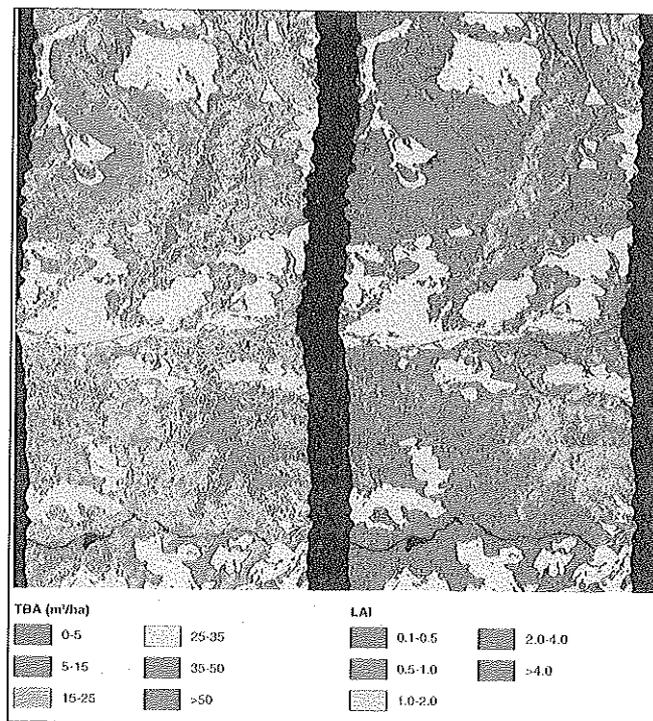


Figura 2
"Mapas" de dos de las variables, ABT y LAI, correspondientes a una subescena del área estudiada. (A. 32)

De las diversas pruebas efectuadas parece que un número de estaciones entre 17 y 20 supone una muestra significativa para la obtención de correctas ecuaciones de regresión múltiple en un área como la estudiada, de unas 7800 ha. Creemos que los resultados obtenidos están también ligados a la dimensión del píxel utilizado (5 m), aunque sería necesario estudiar la posibilidad de trabajar con otras resoluciones espaciales.

Agradecimientos

Carles Franquesa (ICC) nos ha ayudado en la parte informática. Vicenç Pala y Roman Arbiol (ICC) nos han ayudado a enriquecer el contenido del presente trabajo. Carles Gracia y Joan Josep Ibàñez (CREAF) nos han facilitado el acceso a los datos del inventario y nos han orientado en diversos aspectos. La Direcció General de Universitats de la Generalitat de Catalunya ha contribuido a la realización de este proyecto con una beca de formación de investigadores concedida a Xavier Pons.

Bibliografía

- Babey, S.K. and Anger:** 1989. A Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI), *Proceedings of the IGARSS*, vol. 2, pp. 1028-1031.
- Bach, A.:** 1981. El Solsonès. In *Gran Geografia Comarcal de Catalunya*, edited by M. Cabner. (Barcelona: Fundació Enciclopèdia Catalana), vol. 2, pp. 350-375.
- Baulies, X., Arbiol, R., Franquesa, C., Palà, V. y Viñas, O.:** La campaña CASI en Cataluña: evaluación de un sensor multispectral aerotransportado para la monitorización del territorio. *Actas de la 5ª Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. Las Palmas de Gran Canaria*, Noviembre de 1993.
- Benkelman, C.A., Verbyla, D. and Cohen, W.:** 1992. Application of high resolution digital imagery to forestry studies. *Proceedings of the ASPRS/ACSM Annual Convention, held in Albuquerque, New Mexico, on March 1992*.
- Cavayas, F. and Teillet, P.M.:** 1985. Geometric model simulations of conifer canopy reflectance. *Proceedings of the 3rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, held in Les Arcs, France, on 16-20 December 1985*, ESA SP-247, pp. 183-189.
- Chacón-Torres, A., Ross, L.G., Beveridge, C.M. and Watson, A.I.:** 1992. The application of SPOT multispectral imagery for the assesment of water quality in Lake Patzcuaro, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 587-603.
- Chatterjee, S. and Price, B.:** 1977. *Regression Analysis by Examples* (New York: J. Wiley & Sons).
- Cihlar, J., St-Laurent, L. and Dyer, J.A.:** 1991. Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and Ecological Variables. *Remote Sensing of Environment*, 35, 279-298.
- Cohen, W.B. and Spies, T.A.:** 1992. Estimating Structural Attributes of Douglas-Fir/Western Hemlock Forest Stands from Landsat and SPOT Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 41, 1-17.
- CREAF:** 1992a. *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Mètodes* (Bellaterra: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals).
- CREAF:** 1992b. *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. El Solsonès* (Bellaterra: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals).
- Danson, F.M. and Curran, P.J.:** 1991. Structural controls on the remotely sensed response of coniferous forest plantation. *Proceedings of 5th International Colloquium of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, held in Courchevel, France, on 12-14 Jan. 1991*, ESA SP-319, pp. 605-609.
- Foody, G.M.:** 1992. A Fuzzy Sets Approach to the Representation of Vegetation Continua from Remotely sensed Data: an Example from Lowland Heath. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 58, 221-225.
- Frane, J.:** 1990. All Possibles Subsets Regression. In *BMDP Statistical Software*, edited by W.J. Dixon, (Berkeley: University of California Press), pp. 993-1007.
- Gholz, H.L.:** 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology*, 63, 469-481.
- Hocking, R.R.:** 1972. Criteria for selection of a subset regression: wich one should be used. *Technometrics*, 14, 967-970.
- Norusis, M.:** 1985. *SPSSx. Advanced statistics guide* (New York: McGraw-Hill).
- Ott, L.:** 1984. *An introduction to statistical methods and data analysis* (Boston: PWS-KENT Publishing Company).

- Ripple, W.J.:** 1985. Asymptotic reflectance characteristics of grass vegetation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 51, 1915-1921.
- Ripple W.J., Wang, S., Isaacson, D.L. and Paine, D.P.:** 1991. A preliminary comparison of Landsat- TM and Spot-1 HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1971-1977.
- Running, S.W., Peterson, D.L., Spanner, M.A. and Teuber, K.B.:** 1986. Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology*, 67, 273-276.
- Sader, S.A., Waide, R.B., Lawrence, W.T. and Joyce, A.T.:** 1989. Tropical Forest Biomass and Successional Age Class Relationships to a Vegetation Index Derived from Landsat TM Data. *Remote Sensing of Environment*, 28, 143-156.
- Spiegel, M.R.:** 1991. Estadística. McGraw Hill. Madrid. 556 pág.
- Spanner, M.A., Acevedo, W., Teuber, K.W. and Running, S.W.:** 1984. Remote sensing of the leaf area index of temperate coniferous forests. *Proceedings of 1984 Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, 12-14 June*. (Purdue University, West Lafayette, IN), pp. 362-369.
- Tucker, C.J.:** 1977. Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance. *Applied optics*, 16, 1151-1157.
- Waring, R.H.:** 1983. Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. In *Advances in Ecological Research*, edited by A. MacFadyen and E.D. Fords (New York: Academic), vol. 13, pp. 327-354.
- Wilson, A.K.:** 1989. The NERC 1989 Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) Campaign. *Proceedings NERC Workshop on Airborne Remote Sensing*, pp. 259-283.