

NUEVAS ALTERNATIVAS EN LA PRODUCCIÓN DE MAPAS PARA EL MANEJO FORESTAL

Elvecio Pernía, Otto Jurgenson y Juan López

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,
Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos, Mérida-Venezuela. E-mail: epernia@forest.ula.ve

RESUMEN

En Venezuela se aprecia una gran carencia de la información cartográfica requerida para el manejo sustentable de los recursos forestales. El elevado avance tecnológico alcanzado en las dos últimas décadas en los sistemas de percepción remota, los sistemas de posicionamiento global, los sistemas de extracción y análisis de información geoespacial y las capacidades de las computadoras personales, estaciones de trabajo y periféricos gráficos plantea acometer la revisión de las alternativas viables para la producción cartográfica en general. El sector forestal puede sacar mucho provecho de estas oportunidades, en beneficio del manejo sustentable de los bosques naturales y plantados.

En el presente artículo se revisan los factores más determinantes en las metodologías que deben abordarse para la producción de los mapas forestales, tendiendo más que todo al uso de procedimientos digitales. Especial atención se da a la influencia que tienen las variaciones topográficas del terreno y la altura y ángulo de visión del sensor, sobre los desplazamientos que se presentan en las imágenes de percepción remota de mayor uso en aplicaciones forestales para el momento. Finalmente se esboza la metodología general para la producción digital de mapas forestales.

Palabras clave: imágenes de percepción remota, fotogrametría digital, rectificación, ortoimagen, mapas forestales.

ABSTRACT

In Venezuela, it is observed a lack of the cartographic information required for the sustainable management of the forest resources. The high scientific and technologic advances reached during the last two decades regarding the remote sensing systems, the global positioning system, the systems for the extraction and analysis of geospatial information, and in computers and graphic peripherals, poses to undertake the revision of the viable alternatives for the cartographic production in general. The forestry sector can take advantage of these opportunities, for the benefit of the sustainable management of natural forests and plantations.

In this paper, the major factors influencing the methodologies that must be undertaken for the forest map production are revised. Special attention is given to the influence that the topographic variations and the altitude and viewing angle of the sensor have on the displacements observed on the remote sensing images mostly used in forestry applications at this moment. Finally, the general methodology for the digital production of forest maps is outlined.

Key words: remote sensing images, digital photogrammetry, rectification, orthoimage, forest maps.

INTRODUCCIÓN

En la evaluación y el manejo de los recursos forestales son necesarios tanto los mapas básicos planimétricos y planialtimétricos como los mapas temáticos de varias disciplinas. Unos y otros se combinan con la información específica de las actividades forestales para producir lo que podría denominarse “mapas forestales”.

En Venezuela, la mayoría de las áreas forestales no cuentan con información cartográfica actualizada, ni siquiera de tipo básico. La información temática en las escalas adecuadas para el manejo es escasa (Pernía, 1996). Esto significa que hay un gran volumen de trabajo por hacer para la actualización,

en unos casos, y la preparación completa en otros casos, de los mapas básicos y temáticos que han de servir de soporte para las actividades de evaluación y manejo eficiente de los recursos forestales.

Afortunadamente, la tecnología moderna pone al servicio de esta tarea insumos y herramientas valiosas para la preparación y la utilización de los documentos cartográficos necesarios. En primer lugar, variados tipos de instrumentos sensores, instalados en plataformas aéreas y espaciales, proporcionan imágenes mono y multiespectrales, formadas con energía electromagnética visible, infrarroja y microondas, y de diverso poder de

resolución espacial, para satisfacer las demandas de diferentes niveles de información. En segundo lugar, los sistemas de posicionamiento satelital (GPS, por ejemplo) constituyen un medio excepcionalmente útil para obtener las coordenadas de puntos del terreno que servirán para la corrección geométrica de las imágenes. En tercer lugar, los sistemas de fotogrametría digital y los de procesamiento digital de imágenes, aprovechando los impresionantes avances de las computadoras y de los periféricos gráficos, aportan medios eficaces para realizar numerosas correcciones y mejoras a las imágenes digitales y para la extracción de la información que ellas contienen. Por último, los sistemas de información geográfica (SIG) complementan favorablemente este panorama, permitiendo la organización y análisis de los datos con amplio grado de complejidad, para proporcionar valiosos resultados numéricos y gráficos que facilitan la toma de decisiones en el manejo de los recursos forestales.

Con esta gama de insumos y herramientas disponible, conviene revisar algunas alternativas nuevas, de tipo digital que podrían darse para la preparación de mapas básicos y forestales. Estas alternativas van a depender de los siguientes factores: 1) La escala de los mapas deseados (nivel de detalle), 2) Las características de las imágenes disponibles: resolución espacial y espectral, la distancia focal y la ubicación e inclinación del sensor, 3) Las tolerancias o errores permisibles en el mapa, 4) Las variaciones topográficas del terreno, y 5) La tecnología de producción cartográfica disponible.

La escala de los mapas deseados (Nivel de detalle)

Los organismos encargados de la planificación forestal (Agencias o Servicios Forestales) utilizan muchas veces mapas de escala 1:250.000 o menores, para la evaluación de los recursos forestales y la formulación de políticas de aprovechamiento y conservación de esos recursos a nivel nacional o regional. Al contrario, el manejo forestal propiamente dicho requiere mapas de diferente escala y nivel de detalle, pero generalmente mayor de 1:100.000.

Mapas de escalas 1:50.000-1:100.000 se utilizan para mostrar de manera general las características geográficas, físicas, naturales y sociales de las unidades de manejo forestal, y las actividades que

en ellas se realizan. Mapas a escalas mayores de 1:25.000 son recomendables para mostrar los tipos de bosque en base a características fisiográficas y fisiognómico-estructurales, planificar actividades de manejo y plasmar sus resultados. Información detallada sobre las especies y volumen comercial es agregada en los mapas forestales de escala mayor de 1:15.000. La escala de preparación de un mapa forestal en un determinado caso será seleccionada en función de la extensión de la unidad y de la naturaleza de la actividad a desarrollar. Por ejemplo, los mapas sobre los cuales se planifica y se muestran los resultados de un inventario de explotación de compartimientos o rodales forestales generalmente se preparan a escala mayor de 1:5.000.

Imágenes de percepción remota disponibles para la elaboración de mapas forestales

Las fotografías aéreas convencionales, tomadas por las cámaras fotogramétricas o cartográficas, siguen siendo muy útiles en la preparación de mapas básicos y temáticos de escalas mayores de 1:50.000. Ellas han venido siendo sustituidas por las fotografías espaciales (Cuadro 1), a partir del momento en que la tecnología fotográfica espacial, desarrollada con fines militares en las décadas 60, 70 y 80, fue puesta al servicio de los fines civiles, y por las imágenes de sensores óptico-electrónicos montados en satélites (Cuadro 2), a medida que éstos han aumentado el poder de resolución. Pero, por muchos años, las fotografías aéreas seguirán brindando sus beneficios, sobre todo para los mapas básicos y temáticos de nivel detallado y superdetallado. Las fotografías aéreas tomadas con cámaras profesionales y aún las familiares, de 35 y 70 mm de formato, a través de lo que se conoce como sistemas aerofotográficos de pequeño formato, también continuarán siendo útiles en la evaluación de los recursos ambientales y forestales, sobre todo de áreas de poca extensión (menores de 20.000 ha) (Pernía, *et al.*, 1994; Pernía, 1997).

Los sistemas de video constituyen ya un medio valioso de preparar mapas temáticos. Si bien hoy día estos sistemas siguen marcados por la desventaja de tener menor poder de resolución espacial que los sistemas fotográficos, es indudable que el avance tecnológico en video los llevará a mejorar sustancialmente esta característica. También son muy evidentes las ventajas que ellos ofrecen en

CUADRO 1. Características más importantes de las cámaras rusas para la toma de fotografías desde el espacio (Autometric Incorporated, 1993).

Tipo de cámara	Long. focal (mm)	Resolución (m)	Escala promedio	Tamaño de imagen (cm)	Área x imagen (Km)	Bandas espectrales (µm)
C. de alta resolución KRV-1000	1.000	2	1:220.000	18 x 18	40 x 40	Pancromática: 0,5 - 0,7
Cámara topográfica TK-350	350	10	1:660.000	30 x 45	200 x 200	Pancromática: 0,5 - 0,7
Cámara multispectral KFA-1000	1.000	4-7	1:270.000	30 x30	80 x 80	0,57 - 0,68 y 0,68 - 0,81
Cámara multispectral MK-4	300	6	1:650.000 - 1:1.500.000	18 x 18	120 x 120	0,46-0,50; 0,51-0,56 0,58-0,80; 0,63-0,69
Cámara pancromática KATE-200	200	15-30	1:1.000.000	18 x 18	180 x 180	0,50-0,60; 0,60-0,70 0,70-0,85.

CUADRO 2. Características más importantes de los sistemas óptico-electrónicos de percepción remota espaciales, que mayor utilidad pueden tener para Latinoamérica.

Sensor	Satélite	País	Resoluc. espectral (µm): Bandas	Res. Espac.	Visión	Frec. pasada	Res. Temp	Área Imag. (Km)
MSS	LANDSAT 1-5	EE. UU	0,5-0,6; 0,6-0,7; 0,7-0,8 y 0,8-1,1	80 m	Nadiral	18 días	18 días	185x185
TM	LANDSAT 4 y 5	EE. UU	0,45-0,52; 0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,90; 1,55-1,75; 2,08-2,35 y 10,4-12,5	30 m 30 m 120 m	Nadiral	16 días	16 días	185x185
ETM	LANDSAT 7 (Programado para 1998)	EE. UU	0,45-0,52; 0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,90; 1,55-1,75; 2,08-2,35 y 10,4-12,5 Banda Pancromática: 0,5-0,9	30 m 30 m 60 m 15 m	Nadiral	16 días	16 días	185x185
HRV	SPOT 1-4	Francia	0,50-0,59; 0,61-0,68; 0,78-0,89	20 m	Nad. y No Nad.	26 días	Mín. 5 días	60 x 60
HRG	SPOT 5 (Programado para 2002)	Francia	0,49-0,61; 0,61-0,68; 0,78-0,89 Banda pancromática: 0,49-0,69	10 m 2 a 5 m	Nad. y No Nad.	26 días	Mín. 5 días	60 x 60
VEGETATION	SPOT 4 y 5	Francia	0,43-0,47; 0,61-0,68; 0,78-0,89 y 1,58-1,75	1 Km	Nad. y No Nad.	26 días	Mín. 5 días	250x250
LISS-1	IRS-1B	India	0,45-0,52; 0,52-0,59; 0,62-0,68 y 0,77-0,86	72 m	Nad.	22 días	22 días	142x142
LISS-2	IRS-1B e IRS-P2	India	0,45-0,52; 0,52-0,59; 0,62-0,68 y 0,77-0,86	36 m	Nad.	22 días	22 días	74 x 74
LISS-3	IRS-1C	India	0,52-0,59; 0,62-0,68; 0,77-0,86 y 1,55-1,70	25 m	Nad.	24 días	24 días	74 x 74
PAN	IRS-1C	India	Banda pancromática: 0,50-0,75	5 m	Nad. y no N.	24 días	5 días	74 x 74
WiFS	IRS-1C	India	0,62-0,68 y 0,77-0,86	180 m	Nad.	24 días	5 días	774x774

comparación con los sistemas fotográficos. Pueden obtener imágenes blanco y negro, color normal e infrarrojo a color y presentarlas en tiempo real, sin necesidad de ningún procesamiento. Las imágenes de video pueden ser incorporadas a un sistema de procesamiento digital de imágenes, para ser organizadas en fajas, corregidas geométricamente y ensambladas para formar mosaicos. Son de gran utilidad en la evaluación de recursos a nivel semidetallado y detallado.

Desde 1972 ha estado operando el programa LANDSAT de EE. UU. que para el año 2002 cumplirá cuatro décadas tomando imágenes de todo el globo terrestre, a través de seis satélites. El programa francés SPOT desde 1986 ha operado cuatro satélites con sensores de tecnología innovadora. Estos son los dos programas espaciales que indudablemente han tenido mayor trascendencia a nivel mundial. El programa hindú IRS (Indian Remote Sensing), que actualmente cuenta con un amplia constelación de satélites, y que ostentó de 1995 a 1999 el récord de resolución espacial de 5,6 metros (IRS-1C) para un sensor óptico-electrónico con fines civiles, ha tenido amplia acogida en Asia, Oceanía, Europa, y Norteamérica. Lamentablemente, este sistema, de alta competitividad, todavía no ha operado en Latinoamérica. El cuadro 2 presenta información sobre los sistemas óptico-electrónicos espaciales con más potencial para la preparación de mapas forestales.

Las tolerancias o errores permisibles en el mapa

La tolerancia o “error que se tolera” en la ubicación planimétrica de los puntos de un mapa se expresa generalmente a través de la distancia máxima que puede aceptarse en la diferencia entre la posición real de un punto y su posición en el mapa. Esa distancia máxima puede expresarse a escala real, es decir a escala del terreno (15 m, por ejemplo) o a la escala del mapa (1,5 mm, a escala 1:10.000, por ejemplo). La tolerancia planimétrica constituye el radio de un **círculo de error** dentro del cual debe caer un determinado porcentaje (95 %, por ejemplo) de puntos verificados (medidos en el terreno y en el mapa).

Las tolerancias que se adoptan en la elaboración de los mapas forestales son mayores que las que rigen la elaboración de los mapas básicos. La tolerancia planimétrica de un mapa base está generalmente

entre 0,2 y 0,3 mm, a la escala de preparación del mapa. En la producción de mapas forestales se presentan las circunstancias y dificultades propias de muchos mapas temáticos. En primer lugar, la mayoría de los mapas temáticos se preparan tomando como referencia los mapas básicos existentes, es decir, la información temática es apoyada o sobrepuesta a la información de los mapas básicos, los cuales contienen el error implícito en su preparación. Por lo tanto, el error total que presenta el mapa temático (e_{mt}) es el resultado de considerar el error del mapa base (e_{mb}) y el error de transferencia (e_t) de los detalles temáticos de las imágenes al mapa base. Estos errores, por ser independientes, se relacionan a través de la siguiente expresión: $(e_{mt})^2 = (e_{mb})^2 + (e_t)^2$. En segundo lugar, la mayor parte de los detalles propios del mapa forestal que corresponden a límites de clases de vegetación y tipos de bosque no tienen una definición clara en las imágenes y muchas veces tampoco en el terreno, por lo que resulta necesario establecer tolerancias mucho mayores que las de los mapas básicos. No existen normas fijas en este sentido, habiéndose establecido diferentes criterios en varios países. Podría tomarse como punto de partida para los mapas de escalas mayores de 1:100.000, la tolerancia, a la escala del mapa, de 1 mm para terreno plano y 1,5 mm para terreno montañoso. Estas tolerancias deben regir únicamente para las líneas que puedan ser claramente definidas en las imágenes con las cuales se prepara el mapa forestal. Los límites ambiguos entre ciertos tipos de bosque no deben ser incluidos dentro de esta norma.

Aceptando la tolerancia de 1 mm para mapas de terreno plano y de 1,5 mm para mapas de terreno accidentado, y considerando el error de preparación del mapa base de 0,3 mm, la aplicación de la fórmula antes enunciada dará como resultado que la tolerancia en la transferencia de los detalles de las imágenes con que se prepara un mapa temático, sobre el mapa base debe ser de 0,95 mm para mapas de terreno plano y de 1,47 mm para mapas de terreno montañoso.

Las variaciones topográficas del terreno y las características del sensor

En terreno plano u “ondulado suave”, la o las imágenes que cubren el área pueden ser consideradas como un plano. Bien porque la imagen haya sido tomada con el eje óptico inclinado, o bien porque el

terreno, aunque siendo plano tenga pendiente, o porque ambas situaciones estén ocurriendo en un determinado caso, el plano representado en la imagen ha de ser nivelado y colocado en un sistema de proyección conveniente y a una escala apropiada.

El nivelado puede ser logrado por un mecanismo de rotación de un plano en el espacio y este mecanismo puede ser analógico o analítico. Rectificadores fotogramétricos tan sencillos como el Sketchmaster, el Zoom transferoscopio y el Procom realizan analógicamente esta operación de manera satisfactoria. Por la vía analítica pueden aplicarse dos soluciones: 1) Usar ecuaciones que describan la geometría proyectiva plana del sistema que creó la imagen, y 2) usar polinomios de primero, segundo o tercer grado para modelar el plano que representa el terreno. Con cualquiera de estas alternativas analíticas, aplicadas sobre la imagen digital, se pretende realizar la rotación y el escalado, lográndose al final una imagen reorganizada que corresponde con el sistema de proyección cartográfico y con la escala de producción.

Puesto que con este procedimiento, en sus formas analógica y analítica, no se realiza ninguna corrección a los desplazamientos del relieve, es de esperar la mayor exactitud del mapa cuando el terreno es plano y horizontal, y en la medida que la superficie se aleja de esta condición, aumentarán proporcionalmente los errores en la posición de los detalles.

Es importante resaltar el marcado efecto que sobre los desplazamientos del relieve introducen algunas características del sensor como la geometría de formación de la imagen y su distancia focal, así como también las condiciones de toma, particularmente, la altura del sensor sobre el terreno y el ángulo de inclinación del eje de visión. Estos factores introducen variaciones significativas en los desplazamientos del relieve que pueden estar presentes en las imágenes, lo que a su vez determina las metodologías y el instrumental (hardware y software) que puede usarse en la producción de los mapas y la exactitud que puede lograrse. A continuación se presenta información cuantitativa que muestra el efecto de los desplazamientos del relieve sobre las imágenes de mayor uso para la evaluación de recursos forestales. Los desplazamientos producidos por el relieve en una imagen obtenida por sensores ópticos u óptico-electrónicos (proyección central) fueron calculados a través de las fórmulas

convencionales, contenidas en la mayoría de los libros de fotogrametría, y las cuales se presentan a continuación:

$$\text{En el terreno: } DR = \Delta h R / H_v ;$$

$$\text{y en la imagen: } dr = \Delta h r / H_v$$

donde: **DR** es el desplazamiento del relieve en el terreno, **dr** es el desplazamiento del relieve en la imagen, **Δh** es la elevación o variación de altura del terreno, **R** es la distancia radial en el terreno, desde el punto central de la imagen hasta el tope de la elevación, **r** es esa misma distancia, pero en la imagen y **Hv** es la altura de vuelo sobre el terreno.

El cuadro 3 contiene los desplazamientos del relieve, en el terreno (DR) y en la imagen (dr), introducidos por diferentes elevaciones del terreno (h), en fotografías aéreas obtenidas con una cámara fotogramétrica de 230 mm de formato, lente de 210 mm de distancia focal (f), operada desde alturas de vuelo (Hr) de 5.250 m sobre el terreno (Escala 1:25.000).

CUADRO 3. Desplazamientos producidos por diferencias del relieve (Δh) en una fotografía aérea tomada con cámara de 210 mm de distancia focal, desde una altura de 5.250 m sobre el terreno, para una escala de 1:25.000.

Δh (m)	r máx. = 13 cm		r máx. = 10.1 cm	
	DR (m)	dr (mm)	DR (m)	dr (mm)
10	6.19	0.25	4.81	0.19
20	12.38	0.50	9.62	0.38
30	18.57	0.74	14.43	0.58
40	24.76	0.99	19.24	0.77
50	30.95	1.24	24.05	0.96
59.5	36.83	1.47	28.62	1.14
60	37.14	1.49	28.86	1.15
70	43.33	1.73	33.67	1.35
76.5	47.36	1.89	36.79	1.47
80	49.52	1.98	38.48	1.54
90	55.71	2.23	43.29	1.73
100	61.90	2.48	48.10	1.92
120	74.29	2.97	57.71	2.31
150	92.86	3.71	72.14	2.89
200	123.81	4.95	96.19	3.85
250	154.76	6.19	120.24	4.81
300	185.71	7.43	144.29	5.77
400	247.62	9.90	192.38	7.70
500	309.52	12.38	240.48	9.62

En el cuadro indicado DR y dr constituyen los desplazamientos máximos, equivalentes a los errores que se cometerían al asumir como plano un terreno con elevaciones de magnitud h. Estos errores máximos se producirán en las esquinas de las fotografías, es decir, a una distancia radial máxima de 13 cm, a partir del centro de las fotografías (tomando en consideración valores normales para el solape y el traslape de 60 y 20 % respectivamente). Este es el caso en que se usa toda el área de las fotografías alternas para realizar la delineación (Pernía, 1989).

En el cuadro 3 puede apreciarse que las variaciones de 100 m en la altura de la superficie del terreno producen desplazamientos máximos de 62 m, los cuales introducen un error máximo en la posición relativa de un punto de 2,48 mm, a la escala 1:25.000. Este error resulta bastante alto para la elaboración del mapa. Si deseamos mantener el error total del mapa temático por debajo de 1,5 mm (el error de transferencia = 1,47 mm), bajo la asunción de que el terreno es plano, las variaciones del relieve no deben exceder de 59,5 m. Una alternativa que permite trabajar con variaciones del relieve un poco mayores sería usar en la delineación el área central de cada fotografía, en lugar de toda el área de las fotografías alternas (Figura 1). Usando el área central, las esquinas del área delineada quedarán ubicadas a aproximadamente 10,1 cm, y en este caso se podrían aceptar variaciones hasta de 76,5 m (para mantener el máximo desplazamiento radial en 1,47 mm).

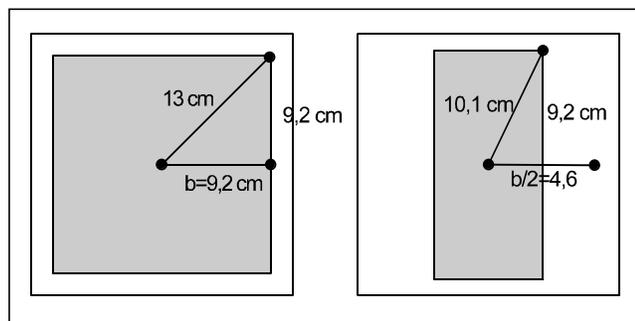


FIGURA 1. “Área útil de delineación” en fotografías aéreas verticales estereoscópicas, para terreno plano (izq.) y para terreno accidentado (derecha), bajo condiciones normales de solape (60%) y traslape (20%).

Lo anterior indica que para las condiciones de toma dadas ($H_v = 5.250$ m y $f = 210$ mm), la asunción de que el terreno es plano y que pueden utilizarse

procedimientos e instrumentos que permitan la rotación de ese plano, es válida solamente cuando las diferencias de altura son menores de 76,5 m.

Para fotografías de escala 1:50.000, obtenidas con esa misma cámara, pero desde 10.500 m de altura sobre el terreno (Cuadro 4), un desnivel del terreno de 100 m genera un desplazamiento máximo de 1,24 mm, que equivale a 61,9 m en el terreno, para puntos ubicados a 13 cm del centro de la fotografía, es decir, cuando se delinea en toda el área de las fotografías alternas. Si las elevaciones alcanzan desniveles de 119 m el desplazamiento máximo sería de 1,47 mm (73,7 m en el terreno) que se ha asumido como el máximo error permisible por este concepto. Pero, de nuevo, si se usa el área central de todas las fotografías para la delineación ($r_{\text{máx}} = 10,1$ cm), entonces podría considerarse como plano un terreno con desniveles de 153 m, que producirían desplazamientos de 94,7 m en el terreno y 1,47 mm en el mapa.

CUADRO 4. Desplazamientos producidos por diferencias del relieve (Δh) en una fotografía aérea tomada con cámara de 210 mm de distancia focal, desde una altura de 10.500 m sobre el terreno, para una escala 1:50.000.

Δh (m)	r máx. = 13 cm		r máx. = 10,1 cm	
	DR (m)	dr (mm)	DR (m)	dr (mm)
10	6.19	0.12	4.81	0.10
20	12.38	0.25	9.62	0.19
30	18.57	0.37	14.43	0.29
40	24.76	0.50	19.24	0.38
50	30.95	0.62	24.05	0.48
60	37.14	0.74	28.86	0.58
70	43.33	0.87	33.67	0.67
80	49.52	0.99	38.48	0.77
90	55.71	1.11	43.29	0.87
100	61.90	1.24	48.10	0.96
119	73.67	1.47	57.23	1.14
120	74.29	1.49	57.71	1.15
150	92.86	1.86	72.14	1.44
153	94.71	1.89	73.59	1.47
200	123.81	2.48	96.19	1.92
250	154.76	3.10	120.24	2.40
300	185.71	3.71	144.29	2.89
400	247.62	4.95	192.38	3.85
500	309.52	6.19	240.48	4.81

Es interesante revisar ahora el efecto que causan los desplazamientos del relieve en imágenes tomadas por sensores que operan desde el espacio. Para ello se tomará como ejemplo el sistema SPOT (Systeme Pour l'Observation de la Terre) el cual ha estado en operación desde 1986. SPOT sensa el terreno en modo pancromático y en modo multispectral, obteniendo imágenes en este último caso en tres bandas espectrales. La distancia focal de los instrumentos HRV de SPOT es de 1.080 mm. Este sistema utiliza visión vertical o nadiral y visión oblicua. Con visión nadiral el área sensada en cada imagen es de 60 km por 60 km. Con visión oblicua los instrumentos HRV de SPOT miran el terreno dentro de una amplia franja de 950 km, llegando a ser el ancho de la faja sensada de 80 km, cuando la visión es más inclinada (a 475 km de la proyección de la órbita sobre el terreno).

El cuadro 5 presenta los desplazamientos máximos producidos por elevaciones del terreno de diferente altura, tanto en tamaño real como en imágenes pancromáticas HRV de SPOT, obtenidas con visión nadiral e inclinada, para las escalas 1:50.000 y 1:100.000. Puede verse que los desplazamientos en la imagen nadiral son sumamente pequeños, en comparación con los desplazamientos observados en los casos anteriormente citados de las fotografías aéreas. Una elevación de 100 m, por ejemplo, causa tan sólo 3,61 m de desplazamiento en el terreno, el cual a las escalas 1:50.000 y 1:100.000, será de 0,07 mm y 0,04 mm respectivamente. Aun elevaciones de 1.000 m producirán desplazamientos de 36,10 m en el terreno y de 0,72 mm y 0,36 mm a escalas 1:50.000 y 1:100.000 respectivamente. Estos desplazamientos son completamente aceptables en mapas forestales, en los que el error máximo puede fijarse en 1,5 mm y el error de transferencia de los detalles de la imagen SPOT al mapa base en 1,47 mm. Puede determinarse que para que el desplazamiento máximo sea de 1,47 mm, cuando se asume como plano un terreno quebrado, éste puede tener diferencias máximas de elevación de 2.036 m, si la escala va a ser 1:50.000 y de 4.072 m, si la escala va a ser 1:100.000. Esta favorable situación se debe, en primer lugar, a la gran altura de la órbita, que en este caso es de 830 km, a la visión nadiral y a la distancia focal de 1.080 mm.

El cuadro 5 muestra asimismo los desplazamientos producidos en las imágenes SPOT

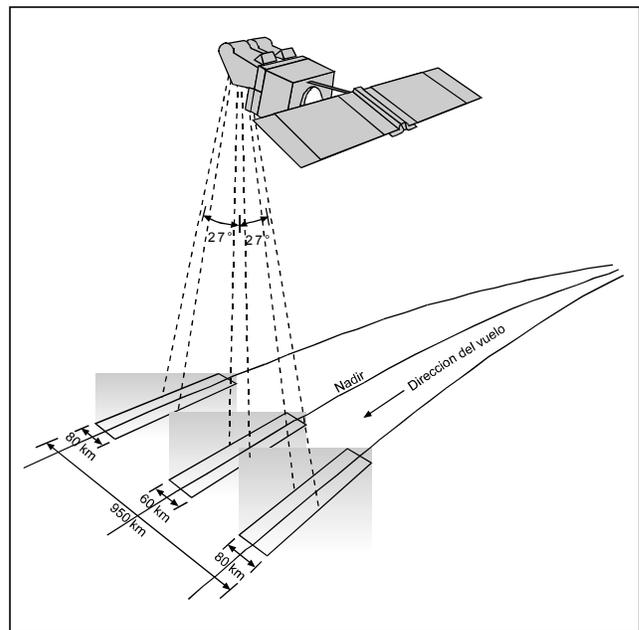


FIGURA 2. Perspectiva de la operación de los instrumentos HRV del satélite SPOT, en visión nadiral y no nadiral de las fajas sensadas del terreno (Adaptado de Lillesand y Kiefer, 1994).

tomadas con visión inclinada, para puntos del terreno que quedan a 100 km ($06^{\circ} 52,2'$ a partir de la vertical) y a 450 km ($28^{\circ} 27,9'$) de la proyección de la órbita. Puede apreciarse ahora que los desplazamientos aumentan considerablemente a medida que la inclinación de la visión aumenta y los puntos del terreno quedan más alejados de la proyección de la órbita, en comparación con el caso de las imágenes tomadas con visión nadiral. Elevaciones del terreno de 100 m producen desplazamientos de 0,24 mm y 0,12 mm a las escalas 1:50.000 y 1:100.000 respectivamente, cuando el punto está a 100 km de la proyección de la órbita. Para lograr un error máximo de 1,47 mm en la transferencia de los detalles sólo podrá asumirse como plano un terreno de elevaciones máximas de 610 m, cuando la escala del mapa a producir es de 1:50.000 y de 1.220 m cuando la escala del mapa a producir es de 1:100.000. Cuando el punto está ubicado a 450 km de la proyección de la órbita, una elevación de 100 m en el terreno produce desplazamientos de 1,08 mm y 0,54 mm, en las escalas 1:50.000 y 1:100.000 respectivamente. En este caso, el error máximo de 1,47 mm será alcanzado por elevaciones máximas de tan solo 135 m para la escala de 1:50.000 y de 271 m para la escala 1:100.000.

CUADRO 5. Desplazamientos máximos producidos por el relieve que ocurren en imágenes HRV de SPOT de tipo pancromático, tomadas verticalmente e inclinadas.

Δh (m)	Visión nadiral			V. inclinada (6° 52,2' de la vert.)			V. inclinada (28° 27,9' de la vert.)		
	DR máx¹ (m)	dr (mm)		DR máx² (m)	dr (mm)		DR máx³ (m)	dr (mm)	
		1:50.000	1:100.000		1:50.000	1:100.000		1:50.000	1:100.000
10	0,36	0,01	0,00	1.21	0.02	0.01	5.42	0.11	0.05
20	0,72	0,01	0,01	2.41	0.05	0.02	10.84	0.22	0.11
50	1,81	0,04	0,02	6.02	0.12	0.06	27.11	0.54	0.27
100	3,61	0,07	0,04	12.05	0.24	0.12	54.22	1.08	0.54
150	5,42	0,11	0,05	18.07	0.36	0.18	81.33	1.63	0.81
200	7,20	0,14	0,07	24.10	0.48	0.24	108.43	2.17	1.08
250	9,03	0,18	0,09	30.12	0.60	0.30	135.54	2.71	1.36
300	10,83	0,22	0,11	36.15	0.72	0.36	162.65	3.25	1.63
400	14,44	0,29	0,14	48.19	0.96	0.48	216.87	4.34	2.17
500	18,10	0,36	0,18	60.24	1.21	0.60	271.08	5.42	2.71
600	21,66	0,43	0,22	72.29	1.45	0.72	325.30	6.51	3.25
700	25,27	0,51	0,25	84.34	1.69	0.84	379.52	7.59	3.80
800	28,88	0,58	0,29	96.39	1.93	0.96	433.73	8.67	4.34
1.000	36,10	0,72	0,36	120.48	2.41	1.21	542.17	10.84	5.42
1.200	43,32	0,87	0,43	144.58	2.89	1.45	650.60	13.01	6.51
1.400	50,54	1,01	0,51	168.68	3.37	1.69	759.04	15.18	7.59
1.500	54,20	1,08	0,54	192.77	3.86	1.93	867.47	17.35	8.67
1.800	64,98	1,30	0,65	216.87	4.34	2.17	975.90	19.52	9.76
2.000	72,00	1,44	0,72	240.96	4.82	2.41	1084.34	21.69	10.84

¹ DR máx. Ocurre: a R = 30 Km al este o al oeste de la proyección de la órbita, ² a R = 100 Km al este o al oeste de la proyección de la órbita, y ³ a R = 450 Km al este o al oeste de la proyección de la órbita

Esto indica que las características del sensor tales como la altura de operación, la distancia focal y el tipo de visión son sumamente influyentes en los desplazamientos que introduce el relieve del terreno y por ende determinan los procedimientos y el instrumental a ser utilizados en la producción de los mapas. Por ejemplo, una imagen SPOT tomada con visión vertical podría utilizarse para producir un mapa forestal a escala 1:50.000 con procedimientos aplicables al terreno plano, aún cuando el terreno tenga diferencias de altura de 2.036 m (aceptando un error de transferencia de 1,47 mm). Sin embargo, si la imagen fue tomada oblicuamente, para puntos que quedan a 100 km de la proyección de la órbita, los procedimientos de terreno plano son válidos únicamente si las elevaciones del terreno son de 610 m. Si por el contrario, la imagen fue tomada con mucha inclinación, quedando puntos a 450 km de la proyección de la órbita, los procedimientos de terreno plano son válidos para producir un mapa a escala 1:50.000 sólo si las elevaciones son menores de 135 m.

Cuando las condiciones de toma de una imagen y las elevaciones del terreno producen desplazamientos mayores a los que pueden manejarse por los métodos aplicables al terreno plano no queda otra posibilidad para la producción de un mapa que recurrir a los procedimientos de producción fotogramétrica basados en la recreación de la geometría proyectiva tridimensional del sensor que formó la imagen. Estos procedimientos toman en consideración el relieve topográfico del terreno y la inclinación de la visión del sensor, y corrigen los desplazamientos introducidos en la imagen por estos factores.

Antes de la era de la computación esta posibilidad era manejada únicamente a través de instrumentos fotogramétricos ópticos, mecánicos u óptico-mecánicos. A partir de los 60 y hasta mediados de los 80, gran parte del proceso de elaboración de mapas, particularmente lo correspondiente a la extensión del control terrestre a través de las técnicas de triangulación fotogramétrica, pasó a realizarse por procedimientos analíticos. La restitución siguió

realizándose casi siempre por método analógicos. Pero, desde mediados de los 80, y en particular en los 90, la fotogrametría digital para el proceso completo de producción de mapas, a partir de fotografías aéreas y espaciales o imágenes óptico-electrónicas tomadas desde satélites, ha venido expandiéndose aceleradamente, tanto en su desarrollo como en su aplicación, aprovechando el extraordinario avance de la tecnología de las computadoras personales y de las estaciones de trabajo, y de los periféricos gráficos.

Producción digital de mapas forestales

La producción digital de mapas forestales a partir de imágenes de sensores remotos puede realizarse a través de las fases siguientes, las cuales se muestran, de manera resumida, en el esquema de la figura 3.

1. Digitalización: Las imágenes obtenidas por los sensores remotos óptico-electrónicos son grabadas originalmente en formato digital. Este es el caso de las imágenes MSS y TM de LANDSAT y HRV de SPOT, por ejemplo. Actualmente se están introduciendo las cámaras fotográficas digitales cuyo uso para percepción remota será más frecuente en el futuro. Las imágenes indicadas están ya en el medio conveniente para ser introducidas directamente al sistema de procesamiento digital de imágenes o al sistema de fotogrametría digital donde se realizará el proceso fotogramétrico. Un caso similar es el de las cámaras digitales de video. Las fotografías tomadas por cámaras fotogramétricas convencionales de 230 mm de formato, o las de 35 ó 70 mm de formato, deben ser digitalizadas para ser incorporadas a los sistemas de procesamiento. La digitalización en este caso es realizada por un escáner.

2. Preprocesamiento: Las imágenes obtenidas originalmente en formato digital o las digitalizadas a través de un escáner pueden contener algunos defectos radiométricos, factibles de ser corregidos. Anomalías como puntos o líneas blancas o negras y líneas corridas se corrigen con técnicas apropiadas en el sistema de procesamiento digital de imágenes. Así mismo, el contraste de tonos y colores puede mejorarse sustancialmente. Incluso es posible mejorar la definición de los detalles con la aplicación de filtros especiales (Pernía y López, 1997).

3. Georreferenciación: La georreferenciación tiene como finalidad corregir la geometría de la imagen para hacerla corresponder con la del terreno, en un sistema cartográfico específico. Es una fase crucial en la producción cartográfica, y las técnicas para llevarla a cabo están determinadas en gran medida por las variaciones del relieve topográfico, la inclinación del eje de visión del sensor y la exactitud deseada del mapa.



FIGURA 3. Diagrama de las actividades involucradas en la producción de un mapa forestal, a través de medios digitales.

En terreno plano o de “relieve suave” la georreferenciación de una imagen tomada con visión vertical es relativamente simple, puesto que lo que fundamentalmente se requiere son rotaciones y acomodados de escala. El método comúnmente usado para este propósito se conoce como rectificación y utiliza transformaciones polinómicas, de primero, segundo o tercer orden. Si la imagen fue tomada con inclinación del eje óptico del sensor, es recomendable recurrir a una transformación proyectiva plana que reproduce la geometría proyectiva del sensor que tomó la imagen, y la cual también tiene la forma de un polinomio de primer grado. Todas estas transformaciones se apoyan en puntos de control terrestre cuyas coordenadas pueden ser obtenidas de cartas topográficas, mediciones GPS u de otro medio topográfico o geodésico.

Los procedimientos para aplicar estas transformaciones a la corrección de imágenes de percepción remota han sido ampliamente documentados en la literatura especializada (Chuvieco, 1996, Lillesand y Kiefer, 1994; Jensen, 1996; Mather, 1987; López, 1996). Sin embargo, lo que necesita mayor consideración es el ámbito de aplicación de esta modalidad de georreferenciación al terreno de “relieve suave”, puesto que este término (suave) es relativo, y va a depender de factores del sensor (altura de operación, ángulo de visión, distancia focal) y de la exactitud exigida en el mapa. Estos factores fueron discutidos con amplitud en un aparte anterior del presente artículo. La decisión está en función del error máximo que puede permitirse (tolerancia) por concepto de los desplazamientos introducidos por el relieve, en la transferencia de los detalles de la imagen (no corregida) al mapa base. Si para un caso particular (imagen de características dadas y relieve con determinada variación) los desplazamientos introducidos por el relieve (al usarse un método que asume como plano el terreno) son menores de un umbral aceptado para los mapas forestales (el cual podría ser el de 1,47 mm, considerado anteriormente), la metodología para terreno plano puede aplicarse.

En caso de “terreno accidentado”, la georreferenciación debe hacerse necesariamente a través de un modelo que recree la geometría proyectiva tridimensional (3D) del sensor que tomó la imagen. Para ello se utilizan las técnicas propias de la **fotogrametría digital** (American Society of Photogrammetry, 1996), las cuales son aplicables en esencia

a cualquier tipo de imagen de sensores ópticos u óptico-electrónicos, tomadas desde plataformas aéreas o espaciales. De la misma manera que el término “terreno suave” es relativo, así resulta el término “terreno accidentado”, y conviene entonces definir para un determinado caso a partir de qué magnitud en las variaciones altitudinales del terreno, es necesario considerar el terreno como accidentado y aplicar las técnicas correspondientes.

A través de la fotogrametría digital se puede realizar la georreferenciación de una o varias imágenes de terreno accidentado de dos maneras, dependiendo de los elementos de control terrestre:

- a. Utilizando un conjunto de puntos de control terrestre (PCT), y/o puntos de control obtenidos a través de la triangulación fotogramétrica, para orientar externa e internamente cada imagen. Las imágenes orientadas son utilizadas para crear ortoimágenes digitales con o sin la creación intermedia de un modelo digital del terreno (MDT).
- b. Utilizando un modelo digital del terreno (MDT) existente, el cual sirve para orientar externa e internamente cada imagen. Las imágenes orientadas son utilizadas para crear las ortoimágenes digitales. El MDT puede obtenerse de la digitalización de las curvas de nivel de cartas topográficas.

La georreferenciación de cada imagen involucra dos pasos: el primero consiste en la reorganización geométrica o espacial de la imagen, tomando en cuenta la corrección de los desplazamientos debidos al relieve y a la inclinación del eje óptico del sensor; y el segundo, consiste en la reasignación de las tonalidades adecuadas a las celdas o píxeles cuya ubicación geométrica fue modificada en el primer paso.

El proceso de georreferenciación y la consiguiente generación de la ortoimagen se realiza a través de un software especializado de fotogrametría digital. Algunos paquetes de procesamiento digital de imágenes contienen los módulos necesarios para ese propósito.

4. Extracción de información básica y temática: Una vez realizada la georreferenciación, que conduce a la generación de la imagen digital corregida, ya sea la imagen rectificadas o la ortoimagen, se procede a la extracción de la información básica y

temática, según sea la necesidad. Para la extracción de la información temática generalmente se recurre a un sistema de procesamiento digital de imágenes. En la actualidad hay varias alternativas para la obtención de esta información a partir de imágenes digitales de percepción remota, que dependen de las características del sensor (tipo, altura, inclinación de la visión, etc.), de la naturaleza de los detalles a obtener y del nivel de detalle (general, reconocimiento, semidetallado o detallado). Existen las conocidas técnicas automatizadas, supervisadas y no supervisadas, con diversas variantes, que han sido aplicadas extensivamente en el pasado a imágenes multispectrales obtenidas por los sistemas LANDSAT y SPOT y las cuales han sido abundantemente reportadas en la literatura (Chuvieco, 1996, Lillesand y Kiefer, 1994; Jensen, 1996; Mather, 1987).

También se han desarrollado metodologías para la extracción de información básica y temática utilizando las técnicas convencionales de interpretación visual, pero realizada directamente sobre la imagen digital desplegada sobre la pantalla de un sistema de procesamiento digital de imágenes. Previamente a la interpretación visual, la imagen digital puede ser mejorada considerablemente en definición de los detalles y contraste de los tonos y del color. Estas técnicas de mejoramiento e interpretación pueden ser aplicadas a cualquier tipo de imagen (fotografía aérea, imagen optico-electrónica, etc.), para delinear detalles básicos y temáticos, y han resultado altamente eficientes en trabajos operativos porque aprovechan tanto las bondades del procesamiento digital como la experiencia de los intérpretes (Pernía y López, 1997).

5. Composición cartográfica e impresión:

Dependiendo de las técnicas de extracción de información aplicadas, los detalles puntuales y lineales y las unidades temáticas resultarán definidas en formato vectorial (puntos, líneas y polígonos) o en formato raster (celdas o píxeles). Si a la imagen digital, que es de naturaleza raster, se le aplica el método de clasificación automatizado, por ejemplo el supervisado, el resultado será de tipo raster. El analista decidirá si el mapa será preparado en ese mismo formato o convierte los archivos correspondientes a formato vectorial, para lo cual existen rutinas apropiadas. Si se aplican las técnicas de interpretación en la pantalla, el resultado es una

capa con las líneas que el analista traza con un cursor sobre la imagen en pantalla a través de algún dispositivo señalador (lápiz óptico, ratón, etc), es decir que esta capa tiene formato vectorial. En este caso el producto vectorial se utiliza para preparar el mapa. En la composición cartográfica se diseña la estructura y la presentación del mapa, de acuerdo al tipo y a la escala escogida para la impresión: tamaño y número de hojas, retícula de coordenadas, tipo y grosor de las líneas, colores y tramas, información marginal, etc. La mayoría de los sistemas de fotogrametría digital y los de procesamiento digital de imágenes tienen módulos para la composición cartográfica. De lo contrario hay que recurrir a sistemas de información geográfica (SIG), aunque para muchas situaciones sistemas de diseño gráfico pueden resultar apropiados. Para la impresión de los mapas se utilizan los ploteadores gráficos (ya superados) o los modernos graficadores con tecnología laser y de inyección de tinta.

6. Verificación de campo: El mapa preliminar y las imágenes en papel que estén disponibles se llevan al terreno. La verificación se hace comparando los resultados de la interpretación con lo que existe en el terreno, en puntos seleccionados con la intensidad indicada por las normas y según un determinado diseño de muestreo. El recorrido de campo se aprovecha además para visitar sitios de dudosa identificación, la cual debe ser aclarada en esta fase.

7. Mapa forestal definitivo: Después de las correcciones correspondientes se produce el mapa definitivo.

CONCLUSIONES

1. El sector forestal venezolano, tanto oficial como privado, tiene una gran carencia de mapas idóneos para el manejo eficiente de los recursos forestales. Sin embargo, la tecnología moderna pone a la disposición de los entes comprometidos en esta materia, los insumos y las herramientas apropiadas para superar esta deficiencia.
2. A la luz de los avances tecnológicos conviene revisar las alternativas que pueden darse para la producción de mapas forestales. Gran cantidad de imágenes están disponibles. Es necesario conocer sus características, sus posibilidades y sus

limitaciones, y cómo utilizarlas para la preparación de los mapas forestales. Las fotografías aéreas siguen siendo útiles para este propósito. Las imágenes LANDSAT y SPOT han probado ser apropiadas a niveles de reconocimiento y semidetalle. Nuevos tipos de imágenes, con mayor resolución espacial y espectral, están irrumpiendo en el mercado mundial.

3. Las variaciones altitudinales del relieve, junto con la distancia focal, la altura y el ángulo de observación del sensor, influyen fuertemente en los desplazamientos con que se aprecian los detalles del terreno en las imágenes de percepción remota. Estos desplazamientos determinan las alternativas metodológicas y el instrumental (hardware y software) que deben seguirse en la producción cartográfica, a fin de mantener los errores dentro de ciertos límites de tolerancia.
4. En la producción digital de mapas a partir de imágenes obtenidas por instrumentos ópticos y óptico-electrónicos, la corrección geométrica puede hacerse a través del proceso de rectificación, cuando el terreno se considere plano, y a través del proceso de ortocorrección, cuando el terreno se considere accidentado. Para el proceso de producción cartográfica estos términos -plano y accidentado- son relativos y dependerán del tipo de sensor y de las condiciones de toma. Por ejemplo, para producir un mapa forestal a escala 1:50.000, con una tolerancia total de 1,5 mm y una tolerancia de 1,47 mm en la transferencia de los detalles de la imagen al mapa base, utilizando fotografías verticales tomadas a escala 1:50.000 con cámara de formato convencional, lente de 210 mm de distancia focal y 10.500 m de altura de vuelo, se puede considerar como plano, y utilizar la rectificación, un terreno con diferencias altitudinales de 153 m. Pero, si se utiliza una imagen SPOT pancromática tomada verticalmente, ese mapa a escala 1:50.000 puede prepararse usando los procedimientos de terreno plano (rectificación) aun cuando las variaciones altitudinales sean de 2.036 m. Si la imagen SPOT fue tomada con visión no nadiral, quedando puntos ubicados a 100 km de la proyección de la órbita, la consideración de que el terreno es plano es válida cuando las diferencias del relieve sean menores de 610 m. Y si la imagen fue tomada con la máxima inclinación, quedando puntos a 450 km de la

proyección de la órbita, los procedimientos de terreno plano sólo pueden aplicarse cuando el terreno tenga variaciones de 135 m.

5. Muchos usuarios de imágenes de percepción remota involucrados en la preparación de mapas, no toman en consideración el tipo de imagen que usan y las condiciones con que fueron tomadas, lo cual puede acarrear la aplicación de metodologías inapropiadas y la presencia de fuertes errores en los productos resultantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. 1996. Digital Photogrammetry, An Addendum to the Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry, Bethesda, Maryland, EE. UU., 247 p.
- AUTOMETRIC INCORPORATED. 1993. Russian imagery. Panfleto informativo, Autometric Inc., Alexandria, Virginia, EE. UU.
- CHUVIECO, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp, S. A., Madrid, p 568.
- JENSEN, J. 1996. Introductory Digital Imagen Processing, A Remotely Sensing Perspective, 2a. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, EE. UU., p 318.
- LILLESAND, T. y R. KIEFER. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, 3a. ed. John Wiley & Sons, New York. p 750.
- LÓPEZ, J. 1996. Mapa de uso de la tierra y cobertura vegetal de la Reserva Forestal de Caparo usando SIG y una imagen HRV de SPOT, Trabajo de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Mérida, Venezuela, 66p.
- MATHER, P. 1987. Computer Processing of Remotely-Sensed Images, An Introduction. John Wiley & Sons. New York, p. 352.
- PERNÍA, E. 1989. Guía Práctica de Fotointerpretación. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, 278 p.
- _____. 1996. Propuesta para un programa de actualización de la información cartográfica de las reservas forestales venezolanas. Revista Forestal Venezolana, 40(2), pp. 9-19.
- _____. 1997. Sistemas aerofotográficos de pequeño formato para la evaluación de recursos forestales en América

- Latina. Revista de Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, Vol. 6 (1 y 2), pp. 229-246.
- PERNÍA, E., O. JURGENSON y R. OSORIO. 1994. Sistemas aerofotográficos de pequeño formato en aplicaciones forestales: Experiencia de la Escuela de Ingeniería Forestal de la Universidad de Los Andes. Revista Forestal Venezolana 28, pp. 25-42.
- PERNÍA, E. y J. LÓPEZ. 1997. Una metodología práctica de generación de información de imágenes de percepción remota para los SIG. VIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Mérida, Venezuela.