

# Identificación de “sabanas nativas” en los llanos Colombianos mediante imágenes RADARSAT multi-estacionales: resultados preliminares

**Nathalie Beaulieu, Patrick Hill, Germán Escobar y Tomás Romero,**

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), AA 6713, Cali, Colombia  
n.beaulieu@cgnet.com, p.hill@gis.ciat.cgiar.org, b.escobar@cgiar.org

*Memorias del Primer Simposio GlobeSAR 2: “Las aplicaciones de RADARSAT en América Latina”, Cartagena, 20-24 de abril, 1998, Canada Centre for Remote Sensing, pp. 97-105.*

## RESUMEN

Este artículo describe los resultados preliminares de un estudio cuyo objetivo es cartografiar las áreas de pastos naturales o “sabanas nativas” en los llanos orientales de Colombia. Hasta la fecha, se han adquirido cuatro imágenes de RADARSAT en modo estándar en distintos períodos del año y se han realizado mediciones de campo en 81 parcelas simultáneamente y después de tres de estas adquisiciones. El análisis de la relación entre el coeficiente de retrodispersión  $s^{\circ}$  y la fitomasa para los pastos naturales y sembrados indica que los pastos naturales tienden a tener valores de  $s^{\circ}$  inferiores a los de los pastos sembrados, aun cuando presentan una biomasa elevada. Con excepción de la imagen que fue adquirida en condiciones de lluvia, el promedio del coeficiente de retrodispersión por parcela, medido sobre imágenes de  $s^{\circ}$  en unidades de potencia, raramente sobrepasaba valores de  $-13$  dB para los pastos naturales. La mayoría de las parcelas de pastos introducidos presentaron promedios superiores a este valor, aunque algunos no. La próxima etapa de nuestro estudio consistirá en la clasificación de las imágenes individuales y combinadas, lo que nos permitirá comparar las imágenes adquiridas en diferentes períodos del año. Sin embargo, en esta etapa preliminar, la imagen que presentó diferencias más marcadas entre pastos naturales y sembrados fue la del 2 de mayo de 1997, adquirida unos dos meses después del inicio de las lluvias, pero para la cual no había llovido desde hacía dos días. La adquisición de imágenes durante la estación de lluvia es posible mediante una estrategia de adquisición donde se programan adquisiciones de respaldo y se procesan los datos solamente cuando el usuario ha confirmado que las condiciones climáticas fueron favorables.

## Introducción

La identificación de las áreas bajo pastos naturales, en particular su distinción con respecto a áreas sembradas con pastos introducidos, tiene una gran importancia para el manejo de las tierras en la región. En el sector conocido como la *altillanura*, los pastos naturales representan áreas donde existen opciones de intensificación del uso de la tierra. Por otro lado, en otros sectores, el suelo es demasiado frágil para que se pueda intensificar la agricultura. El objetivo del presente estudio es desarrollar una metodología para identificar y cartografiar las áreas que permanecen bajo pastos naturales o “sabanas nativas” en los llanos orientales de Colombia, con el más alto grado de confianza posible. Este objetivo a corto plazo se enmarca en uno más general y a un plazo más largo, el cual consiste en cartografiar el uso actual de la tierra y la degradación de los pastizales en los llanos colombianos mediante imágenes de varios sensores remotos.

Para apoyar un estudio del CIAT sobre los aspectos socioeconómicos del uso de la tierra en esta región (Smith *et al.*, 1997), se hizo un intento de clasificar los tipos de pastos mediante una imagen Landsat TM (Crawford, 1996). Desafortunadamente, el humo afectaba una gran parte de la imagen estudiada. No se pudo obtener otra imagen Landsat TM despejada de nuestra zona para los últimos tres años, a pesar de la estación seca que afecta la zona entre diciembre y marzo. En efecto, durante la estación seca, el humo producido por las quemaduras se vuelve el factor limitante en la adquisición de imágenes del dominio óptico. Aún en las zonas no afectadas por el humo, no se logró distinguir con claridad las áreas bajo pastos naturales e introducidos por causa de los diferentes estados de crecimiento de la sabanas nativas después de la quema y por causa de los diferentes niveles de degradación y cobertura del suelo en los pastos introducidos. Girard y Rippstein (1994) obtuvieron buenos resultados para la caracterización de los pastos y sabanas en la región de Carimagua usando imágenes multiespectrales del satélite SPOT, pero sin lograr distinguir los pastos naturales de los sembrados en muchos casos. Por otro lado, Kelldorfer *et al.* (1994) reportaron resultados muy alentadores usando imágenes del satélite ERS-1 para la identificación de praderas en Europa. En efecto, las praderas mostraron una tonalidad más oscura que la de los cultivos y un coeficiente de retrodispersión relativamente estable, independientemente de los cortes, mientras que mostraban mucha variación en la respuesta espectral de una misma imagen Landsat TM. Estos autores

obtuvieron mejores resultados en la clasificación de las praderas con imágenes ERS-1 de diferentes fechas que con una imagen Landsat TM. Sin embargo, la utilización de imágenes de radar para distinguir praderas naturales con respecto a áreas sembradas con pastos introducidos es otro desafío, que pudimos enfrentar gracias al programa GLOBESAR-2. Por causa de las quemas que afectan los pastos naturales y de las variaciones en las condiciones de humedad, es probable que la combinación de imágenes adquiridas en diferentes períodos del año mejorará las posibilidades de distinguir entre las áreas con pastos naturales y sembrados. Sin embargo, si fuera posible lograr tal distinción con una sola imagen RADARSAT, queremos saber en cuales condiciones adquirirla para aumentar nuestras probabilidades de éxito.

### **La zona de estudio**

Nuestra zona de estudio se encuentra al sur del Río Meta, entre las ciudades de Puerto López y Puerto Gaitán, en el municipio de Puerto López, departamento del Meta. Esta zona muestra dos tipos de paisaje distintos, según su geomorfología, ambos formando parte de los llanos orientales de Colombia. Las cuencas de los ríos Yucao y Manacacías se caracterizan por una geomorfología de *serranía* con un relieve ondulado hasta bastante escarpado. Adyacente a la ribera sur del río Meta se encuentra una franja de *altillanura*, con un relieve plano a ligeramente ondulado. Al este del río Manacacías, el paisaje de altillanura se extiende en el departamento de Vichada. La serranía presenta una densidad de drenaje mayor a la de la altillanura, con suelos más arenosos y pedregosos. Al norte del río Meta se encuentra la altillanura mal drenada (*o llano inundado*), que no forma parte de nuestra zona de estudio. El cauce del río Meta se encuentra a una altitud de aproximadamente 140 m, la altillanura tiene una altitud de 200m y las colinas de la serranía alcanzan 250m al sur de nuestro sector de estudio. Se tiene una estación seca o *verano* entre diciembre y marzo. Cuando se intensifican las lluvias, muchos de los ríos que se pueden cruzar a pie durante el verano inundan sus planicies y muchos de los caminos desaparecen. Brunnschweiler (1972) presenta una descripción muy bien sintetizada del ambiente natural y de la geomorfología del departamento del Meta.

Tanto la altillanura como la serranía tienen suelos muy ácidos y de baja fertilidad. Los pastos naturales de la zona han sido tradicionalmente explotados para la ganadería extensiva; se manejan por quema por que las hierbas maduras no son tan nutritivas para el ganado como lo son los rebrotes. Desde varias décadas se han introducido variedades de pasto que permiten intensificar la producción animal. Los pastos del género *Brachiaria*, originarios de África, se adaptan particularmente bien a los suelos de la región. Los pastos naturales. Los pastos introducidos generalmente no se queman, pero se deben manejar cuidadosamente mediante intervenciones mecánicas, la aplicación ocasional de fertilizante y, sobre todo, un pastoreo adecuado.

### **Las imágenes y los datos de campo**

Fueron planificadas tres adquisiciones de imágenes RADARSAT en modo Estándar (S6 ascendente), una el 2 de mayo y otra el 4 de diciembre de 1997, respectivamente al principio avanzado y al final de la estación lluviosa, y otra el 10 de marzo de 1998, al final de la estación seca. Se optó por imágenes de modo ascendentes por que se adquieren al atardecer, lo que minimiza los riesgos de rocío. Se decidió adquirir imágenes en modo estándar con el ángulo de incidencia lo mayor posible, por que se considera generalmente que los ángulos mayores dentro del rango permitido por el modo estándar de RADARSAT disminuyen la sensibilidad a la humedad del suelo (como lo mencionan Martin *et al*, (1989)) y aumentan la sensibilidad a la rugosidad del suelo y a la presencia de vegetación. Por ejemplo, las curvas de retrodispersión en función del ángulo de incidencia presentadas por Ulaby y Dobson (1988) para los pastos y el suelo desnudo en banda C permiten apreciar que la diferencia entre los  $\sigma^{\circ}$  de estos dos tipos de cobertura aumenta con el ángulo de incidencia. El trayecto de la radiación a través de la vegetación aumenta con el ángulo de incidencia, lo que aumenta el efecto de las características de la vegetación sobre las de la imagen. Como el modo S7 no permitía cubrir el sitio completamente, se escogió el modo S6. Por causa de un conflicto para la adquisición de la imagen del 2 de mayo, no se podía cubrir todo nuestro sitio de trabajo. La adquisición y el trabajo de campo fueron entonces aplazados hasta el 26 de mayo, fecha en la cual llovió abundantemente en ciertos sectores de la zona cubierta por la imagen. Sin embargo, se había procedido con la adquisición de la imagen del 2 de mayo, para la cual pedimos el procesamiento para poder compararla con la del 26. Finalmente, esta imagen cubrió toda la zona de estudio y se usó para nuestro análisis. Conociendo el efecto de la lluvia sobre las tonalidades en la imagen, las adquisiciones subsecuentes fueron respaldadas por una adquisición planificada 24 días después. La Agencia Espacial Canadiense (CSA) solamente procesó los datos y anuló la adquisición de respaldo después de haber recibido nuestra confirmación de que no había llovido.

La figura 1 muestra una gráfica de la lluvia acumulada para cada día y sus dos días anteriores, medida en la estación de Santa Cruz, ubicada en la zona de estudio. Las flechas indican las adquisiciones de las imágenes RADARSAT. El 2 de mayo, la estación Santa Cruz no había registrado lluvia por 2 días, pero registró 17.5 mm el 30 de noviembre y luego 55 mm el 3 de mayo. Para la adquisición del 26 de mayo, la estación registró 63 mm y este día el acumulativo de 3 días fue de 96.5 mm. El 4 de diciembre, no se había registrado lluvia desde hacía 15 días, y la última lluvia fuerte anterior a esta fecha fue registrada el 8 de noviembre. Las condiciones eran entonces bastante secas para esta tercera adquisición. El 10 de marzo no había llovido, pero la estación Santa Cruz registró 15 mm el día anterior y 46 mm el 8 de marzo. Para la primera y la última adquisición entonces, se supone que la vegetación estaba vigorosa por el aporte de lluvia de los días anteriores, pero que la superficie del suelo estaba relativamente seca.

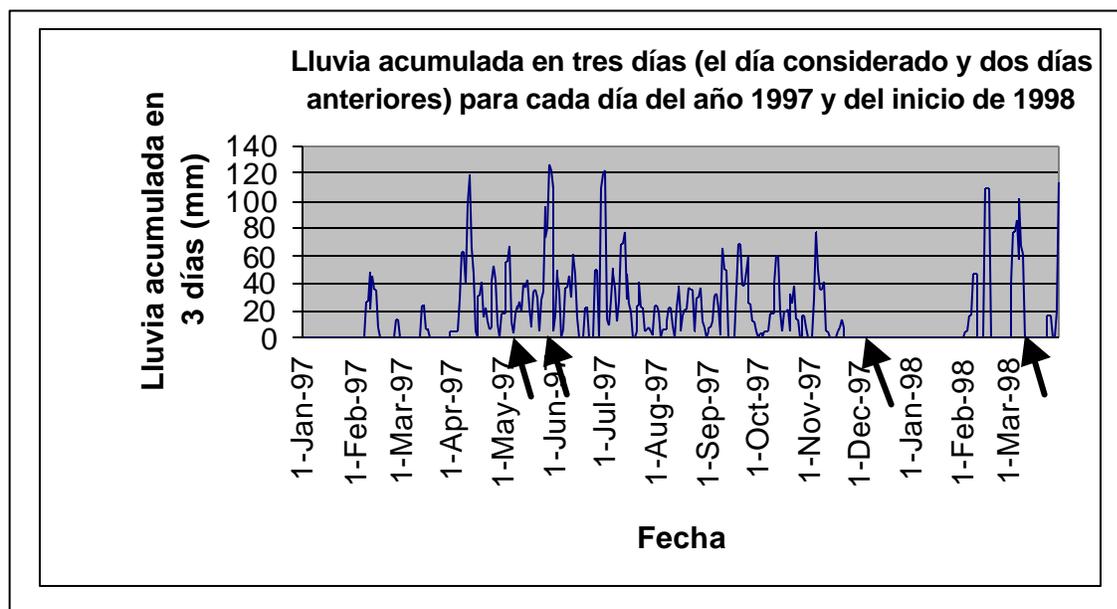


Figura 1: Gráfica de la lluvia acumulada para cada día y sus dos días anteriores para 1997 y el inicio de 1998. Las flechas indican las fechas de adquisición de las imágenes RADARSAT.

Se realizaron mediciones de campo simultáneamente y después de las adquisiciones del 26 de mayo, del 4 de diciembre y del 10 de marzo. En varias parcelas de más de 4 hectáreas, delimitadas con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), se evaluó la altura promedia de las plantas, se midió la biomasa en 5 muestras de 1 m<sup>2</sup>, se estimó la cobertura vegetal y se describió la composición florística de los pastizales. Las mediciones y observaciones fueron complementadas con varias fotografías en cada parcela. Se estudiaron principalmente parcelas de sabana nativa y de pastos sembrados, estos últimos siendo mayoritariamente del género *Brachiaria*. Para fines de comparación, se estudiaron también parcelas de pastos y sábanas con árboles, plantaciones de caucho y cultivos de piña. En el mes de mayo se definieron 55 parcelas que también se caracterizaron en diciembre, cuando se definieron 26 parcelas adicionales. 16 del total de las parcelas se encuentran en el paisaje de la serranía y las demás en la altillanura. En todos los casos, se escogieron parcelas en terreno plano, o casi plano. Solamente se tomaron muestras de suelo durante las adquisiciones del 26 de mayo (en 14 parcelas) y del 10 de marzo (en 5 parcelas). Para el 26 de mayo, se notó una variación muy grande de la humedad del suelo, los promedios de las 5 muestras tomadas por parcela variaron entre 18.1 g/100 cm<sup>3</sup> hasta 42.3 g/100 cm<sup>3</sup>. Para la adquisición del 10 de marzo, los promedios solamente variaron entre 22.6 y 26.8 g/100 cm<sup>3</sup>.

### Tratamiento digital de las imágenes

El tratamiento digital de las imágenes se realizó usando los programas del grupo PCI, versión 6.2. Para cada una de las imágenes RADARSAT recibidas, se estimó el coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ ) de cada pixel a partir Número Digital, suponiendo un terreno plano ubicado al nivel del mar. Este procedimiento se realizó según la metodología descrita por Shepherd (1997), e implementada en los programas de PCI. Para la próxima fase del proyecto, sin embargo, se tomará en cuenta la elevación y la pendiente del terreno en el cálculo de  $\sigma^0$ , gracias a la disponibilidad de un modelo de elevación digital. Para evitar el efecto del remuestreo de las imágenes, las coordenadas de las parcelas fueron proyectadas a la geometría de cada imagen, en base a puntos de control

referentes a una cobertura vectorial de ríos digitalizada a partir de mapas topográficos a escala 1:25000. Los promedios y desviaciones estándares del coeficiente de retrodispersión fueron calculados para cada parcela sobre las imágenes de  $\sigma^{\circ}$  en unidades de potencia y fueron luego expresados en unidades de decibeles.

Como resultado final del proyecto, se quiere llegar a la clasificación de las imágenes, individuales y combinadas, para distinguir sabanas nativas, pastos sembrados, bosques de galería y posiblemente otras clases de vegetación. Se quiere también evaluar la veracidad de cada clasificación. Sin embargo, en este momento solamente hemos estudiado las relaciones entre algunos parámetros de las parcelas estudiadas en el campo y el coeficiente de retrodispersión medido a partir de las imágenes.

### **Resultados preliminares**

La primera lección que se pudo aprender de las adquisiciones de mayo se refiere al efecto de la lluvia sobre la retrodispersión en las imágenes. Dada la dependencia bien conocida del coeficiente de retrodispersión con respecto a la humedad del suelo y la presencia de gotas de agua sobre la vegetación, esto no fue una sorpresa. Pensamos sin embargo que las imágenes, mostradas en las figuras 2a) y 2b), son un buen ejemplo del hecho que la teledetección radar no se puede considerar como una herramienta “a prueba del clima” para aplicaciones agrícolas otras que las referentes a la humedad del suelo. Las flechas indican zonas de pastos muy afectadas por la lluvia, que en la imagen del 26 de mayo aparecían tan brillantes como una zona adyacente con una cobertura arbustiva considerable y bosques de galería. Se aprecian parcelas muy oscuras en el tercio superior de la imagen, que corresponden a sabanas nativas.

La figura 3 muestra las gráficas de coeficiente de retrodispersión  $\sigma^{\circ}$  en función de la fitomasa para las parcelas de sabana nativa y los pastos introducidos para las cuatro imágenes RADARSAT estudiadas, solamente para las parcelas de la altillanura. La fitomasa es el resultado del promedio de las cinco muestras tomadas en cuadros de 1 m<sup>2</sup> en cada parcela, y representa el total de la vegetación muerta y viva, sin secar. Como se mencionó anteriormente, se agregaron 26 parcelas de estudio durante las mediciones de campo de diciembre. No se habían caracterizado estas parcelas en mayo, pero omitirlas de las gráficas podría llevar a conclusiones erróneas en cuanto a la comparación de la posibilidad de distinguir los pastos introducidos de los nativos en las diferentes imágenes. En las primeras cuatro gráficas, referentes a las imágenes adquiridas en mayo, se atribuyó una fitomasa de -100 g.m<sup>2</sup> a estas parcelas de fitomasa desconocida. Se debe también mencionar que debido a que no estuvimos en el campo para la adquisición del 2 de mayo, los valores de fitomasa usados en las dos gráficas referentes a esta fecha corresponden a las mediciones de campo realizadas a partir del 26 de mayo, hasta dos semanas después. Aún así, las sabanas nativas mostraron una relación entre  $\sigma^{\circ}$  y la fitomasa, y presentaron una saturación de  $\sigma^{\circ}$  en valores alrededor de -13 hasta -12.5 dB, aún con fitomasas superiores a 1100 g.m<sup>2</sup>. Sin embargo, una de las parcelas de sabanas agregadas en diciembre mostró un coeficiente de retrodispersión alto, alrededor de -10.5 dB. Todas las parcelas de pastos sembrados presentaron valores de  $\sigma^{\circ}$  superiores a -13 dB, aún con una cobertura vegetal muy pobre. Esto lleva a pensar que una segmentación usando un simple umbral de -12.5 dB sobre la imagen apropiadamente filtrada o promediada podría producir una buena separación entre pastos naturales y sembrados.

Por otro lado, la imagen del 26 de mayo presentaba valores mas altos de  $\sigma^{\circ}$  para las sabanas, a causa de la humedad del suelo y de las gotas de lluvia sobre las hojas, lo que impediría su separación de los pastos sembrados. Para las imágenes de las dos adquisiciones subsecuentes, la relación entre  $\sigma^{\circ}$  y la fitomasa para las sabanas es mucho menos definida que en el caso del 2 de mayo. Sin embargo, la mayoría de las parcelas siguen con un  $\sigma^{\circ}$  inferior a los -13 dB. En la imagen del 4 de diciembre, cuatro de las parcelas de pastos presentaron promedios de  $\sigma^{\circ}$  inferiores a los -13 dB. Estas parcelas se caracterizaban por una cobertura vegetal pobre, con fitomasas inferiores a los 500 g.m<sup>2</sup>. Pero en el caso de la imagen del 10 de marzo, fueron 6 las parcelas de pastos sembrados con promedios de  $\sigma^{\circ}$  inferiores a los -13 dB, y que se confundían entonces con las sabanas.

Antes de concluir sobre el período del año que permite una mejor distinción entre pastos naturales y sembrados, tendremos que realizar segmentaciones o clasificaciones sobre cada imagen y verificar su veracidad con respecto a observaciones del tipo de uso de la tierra que hemos hecho en más de 400 parcelas adicionales. Sin embargo, los resultados preliminares presentados aquí parecen indicar que el hecho de poder tomar imágenes algunos meses después del inicio de las lluvias (pero evitando los eventos de lluvia) sería una ventaja, por que se aumenta la retrodispersión de los pastos sembrados.

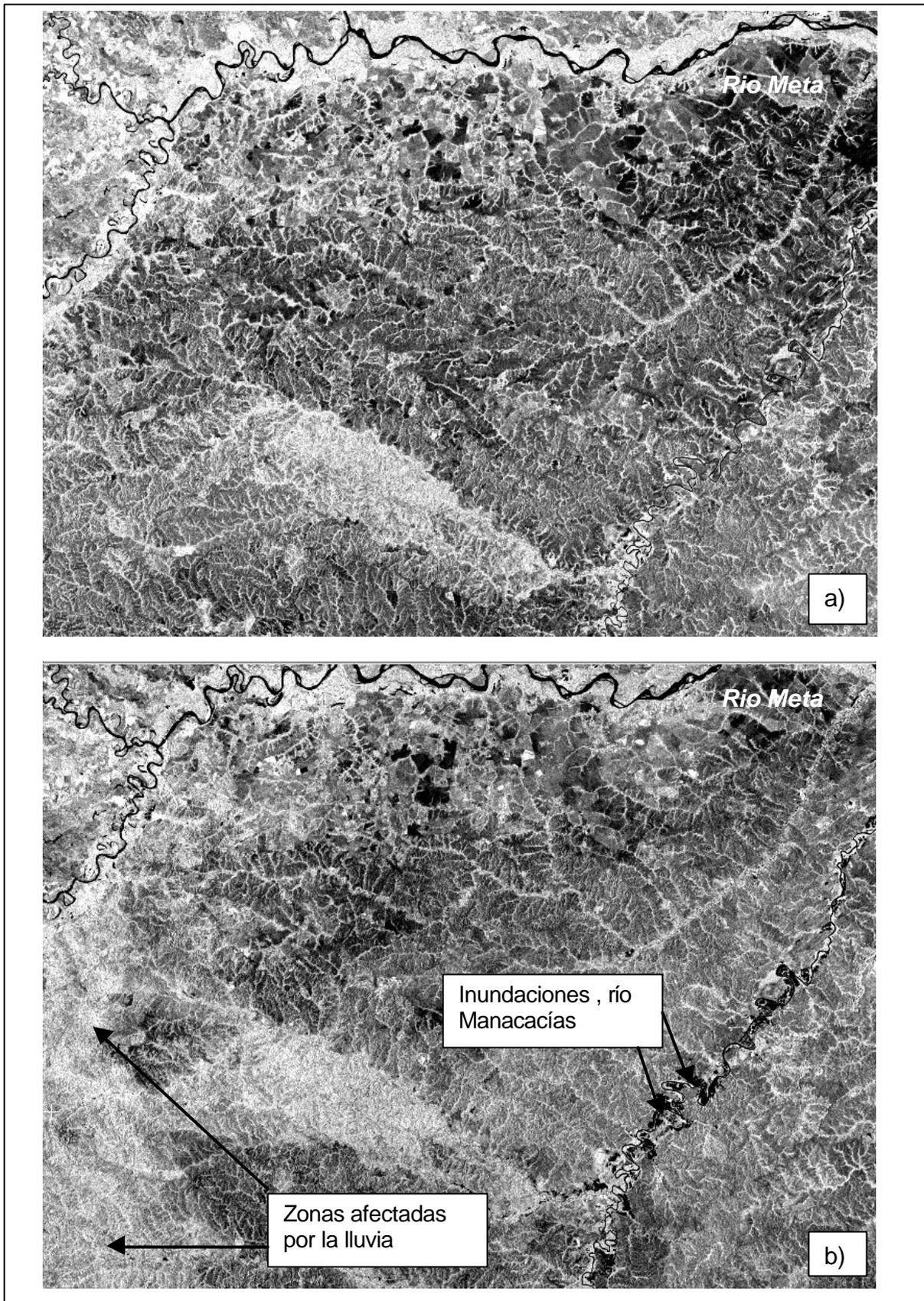


Figura 2: Porción de las imágenes RADARSAT en modo S6 ascendente del sitio de estudio, entre Puerto López y Puerto Gaitán, Meta, Colombia, sin geocodificar. a) adquisición del 2-05-98, b) adquisición del 26-05-97. Imágenes © CSA 1997

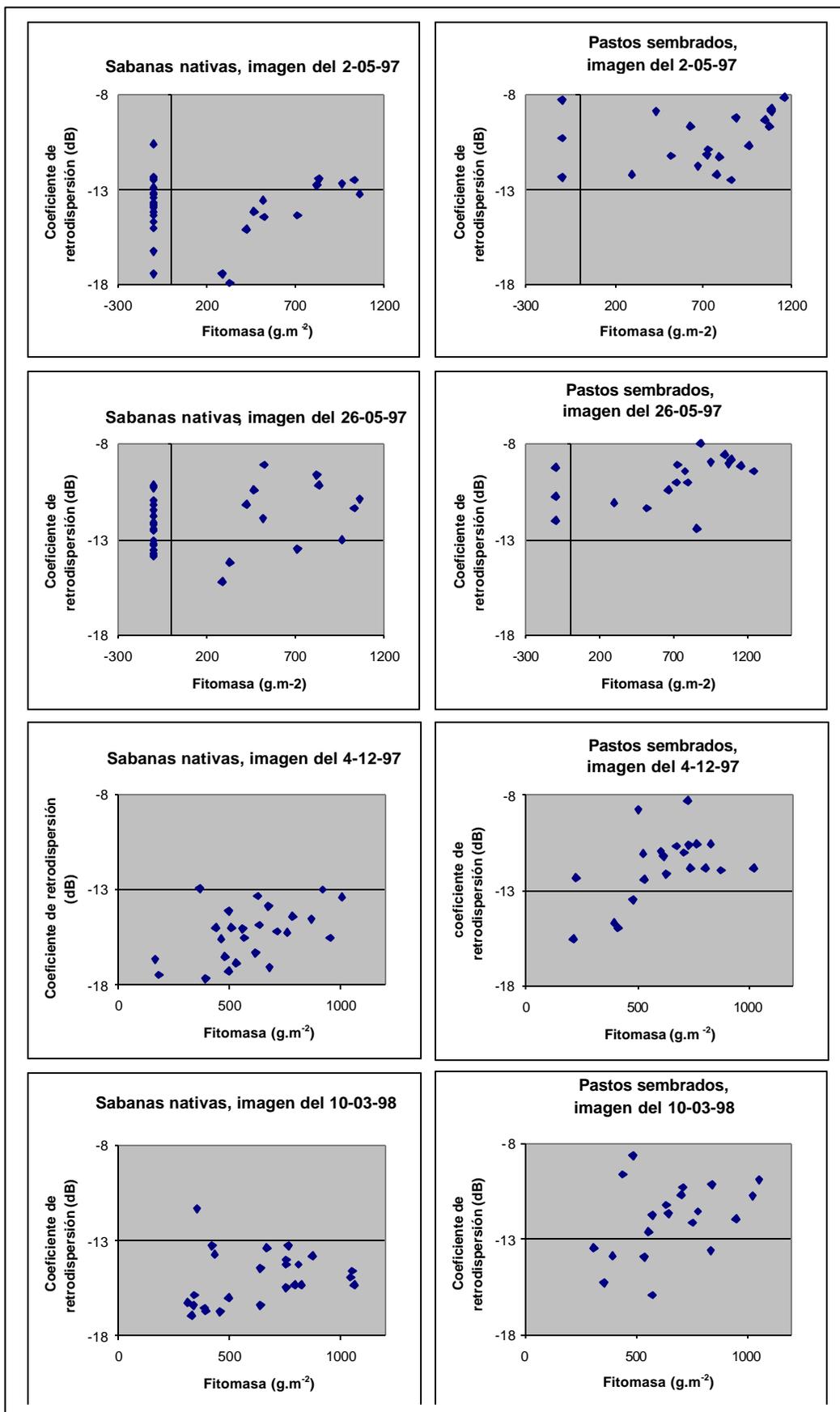


Figura 3: gráficas del coeficiente de retrodispersión  $\sigma^0$  en función de la fitomasa para las parcelas de sabana nativa (cuadros de la izquierda) y los pastos introducidos (cuadros de la derecha), para las cuatro imágenes RADARSAT estudiadas

## Discusión

Por lo general, las parcelas con pastos sembrados tienden a presentar valores promedios de  $\sigma^{\circ}$  más altos y tonos más claros que las parcelas de pastos naturales. Esto se debe probablemente a una combinación de dos factores: la arquitectura de las plantas y la rugosidad del suelo. Las hojas de las *Brachiaria* tienden a ser más anchas que las de muchas especies nativas, aunque no de todas. La especie dominante en las sabanas de la altillanura es el *Trachypogon vestitus*, comúnmente llamada *paja peluda* por que sus hojas están cubiertas de pelos. La pilosidad de las hojas podría influenciar la atenuación de la radiación a través de la cobertura vegetal. La parcela de sabana que presentó valores altos de  $\sigma^{\circ}$  en las imágenes del 2 de mayo y del 10 de marzo de 1998 era dominada por la especie *Axonopus purpusii*, con una arquitectura un poco más parecida a la de las *Brachiaria*, cuando no está florecida. Pero otras parcelas dominadas por *Axonopus purpusii* presentaron valores bajos de  $\sigma^{\circ}$  en estas imágenes, lo que sugiere tener prudencia antes de sacar conclusiones sobre el efecto de la arquitectura de las plantas. Martin *et al.* (1989) mencionan que la banda C no es muy sensible a la presencia de la vegetación de las praderas. Si este es el caso, la rugosidad del suelo sería el factor responsable de la retrodispersión más elevada de los pastos sembrados. Sin embargo, no estamos totalmente de acuerdo con la afirmación de estos autores, por lo menos con su aplicabilidad a nuestras condiciones. En efecto, para los suelos relativamente lisos de los pastos naturales, se notan muy claramente las zonas quemadas en las imágenes, lo que demuestra un cierto efecto de la vegetación. También hemos observado una ligera tendencia de incremento del coeficiente de retrodispersión en función de la biomasa, aunque no para todas las imágenes.

La rugosidad del suelo podría explicar la retrodispersión más elevada de los pastizales sembrados. Debido a la necesidad de labrar el suelo para sembrar pastos introducidos, los suelos a menudo presentan terrones y son más rugosos que los de los pastos nativos, aún años después de la siembra. Sin embargo, se necesita seguir investigando las causas de estas diferencias en la retrodispersión entre los pastos sembrados y sabanas.

## Conclusiones

Para aplicaciones agrícolas de las imágenes radar, se deben evitar los eventos de precipitación. Para las imágenes RADARSAT, se puede pedir al representante de ventas que programe una adquisición de respaldo y que haga procesar los datos solamente cuando el usuario ha confirmado que las condiciones climáticas fueron favorables.

Por lo general, las parcelas con pastos sembrados tienden a presentar valores promedios de  $\sigma^{\circ}$  más altos y tonos más claros que las parcelas de pastos naturales, aunque algunas parcelas de pastos introducidos también presentaron valores bajos de  $\sigma^{\circ}$ . Esto lleva a esperar que se pueda realizar la cartografía de las zonas bajo pastos naturales en la altillanura mediante una clasificación automática de las imágenes apropiadamente filtradas o promediadas, o mediante un levantamiento por interpretación visual. Sin embargo, en muchos sectores de la serranía, el relieve muy disectado y la pedregosidad del suelo dificultarán la clasificación de las áreas bajo pastos naturales.

## Bibliografía

Brunnschweiler, D. (1972). The Llanos frontier of Colombia; environment and changing land use in Meta. Latin American Studies Center, Monograph N0. 9, Michigan State University. 71 p.

Crawford, E. (1996). Landuse dynamics in the Colombian Llanos (1996). Internal technical report, CIAT PE-4 project, 12 p.

Girard, C.M., Rippstein, G. (1994). Utilisation de données SPOT HRV pour la cartographie de savanes et pâturages dans les Llanos de Colombie. Bulletin de la Société Française de télédétection No. 133 (1994-1), p. 11-19.

Kellndorfer, J., Schadt, R., and Mauser, W. (1992). Segmented landuse classification of multitemporal ERS-1 SAR data, Proceedings of the first ERS-1 Symposium, Cannes, France. ESA SP-359, 532-536.

Martin jr., R.D., Asrar, G., and Kanemasu, E.T. (1989). C-Band scatterometer measurements of a tallgrass prairie. Remote Sensing of Environment, N. 29, p. 281-292.

Shepherd, N. (1997). Extraction of Beta Nought and sigma nought from RADARSAT CDPF products. Report No. AS97-5001, Altrix Systems, Ottawa, Canada, 9p.

Smith, J., Cadavid, J.V., Rincón, A., Vera, R. (1997). Land speculation and intensification at the frontier : a seeming paradox in the Colombian Savanna. *Agricultural Systems*, Elsevier Science, Vol. 54, No. 4, pp. 501-520

Ulaby, F.T. and Dobson, M.C. (1988). *Handbook of radar scattering statistics for terrain*. Artech House, Norwood, Massachusetts, 357 p.