

Análisis de topes de nubes convectivas en una tormenta con datos SAC-C MMRS y MODIS: un caso de estudio

Luciano Vidal¹
Inés Velasco²
Alberto L. Flores³

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires
Piso 2 – Ciudad Universitaria 1- Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

¹lucianovidal78@yahoo.com.ar

²velasco@at.fcen.uba.ar

³flores@at.fcen.uba.ar

Abstract. Satellite data from the Argentina's satellite SAC-C are explored to study cloud top properties for a particular case: a convective storm. The use of two of five bands from the MMRS sensor of this satellite allowed cloud top phases (ice/water) identification. Also the aspect (towering/veil), could be discernable in these bands centered respectively in 0.82 and 1.65 μm . The same storm, with a difference of one minute was captured by the sensor MODIS on board of TERRA satellite. Information extracted simultaneously from both satellites improved the analyses and consequently the results, since MODIS provide a better spectral resolution and MMRS a better spatial resolution. MODIS data are used to calculate cloud tops altitude.

Palabras claves: remote sensing, image processing, clouds, storms, meteorology, sensoriamiento remoto, processamento de imagens, nuvens, tempestades, meteorologia.

1. Introducción

Las mediciones de las propiedades de las nubes con satélite y del balance radiativo en ellas son esenciales para comprender los procesos de meso y gran escala que determinan la variabilidad del clima. Los sensores remotos desde los satélites actuales, proveen imágenes multispectrales a partir de las cuales se puede obtener una gran cantidad de información sobre las nubes y sus propiedades radiativas (Hunt, 1973; Rossow, 1989). Los datos pueden provenir de sensores activos o pasivos, y procesados adecuadamente pueden brindar información sobre las propiedades macroscópicas (su distribución horizontal y vertical) y propiedades microfísicas (tamaño, forma y fases [agua o hielo] de las partículas que forman las nubes (Arking and Childs, 1985; Setvák and Doswell, 1991; Weng and Grody, 2000; Velasco et al., 2003).

En este trabajo se inicia el estudio de un caso particular de nubes convectivas con distinto desarrollo, cuyo objetivo es analizar cuáles propiedades de las nubes pueden ser determinadas a partir de los datos del sensor MMRS del satélite argentino SAC-C, y como éstas pueden ser complementadas con datos tomados casi simultáneamente por otros sensores. En este caso se añaden los datos sensor MODIS, que con características de sensor hiperespectral permitiría ampliar el número de propiedades de las nubes que se podrían determinar y la simultaneidad con las tomas del MMRS, de mayor resolución espacial permitirían introducir un análisis espacial más detallado.

2. Datos y Metodología

Las imágenes de satélite utilizadas en este trabajo fueron tomadas el 26 de febrero de 2003, aproximadamente a la media mañana local (**Tabla 1**). Las mismas corresponden a escenas captadas en un caso, por el sensor MMRS (Multispectral Medium Resolution Scanner) a bordo del satélite argentino SAC-C, y en otro por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) montado en el satélite TERRA. Las imágenes MMRS tienen una

resolución espacial de 175 metros, un ancho de barrido (SWAT) de 360 kilómetros, y adquieren datos en cinco bandas del espectro electromagnético (**Tabla 2**). Por su parte, el sensor MODIS posibilita la toma diaria de imágenes de la superficie terrestre, de los océanos, y de la atmósfera en 36 canales espectrales, ubicados entre 0.4 y 14.4 μm con distintas resoluciones espaciales (250 m, 500 m y 1 km) y una ancho de barrido de 2330 km.

Tabla 1. Hora de captación de las escenas consideradas.

Satélite	Sensor	Hora inicio (UTC)	Hora finalización (UTC)
TERRA	MODIS	14:08	14:21
SAC-C	MMRS	14:06	14:20

Tabla 2. Características radiométricas del sensor MMRS

BANDA #	ESPECTRO [μm]	COLOR
1	0,480 – 0,500	Azul verdoso
2	0,540 – 0,560	Verde
3	0,630 – 0,690	Rojo
4	0,795 – 0,835	NIR
5	1,550 – 1,700	SWIR

En la **Figura 1** se muestran las longitudes de onda centrales de ambos sensores en la que se puede observar la ubicación relativa de las distintas bandas en uno y otro sistema satelital.

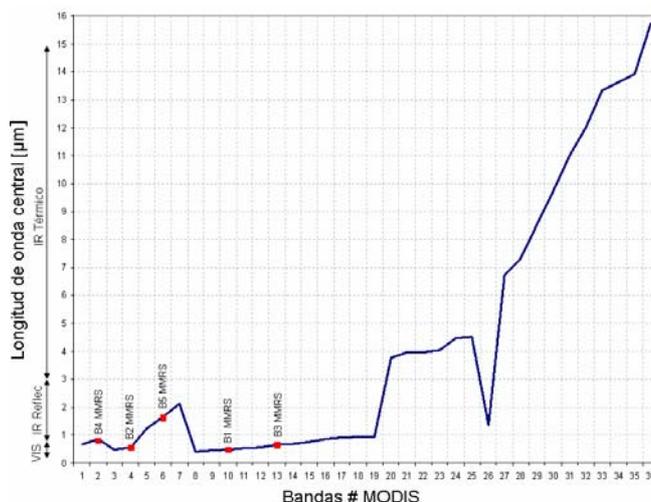


Figura 1. En línea continua azul se muestra la longitud de onda central para las 36 bandas del sensor MODIS, y con puntos rojos se indica la longitud central de cada una de las 5 bandas del sensor MMRS.

Los datos MMRS, previo a su uso, fueron convertidos a reflectancias siguiendo dos procesos: I) Corrección radiométrica, convirtiendo los valores digitales (DN) a valores de radiancia L^k , aplicando para cada banda k la ecuación (1) y II) Obtención de los valores de reflectancia para cada banda, usando la ecuación (2)

$$L^k [mW / sr.cm^2] = \left(\frac{L_{\max}^k - L_{\min}^k}{DN_{\max}} \right) DN^k + L_{\min}^k \quad (1)$$

$$\rho_{sen}^k = \frac{\pi \cdot L^k}{E_0^{cor} \cdot \cos(\theta_0)} \quad (2)$$

donde L^k es la radiancia medida por el sensor, por banda (k : 1, 2, 3, 4 y 5), θ_0 es el ángulo cenital solar y E_0^{cor} es la irradiancia solar exoatmosférica efectiva, calculada a partir de la ecuación:

$$E_0^{cor} = E_0 \cdot d_{sol} \quad (3)$$

En esta expresión, los valores de irradiancia solar exoatmosférica (E_0) se extrajeron de la página web de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), mientras que el factor de corrección por distancia Tierra-Sol, d_{sol} se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$d_{sol} = \frac{1}{[1 - 0.01673 \cos(\Omega)]^2} \quad (4)$$

$$\Omega = \frac{[0.9856 * (d_j - 4)] * \pi}{180} \quad (5)$$

donde d_j es el día juliano correspondiente a la fecha de adquisición de la imagen.

Para este trabajo se seleccionó una subescena, sobre el oeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina), a partir del sector de la pasada completa de las dos imágenes, (**Figura 2**), previo análisis visual de las mismas para localizar e identificar las clases de nubes presentes.

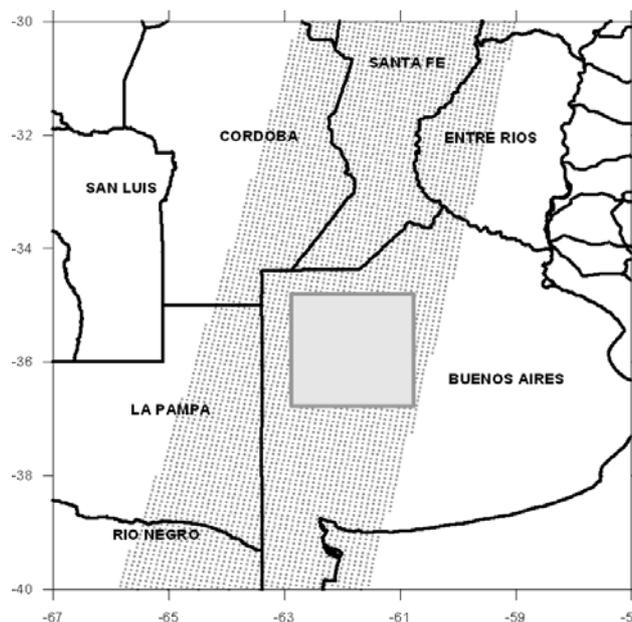


Figura 2. El recuadro gris representa la ubicación del área de estudio, superpuesta a la pasada del satélite SAC-C (sombreada). La pasada del satélite Terra cubre la totalidad del área de la figura.

En el sector seleccionado se pudo observar, además, de una importante celda convectiva con gran desarrollo vertical, la presencia de elementos nubosos con menor grado de desarrollo en su entorno (**Figura 3**). Esta nubosidad formaba parte de toda un área de tormentas que abarcaba parte del oeste y sur de la Provincia de Buenos Aires y La Pampa (**Figura 4**), asociada a la presencia de un frente cálido en dicha región (**Figura 5**). Toda la zona estaba dominada por aire muy caluroso, húmedo e inestable que favoreció el desarrollo de convección profunda.

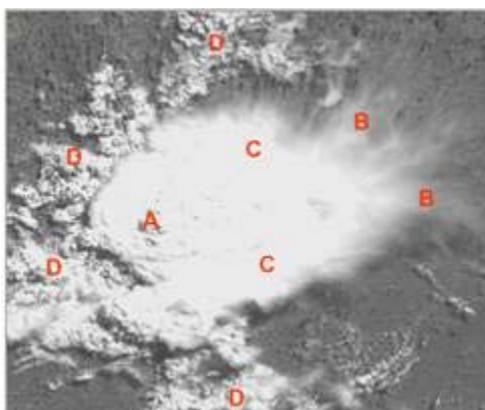


Figura 3. Imagen reflectiva (banda 4- sensor MMRS. (A) Zona de máximas corrientes ascendentes coincidentes con los topes emergentes (overshooting), (B) Nubes tipo cirrus desprendidas del yunque y arrastradas por el viento en altura, (C) Zona correspondiente al yunque del cumulusnimbus, y (D) Nubes tipo cumulus en distintos estados de desarrollo.

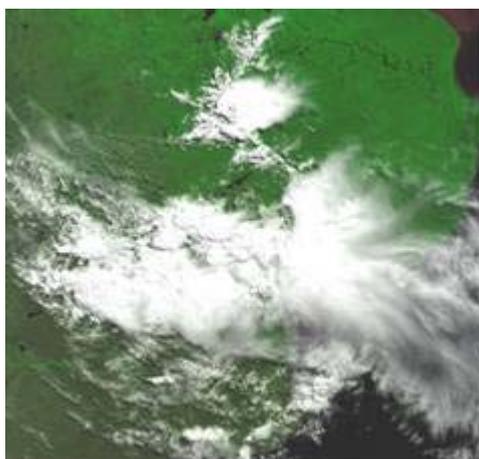


Figura 4. Imagen MODIS 26 febrero 2003 desplegada en falso color, RGB 321

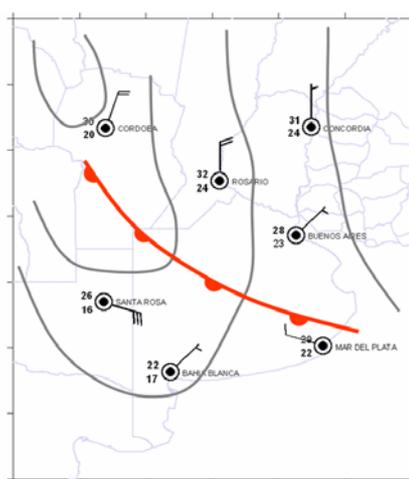


Figura 5. Mapa sinóptico esquemático de las 14:00 UTC del 26 de febrero de 2003

3. Resultados

3.1 Imagen MMRS

Según lo encontrado por Vidal et al., (2004), en base al análisis de la respuesta espectral de elementos nubosos con diferente grado de desarrollo, de las cinco bandas MMRS, la banda 4 es la única que permite una clara diferenciación de estos grados de desarrollo. Sin embargo, cuando la reflectancia es muy alta, como en el caso de nubes de gran desarrollo vertical, este sensor se satura. Como los topes de estas nubes están formados por gotitas grandes de agua líquida sobreenfriada y/o cristales de hielo, la banda 5 tiene una respuesta de brillo muy bajo, debido a la fuerte absorción de sus componentes, el sensor no se satura y permite su identificación. Además, a diferencia de la 4, al no saturarse permite visualizar la textura de la cobertura nubosa, que a su vez permite inferir las circulaciones internas de la nube, por ejemplo: topes emergentes con áreas de máximo ascenso. En la figura 6 se muestran las imágenes del sistema nuboso observado con las bandas MMRS 4 y 5. En la banda 4 la textura de los topes, en general, no se distingue tan claramente como en la 5, debido a la saturación del sensor, pero sí se contrastan claramente con el fondo los cirrus, que se desdibujan en la banda 5, donde debido a la fuerte absorción del hielo estos aparecen en una tonalidad cercana a la del fondo.

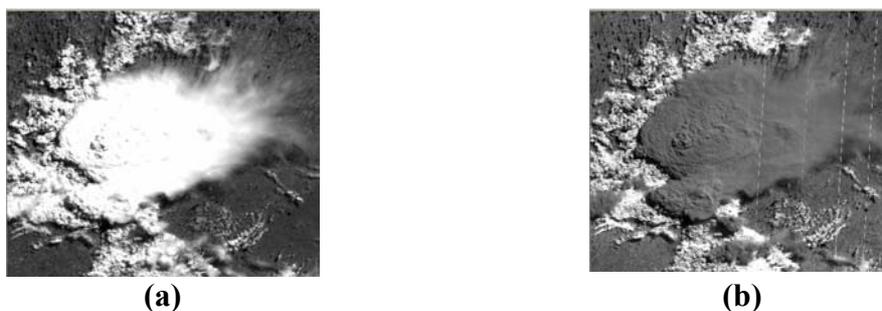


Figura 6. Imágenes MMRS (a) banda 4 y (b) banda 5.

Un ejemplo de la respuesta espectral del sistema, en las banda 4 y 5, a través de una transecta o corte [Figura 8 (a)], se muestra en la Figura 7. Las marcadas oscilaciones al principio y final de la transecta indican por un lado el contraste de respuesta entre fondo y nubes y por otro, la presencia de elementos nubosos de menor dimensión y menor desarrollo vertical, en comparación con el núcleo de la nube de tormenta principal. Sobre este núcleo, la reflectancia satura el sensor de la banda 4, produciendo una respuesta de meseta, pero los elementos menores tienen respuestas relativamente altas en ambas bandas, siendo, sin embargo, siempre superiores los de la banda 4.

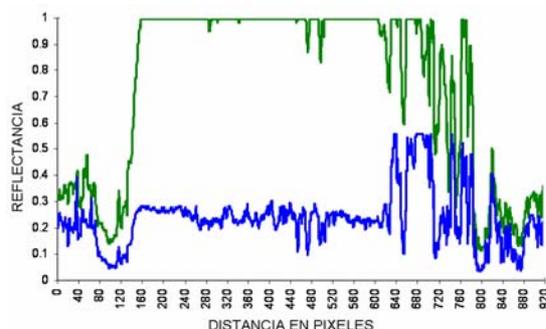


Figura 7. En verde la respuesta espectral de la banda 4 y en azul de la banda 5, a través de la transecta mostrada en la Figura 8 (a), donde 1 indica el inicio.

Los estudios previos señalan a la banda 4 como la banda que mejor separa nubes de fondo. A partir del análisis del histograma de los valores de reflectancia de esta banda (no mostrado), se tomó el valor 0.5 como umbral de separación entre nube y fondo (terreno en este caso). En la **Figura 8 (a)** se muestra la imagen correspondiente a esta banda y en (b) la misma imagen clasificada por segmentos. En esta imagen, aparece cierto grado de información sobre la rugosidad a través de la disminución de la reflectancia en las zonas de sombra generadas por los topos emergentes. La preparación de mapas de nubes con técnicas de este tipo, facilitaría la extracción de información climática.



Figura 8. (a) Imagen de reflectancia banda 4. (b) La misma imagen segmentada, valores de reflectancia inferiores a 0.5 en blanco (identifican el fondo sin nube), en magenta entre 0.5-0.6, en cyan entre 0.6-0.7, en azul entre 0.7-0.8, en verde en 0.8-0.9 y en rojo entre 0.9-1.0)

Avanzando en esta dirección, se generó una máscara de nube con la imagen de la banda 4, es decir una imagen binaria de ceros y unos que fue multiplicada por la banda 5 y la imagen resultante fue nuevamente segmentada en dos clases: (1) nubes mixtas y (2) nubes cálidas, esto es la generación de un mapa temático, resultante de la clasificación de nubes (**Figura 9**).

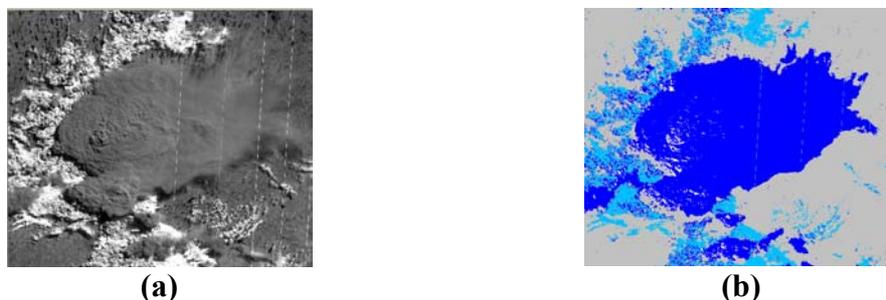


Figura 9. (a) Imagen reflectiva de la banda 5, (b) La misma imagen clasificada: nubes cálidas (celeste) y nubes mixtas (azul).

3.2 Imagen MODIS

Para este análisis también se dispuso de una imagen captada por el sensor MODIS a bordo del satélite Terra. Se optó por esta información por dos razones, la primera de ellas es que ambos satélites (SAC-C y Terra) forman parte de la llamada Constelación Matutina, con lo cual el sistema nuboso de interés fue captado por los dos sensores aproximadamente en el mismo instante, y la segunda, las bondades que ofrece el MODIS, un sensor hiperespectral, del cual se derivan varios productos referidos a las propiedades de las nubes.

En la **Figura 10** se muestra la misma escena captada por el sensor MMRS, banda 5 (1.55-1.70 μm) y por el sensor MODIS en su banda 6 (1.628-1.652 μm). Si bien ambos sensores observan en la misma longitud de onda central, la resolución espacial del MMRS es mejor, 175 m respecto a los 500 m del MODIS. Una simple inspección visual permitiría ver una mejor discriminación en el campo de cirrus captada por el MMRS, y obviamente un mayor detalle de la rugosidad. El resultado del análisis visual se complementará en el futuro a través del procesamiento y análisis numérico de las imágenes



Figura 10. (a) Imagen de reflectividad de banda 5 - sensor MMRS; (b) Ídem para la banda 6 del sensor MODIS.

La **Figura 11 (a)** muestra la imagen de temperatura de brillo calculada con la banda 31, MODIS (10.78-11.28 μm), donde se pueden identificar dos núcleos fríos, los cuales están indicando la posición aproximada de las corrientes ascendentes más intensas. Si se compara ésta con la **Figura 3**, el núcleo más frío del norte estaría coincidiendo con el tope emergente (*overshooting*) indicado con la letra A. A partir de la imagen de temperatura se puede estimar la altura de los topos de los elementos nubosos. Para ello, a la información del perfil vertical de temperatura de Ezeiza (Provincia de Buenos Aires), se le ajustó una función lineal para relacionar la temperatura con la altura y se obtuvo un mapa de alturas (en metros) de topos de nubes [**Figura 11 (b)**]. En esta figura se puede ver que las zonas correspondientes a los topos más emergentes, descritos en el párrafo anterior, superan los 14000 metros, y un fuerte gradiente de alturas en el sector oeste y sudoeste del sistema, rasgo típico en estos sistemas convectivos muy intensos.

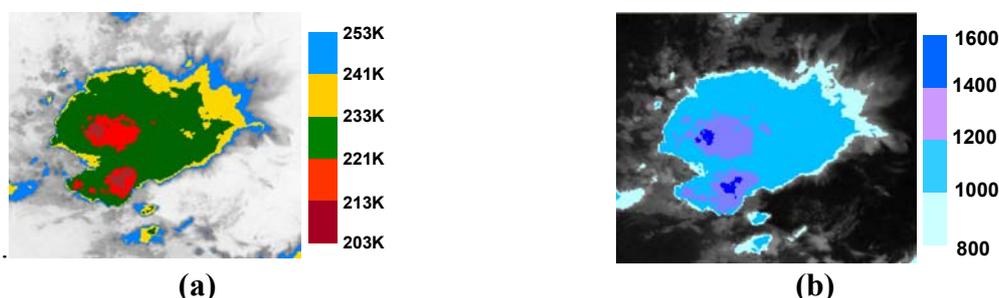


Figura 11. (a) Imagen MODIS de temperatura de brillo, banda 31(10.78-11.28 μm). (b) Altura de topos nubosos en metros

El índice BTM (*Brightness Temperature Differences*) es otro parámetro frecuentemente utilizado en el análisis de sistemas nubosos, definido por la diferencia entre dos imágenes de temperatura de brillo (TB) calculadas en dos longitudes de onda diferente Este parámetro se lo suele utilizar, combinado con, por Ej.: valores de reflectancias, para separar píxeles con nubosidad no transparente. Para el sensor NOAA-AVHRR, este parámetro está definido por la diferencia entre las TB de las bandas 4 (10.5-11.5 μm) y 5 (11.5-12.5 μm). Como el sensor MODIS posee dos bandas con aproximadamente las mismas longitudes de onda, se calculó el BTM con las bandas 31 (10.78-11.28 μm) y 32 (11.77-12.27 μm) respectivamente [**Figura 12 (a)**]. En trabajos más recientes (por Ej.:Chylek et al, 2006) define un BTM como la diferencia la banda 29 (8.4-8.7 μm) y la banda 31 [**Figura 12 (b)**], con esto se lograría filtrar los topos que no están formados sólo por hielo. La comparación de ambas imágenes muestra claramente que los elementos nubosos con menor desarrollo vertical, que no alcanzan a estar formados sólo por cristales, no aparecen en la segunda imagen. Es decir, en ésta se realza el sector de las nubes con topos formados sólo por cristales de hielo. Además, se pueden apreciar dentro de la zona de máximo espesor nuboso, áreas más claras, que podrían estar

asociadas a nubes tipo cirrus ubicadas por encima del yunque (*jumping cirrus*), dentro de la estratosfera (Fujita, 1982, Setvák et al, 2003).



Figura 12. (a) BTDR utilizando las bandas 31 y 32; (b) BTDR utilizando las bandas 29 y 31.

4. Conclusiones

En este trabajo se muestran resultados preliminares correspondientes a evaluar la utilidad de las imágenes captadas por el sensor MMRS a bordo del satélite argentino SAC-C, en el estudio de las propiedades macro y microfísicas de las nubes, centrándose este estudio en el caso de una nube de tormenta, con gran desarrollo vertical. Además, se comparan estos resultados con los obtenidos por otros sensores, y en particular con el sensor MODIS. Los resultados indican que es posible con los datos del satélite SAC-C detectar, y documentar propiedades macro y microfísicas de las nubes, y que éstos pueden ser ampliados al encarar estudios multisatelitales de la cobertura nubosa y de sus propiedades estructurales y radiativas, aprovechando su complementación en la resolución espectral, espacial y temporal.

Referencias

- Arking, A.; Childs, J. D. Retrieval of cloud cover parameters from multispectral satellite images. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 24, p. 322-333 1985.
- Chylek P.; Robinson S.; Dubey M. K.; King M. D.; Fu Q.; Clodius W. B. Comparison of near infrared and thermal infrared cloud phase detections. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. ?, 2006.
- Fujita T. T. Principle of stereographic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms. **Journal of Meteorological Society Japan**, v. 60, p. 355-368, 1982.
- Hunt, E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 99, p. 346-369, 1973.
- Rossow, W. B. Measuring cloud properties from space. **Journal of Climate**, v. 2, p 201-213, 1989.
- Setvák M.; Rabin R. M.; Doswell, C. A. y Levizzani V. Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7 and 3.9 μm spectral bands. **Atmospheric Research**, 67-68, p. 607-627, 2003.
- Setvák M.; Rabin R. M.: MODIS observations of deep convective cloud tops. Proc. The 2003 EUMESAT Meteorological Satellite Conference, Weimar, German. Disponible en <http://www.chmi.cz/meteo/sat/setvak/pub_ms.html>, 2003.
- Velasco, I.; Levi, Laura; Flores, A. L. Multispectral analysis of convective clouds developed over the argentine coast: a case study. **International Journal of Atmospheric Research**, v. 66, p. 145-158, 2003.
- Vidal, L.; Flores, A. L. y Velasco, I. Clasificación visual de nubes a partir de imágenes SAC-C sobre la provincia de Buenos Aires y sur del litoral. En: Congreso Argentino de Tecnología Espacial 2005, Córdoba, Argentina, Anales en CD-ROM 2005.

Agradecimientos

Este trabajo contó con el apoyo del subsidio UBACyT X239

A la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) por las imágenes cedidas para este trabajo.