



VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE EN EL NW DE LA PROVINCIA DEL NEUQUEN A PARTIR DE INFORMACIÓN SATELITAL

*Marisa Gloria Cogliati¹
Mariana Inés Suárez²*

Resumen

La complejidad del terreno y la falta de datos meteorológicos siguiendo el gradiente altitudinal obliga a la exploración de nuevos métodos o esquemas entre los que se encuentra el análisis por medio de modelos o imágenes satelitales. El presente trabajo pretende describir el marco de información con el que se cuenta en el NW neuquino y la introducción de análisis espacial de distribución de la temperatura de superficie a partir de imágenes NOAA- AVHRR con miras a la inclusión futura de nuevos esquemas de estudio.

La temperatura del aire presenta gran variabilidad espacial, principalmente en los valores mínimos, una idea de esta distribución puede asociarse a la temperatura de superficie que es obtenida a partir del análisis de imágenes NOAA-AVHRR. Este trabajo presenta el análisis de situaciones particulares de la temperatura de superficie de la zona NW de la Provincia de Neuquén utilizando imágenes de satélites NOAA en alta resolución (AVHRR) e imágenes LANDSAT de la región. La temperatura de superficie obtenida utilizando la información de los canales 4 y 5 del sensor AVHRR presenta la distribución espacial de la temperatura del suelo que pone en evidencia la complejidad del comportamiento, asociado al relieve. Se observa la dependencia de las isotermas con la altura, alcanzando los menores valores de temperatura de superficie en los picos. Esta metodología permitiría incorporar información cuya escala consideraría con mayor detalle que en escala sinóptica de la temperatura de superficie de píxeles de aproximadamente 1 km². El análisis posterior de una mayor cantidad de situaciones, permitiría realizar mapas estacionales de temperatura de superficie en una escala que no es posible obtener con el instrumental que se encuentra instalado en este momento, pudiendo asociarse posteriormente al comportamiento de la temperatura del aire.

¹ Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue. E-mail: cogliati@uncoma.edu.ar

² Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue. E-mail: msuarez@uncoma.edu.ar

La mediciones de superficie de la temperatura media del aire en distintas estaciones de la región en el período 1993 a 1997 presenta una gran amplitud anual (aprox 32°C) en todas las estaciones. La temperatura media máxima es de 29 °C en Puesto Vallejos y 18.9 °C en Pampa de Chacaico mientras que la temperatura media mínima es -12.5 °C en la misma estación. Las estaciones ubicadas en el oeste de la región (Cajón de los Chenques, Las Lagunas, Buta Mallín, Estación Chacaico) presentan menores valores de temperatura mínima media y máxima media, mientras que las estaciones ubicadas hacia el este y al sur de la región presentan mayores valores.

Palabras clave: topoclimatología, temperatura de superficie, satélites

Introducción

El estudio de la temperatura y otras variables meteorológicas en zonas de terreno complejo, tales como el noroeste de la Provincia del Neuquén, son comparativamente escasos en relación a estudios realizados para zonas de valle o relieves llanos. Los principales factores se deben a la falta de datos meteorológicos siguiendo el gradiente altitudinal y la complejidad del terreno. El área de estudio seleccionada además, por su gran extensión y problemas asociados a comunicaciones, presenta inaccesibilidad en épocas invernales. Por ello se hace necesario incorporar métodos alternativos para el estudio de variables meteorológicas. La búsqueda de nuevos métodos se encuentra en un proceso de cambio permanente, adquiriendo gran importancia el análisis por medio de modelos físicos o de sensores remotos.

Este trabajo presenta el análisis de la temperatura de brillo y de superficie del satélite LANDSAT 7 ETM+ para una escena que comprende el NW de la Provincia de Neuquén, a partir de información del canal térmico, para describir la distribución espacial de la temperatura de superficie en escala local o regional y en zonas con muy baja densidad de datos en superficie. El análisis posterior comprendiendo una mayor cantidad de imágenes, permitirá realizar mapas temáticos de distinta escala temporal y su posterior correlación con observaciones en superficie.

En satélites como los LANDSAT TM y ETM+ es más complejo obtener valores de temperatura de superficie que en el caso de los satélites NOAA- AVHRR dado que poseen una sola banda térmica y requieren para el cálculo modelos de transferencia de radiación y emisividad de superficie. Por esta razón la información de la banda térmica de los LANDSAT TM y ETM no ha sido extensivamente usada para mapeos de temperatura de superficie, aunque posea una resolución espacial alta (Li y otros, 2000).

Las imágenes satelitales LANDSAT TM han sido ampliamente estudiadas para diferentes aplicaciones. Las principales dificultades para el cálculo de la temperatura de superficie residen en problemas con la calibración, baja frecuencia temporal y dificultades en la selección de un algoritmo apropiado (Qin y otros, 2001). En

general la banda térmica del LANDSAT TM se usa para determinar la temperatura de brillo al nivel de satélite (Mansor, 1994; Saraf, 1995; Zhang, 1997) o simplemente se usa el valor del número digital (DN) para las mismas aplicaciones (Ritchie, 1990; Oppenheimer, 1997).

La temperatura del aire presenta una importante variabilidad espacial y temporal, asociada a variaciones de altura del terreno, y variación diurna y estacional. Alturas mayores a 600 m son suficientes para causar diferencias verticales de elementos climáticos y cobertura vegetal (Barry, 1981). Los factores geográficos que influyen los elementos meteorológicos en zonas de montaña son: la latitud, la altitud y la topografía. La radiación solar, radiación neta y la temperatura decrecen en mayores latitudes produciendo un descenso de las líneas de vegetación y nieve en altura y, además, influyen el ritmo de la variación estacional y diurna. El efecto de la altitud sobre los elementos climáticos se observa sobre la presión, la densidad del aire, la presión de vapor y la insolación. La presencia de altos sistemas montañosos provoca diferencias notorias de temperatura entre las cumbres y el piso de los valles. Las oscilaciones diarias son también marcadas y se incrementan con la altura.

El comportamiento anual de la temperatura es estacional, presentando los máximos valores en los meses de verano y los mínimos en los meses de invierno. La ubicación en zona de latitudes medias y la influencia de las masas de aire determinan tal variabilidad.

La pendiente y la orientación del terreno marcan efectos fundamentales en el ingreso de radiación y en las condiciones de temperatura (Barry, 1981)

En zonas de altas montañas, especialmente sobre la línea de vegetación, la vida de plantas y animales es controlada por el clima cercano a la superficie (microclima). Además, la distribución espacial del microclima, forma un mosaico debido a los efectos de la topografía que causa topoclimas distintivos. La combinación de efectos topo y microclimáticos determina la variabilidad en la cobertura vegetal (Barry, 1981).

La gran intensidad de radiación solar en altas altitudes resulta en alta temperatura de superficie. Turner (1958) midió temperaturas de 80°C en julio de 1957 en humus oscuro a 2.070 m de altura en Ötztal, Austria. El sitio tenía una exposición SW, con una pendiente de 35° y con una temperatura del aire a 2 m de 30 °C.

La diferencia entre la temperatura del suelo y del aire depende de las condiciones de tiempo meteorológico. Mediciones detalladas a 2.072 m cerca de Obergürgl en Austria (Aulizky, 1962) mostró que existe una relación lineal entre los valores medio y extremos de la temperatura del suelo y del aire cuando el suelo no está congelado.

En este trabajo, se selecciona una metodología para la obtención de la temperatura de superficie, a partir de la banda 6 de los satélites LANDSAT 7 ETM+ en la zona del NW de la provincia del Neuquén y de la información disponible en superficie.

Área de Estudio

El área de estudio comprende el noroeste de la Provincia del Neuquén, comprendiendo los Departamentos Minas y Chos Malal desde los 36° 10' S a 37° 30' S y los 69° 30' W a 71° 15' W. La conformación física del área presenta rasgos particulares. La topografía está dominada por tres cordones orográficos paralelos alineados longitudinalmente y separados entre sí por depresiones que conforman valles fluviales. Estos cordones son la Cordillera de los Andes al oeste, la Cordillera del Viento en el centro y el Macizo Tromen en el este. Las alturas máximas se ubican en los macizos del centro y el este de la región y corresponden al volcán Domuyo (4.709 m s.n.m.) y al volcán Tromen (3978 m s.n.m.). Las líneas de nivel del terreno y la zona de estudio se detallan en la Figura 1 (U.S. Geological Survey, Earth Resources Observation and Science (EROS)).

Datos utilizados

En este estudio se analizó una imagen LANDSAT 7 con el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) adquirida el 7 de febrero de 2001 (path 232/row 086). Comprendiendo el sector del NW de la provincia de Neuquén representado en la Figura 1. La imagen fue creada por U.S. Geological Survey (USGS) y contiene los datos en formato GeoTIFF (Geographic Tagged Image-File Format), producto LIG.

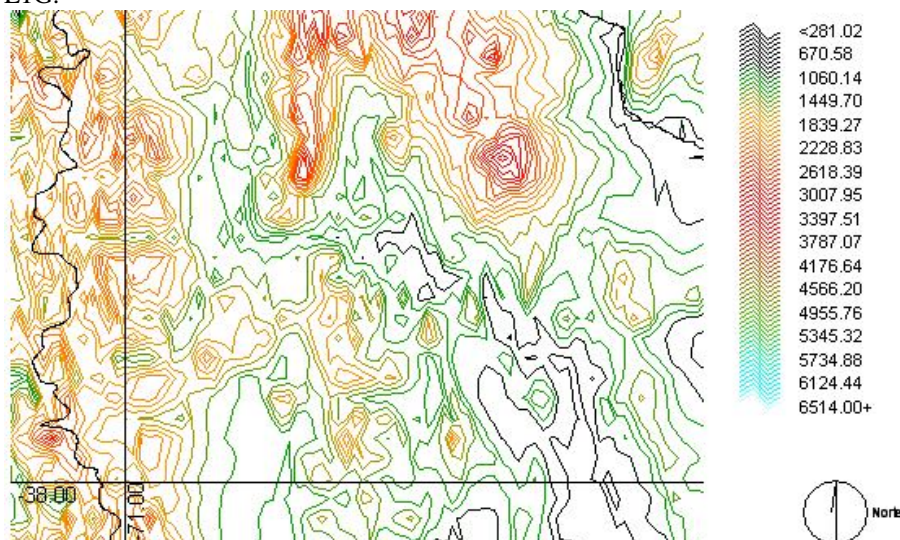


Figura 1: Curvas de nivel del sector NW de la Provincia de Neuquén (las líneas negras representan el límite provincial e internacional de la provincia). Datos: USGS, Shuttle Radar Misi3n.

Metodología

Un éxito limitado se ha alcanzado para determinar la temperatura de superficie utilizando datos térmicos de los satélites LANDSAT Thematic Mapper (TM) y ETM+. Los satélites TM y ETM+ tienen una banda infrarroja (10.44 - 12.42 μm), por lo que el uso de un algoritmo para corrección del tipo split-window es imposible, pero la alta resolución espacial (120 m para TM y 60 m para ETM+) hace el estudio térmico infrarrojo muy atractivo desde el punto de vista local y regional. En este trabajo se analiza la temperatura de brillo del canal térmico del satélite LANDSAT 7 con el sensor ETM + y se estima la temperatura de superficie a partir de datos de emisividad calculados por medio del índice de vegetación (NDVI) y la estimación de la trasmittancia atmosférica (Zhang y otros, 2006). La escena de satélite se procesó utilizando el software para procesamiento de imágenes raster, Idrisi versión Kilimanjaro.

Tratamiento de Imágenes

Para el cálculo de la temperatura de brillo del canal 6 se efectuó el cálculo de la radianza espectral. A partir de los niveles digitales de la banda térmica, se calculó la radianza espectral (L_{sensor}) utilizando la Ec. 1:

$$L_{\text{sensor}} = \text{gain} * \text{DN} + \text{bias} \quad (1)$$

Donde L_{sensor} es la radianza espectral en la banda térmica en $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ ster mm})$; gain es la pendiente de la función de conversión radianza/DN; DN es el número digital en un determinado píxel a partir de un producto L1G; y bias es la ordenada al origen de la ecuación e conversión radianza/DN (Landsat Project Science Office, 2002). Los valores de gain y bias pueden encontrarse en el archivo encabezado de las imágenes ETM+.

Los valores de radianza de la banda térmica de los satélites ETM+ fueron transformados a temperatura de brillo en el tope de la atmósfera, usando constantes de calibración proporcionadas por la oficina del Proyecto Landsat (2002) de acuerdo a la Ec (2):

$$T_{\text{sensor}} = \frac{K_2}{\ln(K_1 / L_{\text{sensor}} + 1)} \quad (2)$$

Donde T_{sensor} es la temperatura efectiva del satélite (temperatura de brillo) en $^{\circ}\text{K}$ y K_1 y K_2 son constantes de calibración de pre lanzamiento, para Landsat 7 ETM+, $K_1 = 666.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr mm})$ y $K_2 = 1282.71 \text{ K}$ (Landsat Project Science Office, 2002). Los valores de sesgo (bias) y ganancia (gain) se obtienen del archivo de encabezado (header).

La temperatura calculada en la Ec. (2) no es la temperatura de superficie, si no que es la temperatura de brillo al tope de la atmósfera (Zhang y otros, 2006).

Para obtener la temperatura de superficie a partir de la temperatura de brillo, podemos utilizar varios modelos distintos, sin embargo, dichos modelos requieren de extensa información de superficie que no siempre está disponible en nuestra zona.

Qin y otros (2001) desarrollaron el algoritmo de mono ventana, que se expresa:

$$T_{\text{sup}} = \frac{a_6(1 - C_6 - D_6) + [b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6]T_{\text{sensor}} - D_6T_a}{C_6}, \quad (3)$$

Donde T_{sup} es la temperatura de superficie en K y T_{sensor} es la temperatura de brillo en K calculado a partir de la banda 6 del satélite Landsat ETM+, T_a es la temperatura efectiva media atmosférica (K), a_6 y b_6 son constantes: a_6 es -67.355351 y b_6 es 0.458606 para la temperatura de superficie entre 273.5 y 343.5 K. C_6 and D_6 deben calcularse de acuerdo a Ec. (4) y Ec.(5):

$$C_6 = \varepsilon\tau_6 \quad (4)$$

$$D_6 = (1 - \tau_6)[1 + (1 - \varepsilon)\tau_6] \quad (5)$$

Donde ε es la emisividad de la superficie y τ_6 es la transmitancia atmosférica. τ_6 puede ser estimado a partir del contenido de vapor de agua y T_a puede calcularse a partir de la ecuación lineal para la atmósfera estándar en el verano de latitudes medias (6):

$$T_a = 16.0110 + 0.92621T_o \quad (6)$$

Donde T_a es la temperatura media efectiva de la atmósfera y T_o es la temperatura del aire cercana a la superficie.

Cálculo de la emisividad, a partir del índice verde:

De acuerdo con Van de Griend and Owe's (1993) la relación entre los valores de NDVI y los de emisividad pueden expresarse según (7) para rangos de NDVI entre 0.157 y 0.727.

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \times \ln(\text{NDVI}) \quad (7)$$

donde ε es la emisividad y NDVI es el Índice de Vegetación en Diferencias Normalizadas calculado a partir de (8).

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{banda4} - \text{banda3})}{(\text{banda4} + \text{banda3})} \quad (8)$$

Si el valor de NDVI se encuentra fuera del rango (0.157–0.727), se divide en 5 intervalos y se puede incluir los valores estimados de emisividad de acuerdo a Zhang y Wang (2001). Estos valores emisividad corresponden a 0.99 cuando el índice de NDVI está entre 0.727 y 1.0 ; a 0.955 cuando el NDVI es entre 0.157 y -0.18; a 0.965 cuando el NDVI es de -0.18 a -1.0 y a 0.985 cuando el índice de NDVI es de -1.0. Al efectuar el cálculo del índice de vegetación es necesario adecuar la resolución espacial de las bandas 3 y 4 a una resolución similar a la de la banda 6, que se reduce a la mitad.

Muchos factores afectan la recuperación de la temperatura de superficie a partir de los datos del infrarrojo térmico del satélite, pero algunos de ellos como la transmitancia, la humedad del aire, la radianza entrante y saliente son difíciles de obtener.

Discusión y Resultados

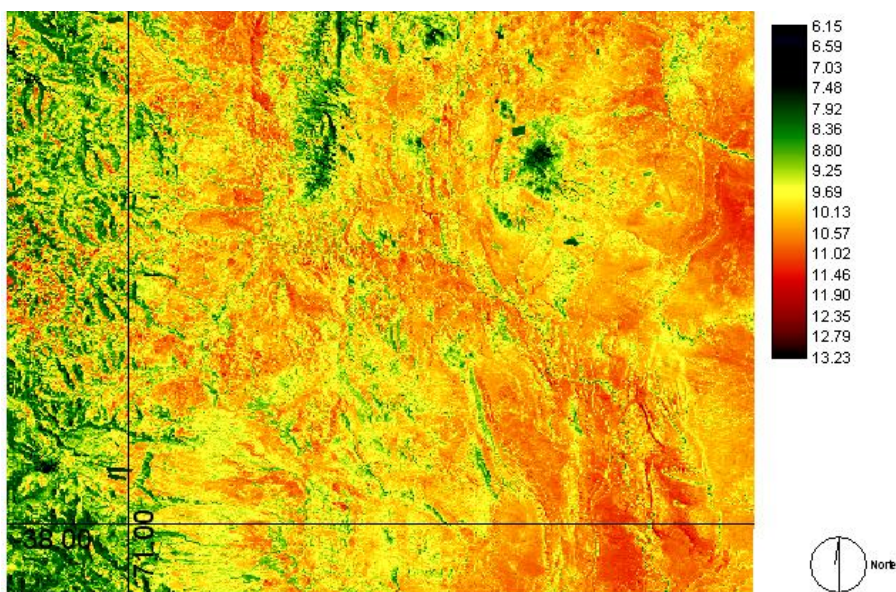


Figura 2: Radianza espectral calculada mediante Ec. (1) en la imagen satelital Landsat ETM+, del 7 de febrero de 2001 (path 232/row 086).

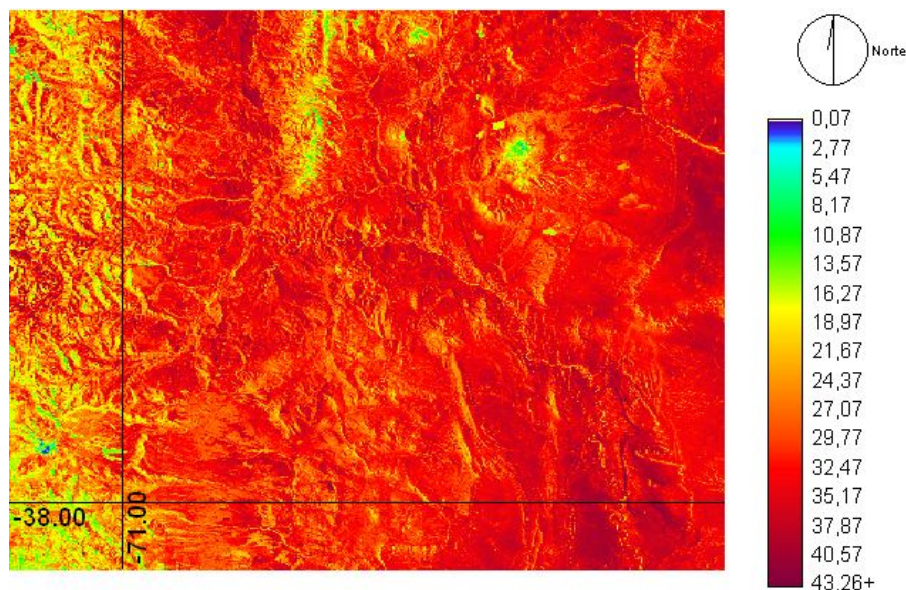


Figura 3: Temperatura de Brillo en el tope de la atmósfera calculada mediante Ec. (2) en la imagen satelital Landsat ETM+ del 7 Febrero de 2001 (path 232/row 086).

La imagen de temperatura de brillo del canal térmico del LANDSAT 7 ETM+ (Figura 3) correspondiente al NW de Neuquén indica que la temperatura presenta una variabilidad espacial, que se correlacionaría bien con las diferencias de altura de la zona que se presentan en la Figura 1.

Las zonas más bajas del terreno, que coincidirían con el piso de los valles fluviales, presentan valores altos de temperatura, de alrededor de los 30° C a 37° C (ver Figura 3).

En las zonas de mayor altura, tales como las cumbres de los cordones montañosos de la Cordillera del Viento y el Macizo Tromen, se exhiben los valores más bajos de temperatura de brillo, que en general están en el orden de los 1° C a los 8° C. En estos casos deberá analizarse desde el punto de vista de la cobertura de nieve, punto que será analizado en futuros trabajos. Los mínimos valores considerados corresponderían a geoformas de altura ubicadas principalmente en el sector sudoeste de la imagen. Esto se asociaría a los factores de altitud y latitud.

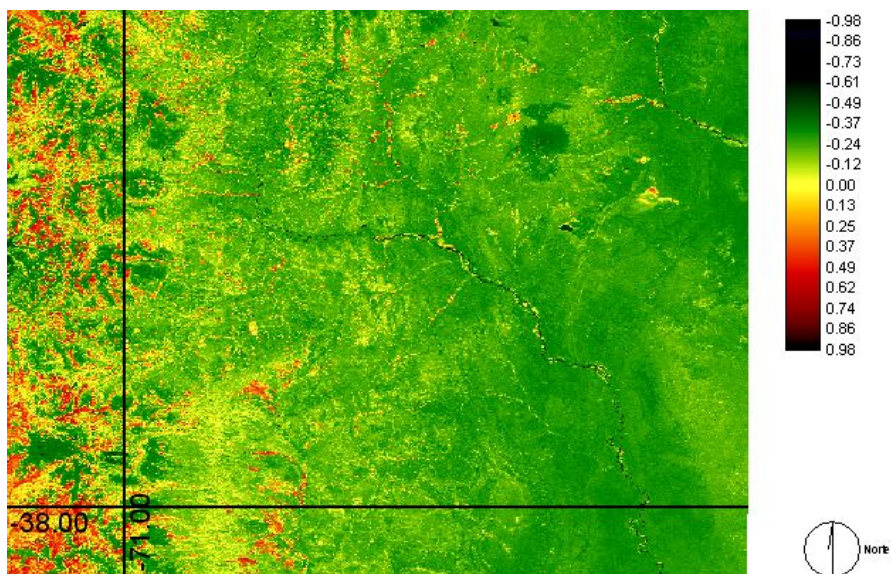


Figura 4: NDVI calculado mediante Ec. (8) para la imagen satelital LANDSAT ETM del 7 Febrero de 2001 (path 232/row 086) para el NW de la provincia de Neuquén.

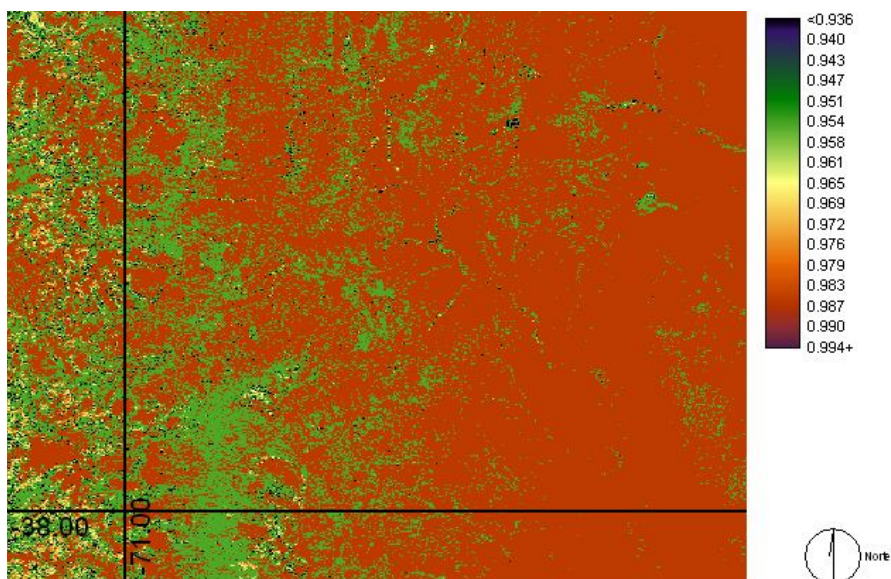


Figura 5: Emisividad calculada mediante Ec. (7) para la imagen satelital LANDSAT7 ETM+ del 7 Febrero de 2001 (path 232/row 086) para el NW de la provincia de Neuquén.

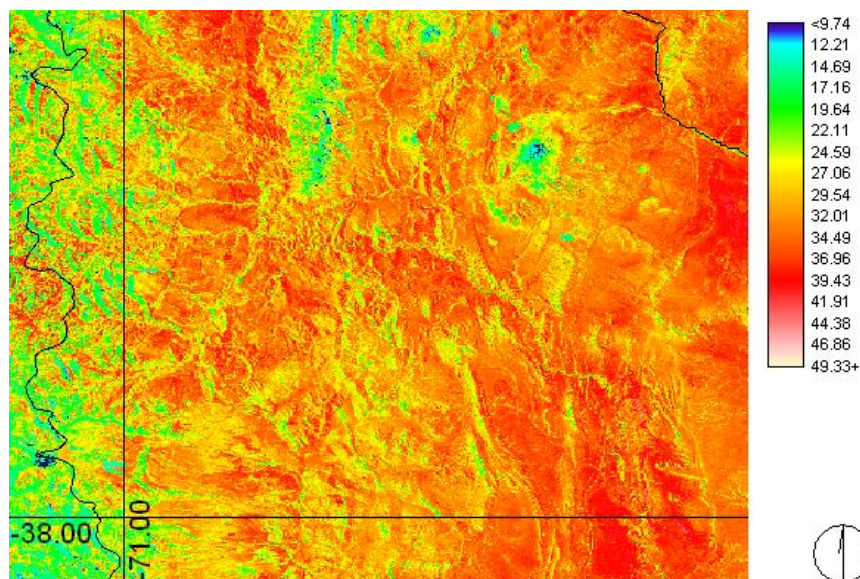


Figura 6: Temperatura de superficie ($^{\circ}\text{C}$) calculada mediante Ec. (3) para la imagen satelital LANDSAT7 ETM+ del 7 Febrero de 2001 (path 232/row 086) para el NW de la provincia de Neuquén.

El cálculo de NDVI en el NW de Neuquén expresado en la Figura 4 indica una variabilidad espacial notoria de la cobertura vegetal, que disminuye de oeste a este en forma progresiva. Los valores máximos del orden de los 0.4 a 0.5 se encuentran principalmente en el sector oeste de la escena y también en los valles fluviales que siguen los cursos de agua tributarios del río Curí Leuvú. Los valores mínimos entre -0.1 y -0.4 se observan en gran parte de la imagen: sector centro y este. La variabilidad espacial que presenta la cobertura vegetal se asociaría en parte a las diferencias de precipitación que se presenta a sotavento de la cadena montañosa. Los índices de cobertura en el resto de la imagen presentan un valor más homogéneo, con valores entre -0.1 y -0.4 . Esta distribución presenta una variación del índice de cobertura vegetal en esa zona, que estaría asociado a la influencia de los valores de precipitación y humedad.

La Figura 6, presenta la temperatura de superficie en $^{\circ}\text{C}$ calculada aplicando la mono ventana de Qin (2001), el procedimiento requiere de una estimación de la transmitancia atmosférica en función de la humedad del aire y la temperatura media del aire simultánea con el momento de la obtención de la imagen. Los datos medios se estimaron a partir de datos de los reanálisis del NCEP (Nacional Centres of Atmospheric Research). Este procedimiento corrige los valores en el tope de la atmósfera a partir de la consideración de las condiciones atmosféricas.

Conclusiones

La determinación de la temperatura de superficie utilizando datos térmicos de los satélites LANDSAT ETM+, reviste una mayor dificultad que en el caso de los satélites NOAA. Los satélites LANDSAT ETM+ tienen una banda infrarroja (10.44 - 12.42 μm), por lo que el uso de un algoritmo para corrección del tipo split-window es imposible. Sin embargo, la alta resolución espacial (60 m para el sensor ETM+) hace el estudio térmico infrarrojo de estos satélites, muy atractivo desde el punto de vista local y regional. En este trabajo se analiza la temperatura de brillo y temperatura de superficie del canal térmico del satélite LANDSAT 7 con sensor ETM+ en una escena que comprende el NW de la provincia de Neuquén.

La temperatura de superficie en $^{\circ}\text{C}$ fue calculada aplicando la mono ventana de Qin (2001), el procedimiento requiere de una estimación de la trasmittancia atmosférica en función de la humedad del aire y la temperatura media del aire simultánea con la obtención de la imagen.

Este análisis brinda información distribuida espacialmente de las variaciones de temperatura de superficie en píxeles con 60 m de resolución, mostrando concordancia con variabilidad espacial asociada a la topografía. Este hecho permitiría realizar análisis de zonas con baja densidad de información meteorológica o difícil acceso.

Sin embargo, debe contarse para su adecuado tratamiento de datos meteorológicos de superficie tales como contenido de humedad atmosférica y temperatura media del aire cercano a la superficie, simultáneos al pasaje del satélite.

Referencias

- AULITZKY, H. (1962) *Die Bodentemperaturverhältnisse einer zentralalpinen Hochgebirgs-Hangstation II*. Archiv. Met. Geophys. Biokl., B, vol. 11, 301-62.
- BARRY, R.G. (1981) *Mountain weather and climate*, Methuen. London and New York. 309 pp.
- CRESSWELL, M. P.; MORSE, A. P.; THOMSON, M. C. AND CONNOR. S. J. (1999). *Estimating surface air temperature, from Meteosat land surface temperatures, using an empirical solar zenith angle model*. Int. J. Remote Sensing, Vol. 20, No. 6, 1125-1132.
- HUMES, K. S.; KUSTAS, W. P.; MORAN, M. S.; NICHOLS, W. D. AND WELTZ, M. A. (1994) *Variability of emissivity and surface temperature over a sparsely vegetated surface*. Water Resources Research, vol. 30, 1299-1310.
- LI, F.; JACKSON, T.; KUSTAS, W.; SCHMUGGE, T.; FRENCH, A.; COSH, M. and Bindlish, R. (2004) *Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX*. Remote Sensing of Environment, vol. 92, issue 4, 30 September 2004, 521 – 534.
- MANSOR, S. B; CRACKNELL, A. P; SHILIN, B. V. and GORNYI, V. I. (1994) *Monitoring of underground coal fires using thermal infrared data*. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, 1675-1685.
- OPPENHEIMER, C. (1997) *Remote sensing of the color and temperature of volcanic lakes*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, 5-37.
- PRICE, J. C. (1984) *Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer*. Journal of Geophysical Research, vol. 89, 7231-7237.
- QIN, Z.; KARNIELI, A. and BERLINER, P. (2001) *A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data an its application to the Israel – Egypt border region*. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, nº 18, 3719 – 3746.
- RITCHIE, J. C.; COOPER, C. M. and SCHIEBE, F. R. (1990) *The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi*. Remote Sensing of Environment, vol. 33, 137-148.
- SARAF, A. K.; PRAKASH, A.; SENGUPTA, S. and GUPTA, R. P. (1995) *Landsat TM data forestimating ground temperature and depth of subsurface coal fire in the Jharia coalfield, India*. International Journal of Remote Sensing, vol.16, 2111-2124.
- TURNER, H. (1958) *Maximal tempemperaturen oberflächennaher Bodenschichten au der alpinen Waldgrenze*. Wetter u. Leben, vol. 10, 1-12.
- VAN DE GRIEND, A. A. and OWE, M. (1993) *On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces*. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, No 6, 1119-1131.
- YANG, J. and WANG, Y.Q. (2001) *Estimation of land surface temperature using landsat-7 etm+ thermal infrared and weather station data* . Proceedings of Huangshan International Thermal Infrared Remote Sensing Workshop, July 14-17, Huangshan, Anhui, P.R.China.

ZHANG, J, WANG, Y. and LI, YAN (2006) *C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6*. Computers & Geosciences, vol. 32 1796–1805.

ZHANG, X.; VAN GENDEREN, J. L. and KROONENBERG, S. B. (1997) *A method to evaluate the capability of Landsat 5 TM band 6 data for sub pixel coal fire detection*. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, 3279–3288.