

INFLUENCIA DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LOS DIAGRAMAS $NDVI-T_s$ EN EL CÁLCULO DE LA FRACCIÓN EVAPORABLE

• Daniela Girolimetto • Virginia Venturini •
• Leticia Rodríguez •
Universidad Nacional del Litoral, Argentina

Resumen

En este trabajo se analiza el efecto de la resolución espacial de las imágenes utilizadas para conformar el espacio *Normalized Difference Vegetation Index* ($NDVI$)-temperatura de superficie (T_s). Este espacio es muy utilizado para el monitoreo de variables ambientales, tales como la evapotranspiración (ET) y la fracción evaporable (FE). El método propuesto por Jiang e Islam (2001) fue seleccionado para estudiar el efecto de la resolución espacial en el cálculo de la FE. Para esto, se analizaron resoluciones espaciales que varían entre 1×1 km, comunes en las imágenes de sensores térmicos, hasta 10×10 km, consistente con las imágenes de sensores de microondas pasivos (MP). Los resultados sugieren que el espacio triangular $NDVI-T_s$ permite obtener valores razonablemente precisos de FE con imágenes de baja resolución espacial, como la de los MP, siempre que el borde frío pueda ser determinado con imágenes de resolución espacial 1×1 km. Si no es posible calcular dicho borde con imágenes de resolución 1×1 km, los resultados serían inciertos y por tanto deben ser cuidadosamente analizados.

Palabras clave: temperatura de superficie, MODIS, evapotranspiración, $NDVI$.

Introducción

El manejo de las actividades agrícola y forestal, así como el de los recursos hídricos, requiere del balance de energía radiativa a nivel de la superficie terrestre a diferentes resoluciones espaciales y temporales. Así, en los últimos años se han desarrollado diferentes métodos para calcular el flujo de calor latente o evapotranspiración (ET) bajo diferentes condiciones de humedad de la superficie y escalas espacio-temporales (Jackson *et al.*, 1977; Jiang e Islam, 2001; Norman *et al.*, 2003; Rivas y Caselles, 2004). Estas metodologías requieren de datos de temperatura de la superficie terrestre (T_s). Con la tecnología de satélite es posible obtener T_s con una distribución espacio-temporal, que es fundamental para el monitoreo de variables ambientales y ecosistemas en general. Un ejemplo son los mapas de T_s generados

con información del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y distribuidos en forma gratuita a la comunidad científica. MODIS es uno de los sensores a bordo de los satélites EOS-Terra y EOS-Aqua operados por la NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov>). Estos mapas poseen una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 1×1 km, y han sido validados mediante datos de campo bajo diferentes condiciones de la superficie (Wan *et al.*, 2002; Wan *et al.*, 2004; Coll *et al.*, 2005; Wan, 2008).

En los últimos años se han desarrollado diferentes metodologías para calcular el balance de energía, más precisamente la ET, con datos de satélite. Muchos de estos métodos se basan en la relación contextual entre T_s y un índice de vegetación (Jiang e Islam, 1999 y 2001; Nishida *et al.*, 2003; Stisen *et al.*, 2008). De todos estos métodos, se destaca

aquí la simplicidad del método de Jiang e Islam (2001), que calcula ET y la fracción evaporable (FE) espacialmente distribuida, basándose en la interpretación contextual de la relación entre la T_s y el índice de vegetación diferencial normalizado ($NDVI$) (Jiang e Islam, 1999). Básicamente, este método utiliza el diagrama $NDVI-T_s$ de forma tal que FE puede ser calculada con un mínimo número de parámetros de calibración.

La principal ventaja de una formulación contextual es que es válida para una gran gama de condiciones superficiales y posiblemente también sobre un amplio rango de resoluciones espaciales. Otra ventaja sobresaliente de este contexto es que no se requiere de gran exactitud en las estimaciones de la temperatura de la superficie. Jiang e Islam (2001), Jiang *et al.* (2004) y Venturini *et al.* (2004) demostraron que la temperatura obtenida con una sola banda térmica es suficiente para extraer valores razonablemente precisos de FE. Por otra parte, Kustas *et al.* (2003) y French *et al.* (2005) han estudiado la variabilidad de la geometría del espacio $NDVI-T_s$ a escalas espaciales inferiores a 1 km². Los autores desarrollaron un método para bajar la resolución de la T_s .

Los sensores térmicos presentan el inconveniente de no poder registrar las ondas infrarrojas térmicas bajo condiciones climáticas adversas, esto significa que no es posible obtener valores de T_s en días nublados. Una solución para este problema serían los sensores de microondas pasivos que registran información diariamente y operan con longitudes de ondas más largas, que no son afectadas por las condiciones climáticas ni por la fuente de iluminación. Esta fuente alternativa de datos podría sustituir los mapas de T_s obtenidos con sensores térmicos, previo análisis del efecto que tiene la mala resolución espacial de los MP.

En este trabajo se investiga el efecto que tiene la resolución espacial de la variable T_s en el espacio $NDVI-T_s$, ya que este espacio define el cálculo del parámetro ϕ del modelo propuesto por Jiang e Islam (2001) para la estimación de la FE.

Método de Jiang e Islam

La metodología desarrollada por Jiang e Islam (2001) propone una modificación de la ecuación de Priestley y Taylor (1972), reemplazando el parámetro α de Priestley-Taylor por un nuevo parámetro ϕ , como se observa en la ecuación (1):

$$ET = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G) \quad (1)$$

donde γ es la constante psicrométrica; Δ , la pendiente de la curva de presión de saturación del vapor de agua; R_n , la radiación neta que llega a la superficie; G , el flujo de calor del suelo, y ϕ , el parámetro de Jiang e Islam.

La ecuación modificada (ecuación (1)) puede ser aplicada a regiones con cobertura vegetal heterogénea y con diferentes condiciones de humedad en la superficie, a diferencia de la ecuación original de Priestley y Taylor, que fue desarrollada para superficies saturadas (Jiang e Islam, 1999). Esta metodología basa la modificación introducida en la interpretación del espacio $NDVI-T_s$, donde los píxeles adoptan una distribución trapezoidal al ser graficados, tal como se puede observar en la figura 1 (Jiang e Islam, 1999).

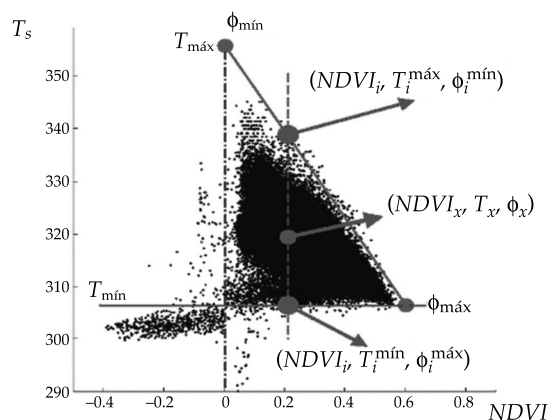


Figura 1. Espacio contextual $NDVI-T_s$ y definición de los parámetros del método de Jiang e Islam (fuente: Jiang e Islam, 1999).

La interpretación física de la relación $NDVI-T_s$ ha sido objeto de diversas investigaciones y discusiones. Estas discusiones se centran en la definición del lado superior (o borde cálido) del triángulo, en donde los píxeles con altos valores de T_s tienden a alinearse en forma de una recta bien definida en el rango del $NDVI$ (ver figura 1). Jiang e Islam (2001) interpretaron que el borde superior constituye el mínimo valor de ET para cada clase de $NDVI$, mientras que el borde frío (o lado inferior del triángulo) representa la máxima ET. De esta forma, la magnitud de ET para cada píxel varía dentro de los límites del triángulo (ver figura 1). Por esto es necesario obtener para cada píxel el valor de ϕ , el cual se calcula mediante una interpolación lineal entre ambos lados del triángulo.

El parámetro ϕ puede variar desde cero para un suelo desnudo y seco hasta 1.26, para una superficie saturada. Cabe aclarar que el término superficie saturada se considera de ahora en más como el conjunto suelo-vegetación saturado de agua o un píxel donde hay una lámina de agua en superficie. La variación de ϕ depende de las características físicas de la superficie. Estas características estarían asociadas con humedad, conductancia y temperatura de la superficie (Jiang e Islam, 2001).

Para obtener el valor de ϕ se debe definir la pendiente del lado superior del triángulo para los píxeles cuyos $NDVI$ estén comprendidos en el rango $[0, 1]$. El valor mínimo global de ϕ ($\phi_{\min} = 0$) está asociado con una superficie seca sin vegetación, con un $NDVI = 0$ y una temperatura alta denominada $T_{\max}$, que se obtiene como la intersección del borde superior del triángulo con la recta $NDVI = 0$. El valor máximo global de ϕ ($\phi_{\max} = \alpha = 1.26$) se define para la temperatura media de los píxeles en los que se observe agua libre ($T_{\min}$). Una vez definidas $T_{\max}$ y $T_{\min}$, correspondientes a $\phi = 0$ y $\phi = 1.26$, respectivamente, se realiza la interpolación lineal de la que resulta la fórmula siguiente (Venturini *et al.*, 2004):

$$\phi = \phi_{\max} \left(\frac{T_i - T_{\max}}{T_{\min} - T_{\max}} \right) \quad (2)$$

donde T_i es la temperatura del píxel i y $\phi_{\max} = 1.26$.

Tratamiento de las imágenes

La temperatura de cualquier superficie posee una variabilidad temporal notable, con diferencias que pueden llegar a los 10 °K entre el día y la noche. La variabilidad espacial de T_s depende del tipo de cobertura vegetal que caracteriza el área en estudio. Se considera que la temperatura de un píxel es el resultado de la cantidad de radiación emitida por una superficie mixta (suelo y vegetación), la que es captada por el sensor como una señal única (Venturini *et al.*, 2008). Teniendo en cuenta esto, se centró la atención en las imágenes de T_s debido a la dinámica que dicha variable presenta frente al $NDVI$, el que puede considerarse casi constante durante 10 o 15 días (Huete *et al.*, 1999; Huete *et al.*, 2002).

Con el fin de obtener los espacios $NDVI-T_s$, se procesaron imágenes de T_s correspondientes al producto MOD11 (<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/temp.htm>). Se georregistraron las imágenes a partir de las coordenadas geográficas (latitud y longitud) originales de las mismas. Posteriormente, se procedió a cortar el área que comprende la región en estudio. Luego, las imágenes de T_s fueron agregadas mediante simple promedio aritmético a partir de la imagen original a resolución 1×1 km. Por ejemplo, para obtener T_s a resolución 2×2 km, se promediaron de a cuatro los píxeles a partir de la imagen de T_s a resolución 1×1 km. Seguidamente se calculó el $NDVI$ a partir de las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Las imágenes de $NDVI$ se trabajaron con su resolución original (1×1 km), a fin de conservar el detalle. Como el $NDVI$ es obtenido en función de dos bandas, una en el espectro visible y la otra en el infrarrojo cercano, el proceso de agregación de este índice requiere de un análisis que está fuera del alcance de este trabajo. Por lo tanto, para poder equiparar el tamaño de las matrices de $NDVI$ con las de T_s se recurrió al “pixelado” de estas últimas. Se subdividieron

los píxeles agregados en unidades menores, más específicamente en píxeles de 1×1 km, de igual valor. Por ejemplo, cada píxel de resolución 2×2 km fue dividido en cuatro píxeles de 1×1 km de igual temperatura. Este procedimiento se denominó “pixelado” de las imágenes de T_s agregadas.

Con las matrices de T_s y $NDVI$ de igual dimensión se obtuvieron los espacios contextuales $NDVI-T_s$ y se compararon las geometrías de los diagramas obtenidos. Finalmente, se obtuvieron las imágenes de ϕ y se contrastaron los resultados para las diferentes resoluciones analizadas. De esta forma se simuló la fusión de imágenes de T_s provenientes de un sensor

MP con imágenes de $NDVI$, sin degradar la resolución espacial de estas últimas.

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca inferior del río Salado, provincia de Santa Fe, Argentina, ubicada entre los 29° y 31° de latitud sur, y los 62° y 60.5° de longitud oeste (figura 2).

El río Salado se extiende a lo largo de dos mil kilómetros. Nace en la provincia de Salta y desemboca en el sistema del río Paraná. La cuenca hidrográfica comprende unos 58 000 km², de los cuales unos 30 000 km² aportan directamente al río Salado.

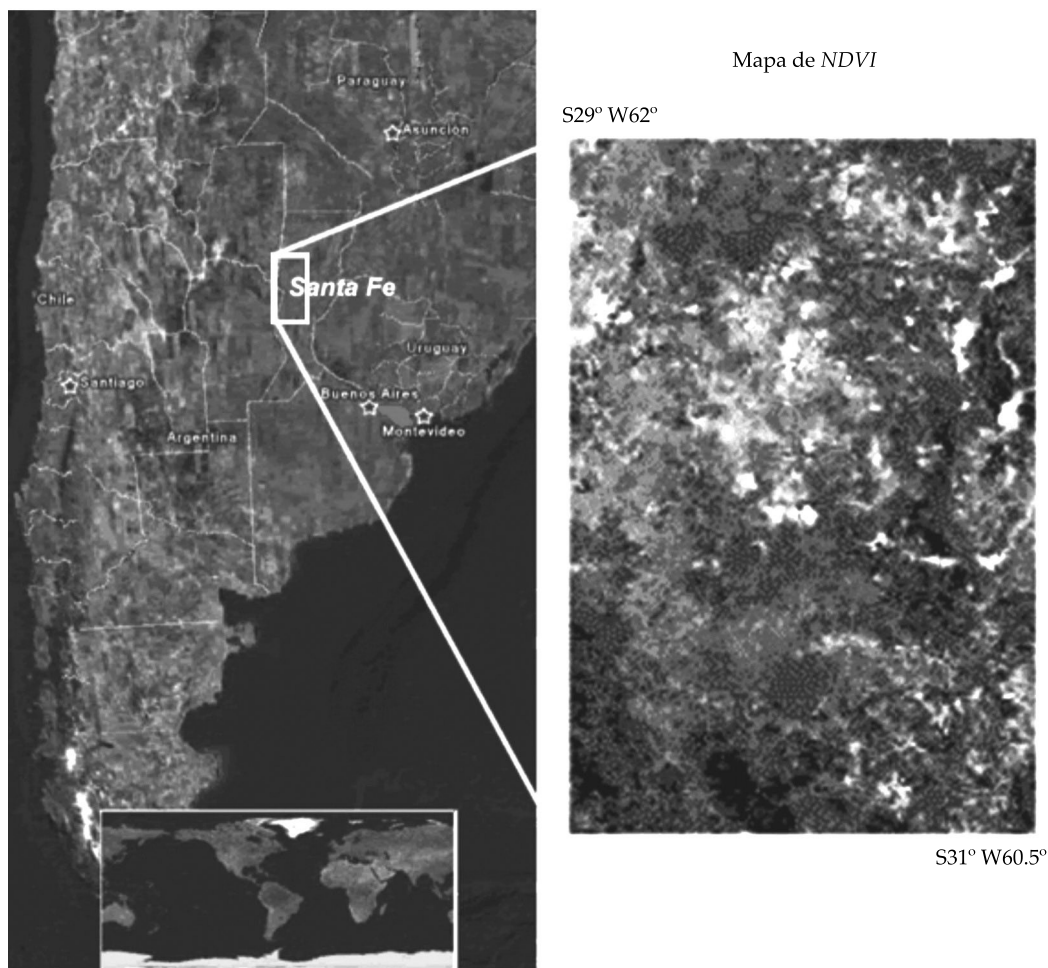


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio, Santa Fe, Argentina.

En los últimos treinta años, la cuenca experimentó cambios hidrológicos, como el aumento del caudal medio del río debido al incremento de precipitaciones (FICH-INA-INTA, 2007). Paralelamente a los cambios de las variables externas al sistema, se han introducido cambios en el uso del suelo, creciendo la superficie cultivada en detrimento de la utilizada para ganadería. La agricultura es intensiva en este área, mas precisamente el cultivo de oleaginosas (soja, girasol y maíz) es el predominante. Paulatinamente, la dinámica hídrica natural también fue modificándose por la construcción de obras de canalización, alcantarillado y puentes. La importancia de esta región radica en el hecho de que la provincia de Santa Fe es una de las principales productoras de soja (<http://www.santafe.gov.ar/>).

Datos utilizados

A fin de disminuir la incertidumbre que generaría el uso de mapas no validados derivados de MP, se simuló las imágenes de T_s a diferentes resoluciones espaciales. Para esto se utilizaron imágenes obtenidas con un sensor térmico. La metodología utilizada para obtener las imágenes de T_s a resolución de 1×1 km ha sido ampliamente validada (Wan y Dozier, 1996). Esto significa que los errores de las imágenes de T_s están acotados y son conocidos, no así los derivados de sensores MP.

El programa EOS (*Earth Observing System*), desarrollado por la NASA, consiste en una serie de satélites que orbitan la Tierra en forma sincronizada. El primer satélite del programa EOS, EOS-Terra, fue puesto en órbita

en diciembre de 1999, con el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) entre los cinco sensores a bordo. EOS-Terra orbita a una altitud de 705 km y recorre la Tierra varias veces al día. La órbita del satélite va de norte a sur y cruza el ecuador por la mañana.

MODIS es uno de los instrumentos a bordo de EOS-Terra. MODIS proporciona información en 36 bandas espectrales en el rango de longitudes de onda de $0.4 - 14.385 \mu\text{m}$ (visible a infrarrojo térmico), con una resolución espacial que varía de los 250 a los 1 000 m, y un ancho de barrido de 2 330 km. En la actualidad se distribuyen 44 productos derivados de las 36 bandas, los que se dividen en las siguientes categorías: Calibración, Atmosféricos, Terrestres, Criósfera y Oceánicos (<http://modis.gsfc.nasa.gov>).

En este trabajo se utilizaron los productos MOD02 y MOD11. El producto MOD02 contiene la radiancia geo-registrada de las 36 bandas. Las imágenes correspondientes a la banda 1 (rojo) y la banda 2 (infrarrojo cercano) fueron utilizadas para obtener el índice de vegetación $NDVI$. El producto MOD11 ofrece la temperatura de superficie georreferenciada y los valores de las emisiones de las bandas térmicas 31 y 32 para píxeles de 1×1 y 5×5 km, respectivamente (Wan y Dozier, 1996). Las imágenes de T_s del producto MOD11 se utilizaron para trazar el espacio $NDVI-T_s$ y para obtener las imágenes del parámetro ϕ (Venturini *et al.*, 2004; Batra *et al.*, 2006).

Se procesaron tres imágenes MOD11 y dos MOD02, correspondientes al mes de septiembre de 2004. La fecha y hora de adquisición

Cuadro 1. Año de adquisición de las imágenes, día del año, producto MODIS, hora de adquisición y calidad de las imágenes.

Año	Día del año	Producto		Hora de adquisición (UTC)	Calidad de la imagen (% nubes)
2004	259	MOD02	MOD11	14:15	0-2
2004	266		MOD11	14:20	0.8
2004	268	MOD02	MOD11	14:10	0-9

de cada una de las imágenes y el porcentaje de nubes observado se presentan en el cuadro 1.

Resultados

Se agregaron los píxeles de las imágenes de MOD11 por promedio aritmético, obteniéndose imágenes con resoluciones espaciales de 2×2 , 4×4 , 8×8 y 10×10 km. Con el fin de analizar los cambios regionales de T_s a medida que se degrada la resolución espacial, se calcularon los valores de T_s mínimos, medios y máximos de las imágenes agregadas. El análisis de los histogramas de frecuencia de las imágenes agregadas evidenciaron que para todas las resoluciones estudiadas, las máximas y mínimas frecuencias, aproximadamente, se registran para los mismos valores de T_s . Estos resultados no se muestran en este trabajo, pero pueden ser consultados en Girolimetto *et al.* (2008).

Si bien la información térmica media regional no cambiaría con la disminución de la resolución espacial, esto no implica que la incertidumbre de las estimaciones hidrológicas derivadas de diferentes imágenes agregadas se mantenga (Venturini *et al.*, 2004; Batra *et al.*, 2006).

La calidad de las imágenes de T_s , analizada en términos de tamaño de píxel, afecta directamente la construcción del espacio triangular $NDVI-T_s$ y, por lo tanto, impacta sobre todas las variables ambientales que se deriven del mismo. Por ejemplo, el parámetro ϕ de Jiang e Islam se obtiene con los espacios $NDVI-T_s$. En la figura 3 se observan las variaciones que se producen en la nube de puntos al aumentar el tamaño del píxel, evidenciándose la pérdida de los valores extremos a medida que disminuye la resolución espacial.

En el caso particular del método de Jiang e Islam, los bordes inferior y superior del triángulo son los elementos clave para la determinación de ϕ . Es por ello que se analizaron por separado las particularidades de cada uno de dichos bordes.

Análisis del borde superior del espacio $NDVI-T_s$

Las características del borde superior de los diferentes espacios triangulares están resumidas en el cuadro 2. Se observan diferencias en las pendientes de los límites superiores de los triángulos $NDVI-T_s$. Dichas diferencias se traducen en variaciones del parámetro $T_{\max}$ del modelo de Jiang e Islam (para $NDVI = 0$) entre los 2 y 4 °K. Se destaca que en la búsqueda bibliográfica no se han encontrado estudios sobre la variabilidad del parámetro $T_{\max}$. Sin embargo, Kustas *et al.* (2003) y Venturini *et al.* (2004) encontraron diferencias similares al analizar la temperatura radiométrica de una banda térmica para diferentes sensores y a resoluciones espaciales de hasta 1×1 km. En general, estos resultados indicarían que imágenes de T_s con píxeles más grandes de 1×1 km no influirían en el diagrama triangular, más específicamente en el valor de $T_{\max}$ correspondiente a $NDVI = 0$.

Análisis del parámetro ϕ , manteniendo el borde inferior $T_{\min}$ constante

Se entiende por $T_{\min}$ constante a la temperatura media de aquellos píxeles con $NDVI < 0$ obtenida para la resolución espacial original, en este caso de 1×1 km. El $T_{\min}$ así determinado se mantiene constante para las demás resoluciones espaciales y representa el borde inferior del triángulo para todos los espacios $NDVI-T_s$ obtenidos.

Las imágenes de ϕ que se muestran en la figura 4 se generaron con la ecuación (2), con $T_{\max}$ expuestas en el cuadro 2 y con $T_{\min}$ constante. Los valores medios y desvíos estándar de ϕ se resumen en el cuadro 3. Como puede observarse, no se identifica un patrón de variación de ϕ a medida que se cambia la resolución espacial de T_s . Las diferencias encontradas en el valor medio regional de ϕ son inferiores a 0.09 (14% del valor medio). Los resultados son compatible con lo observado por Batra *et al.* (2006). Estos autores determinaron

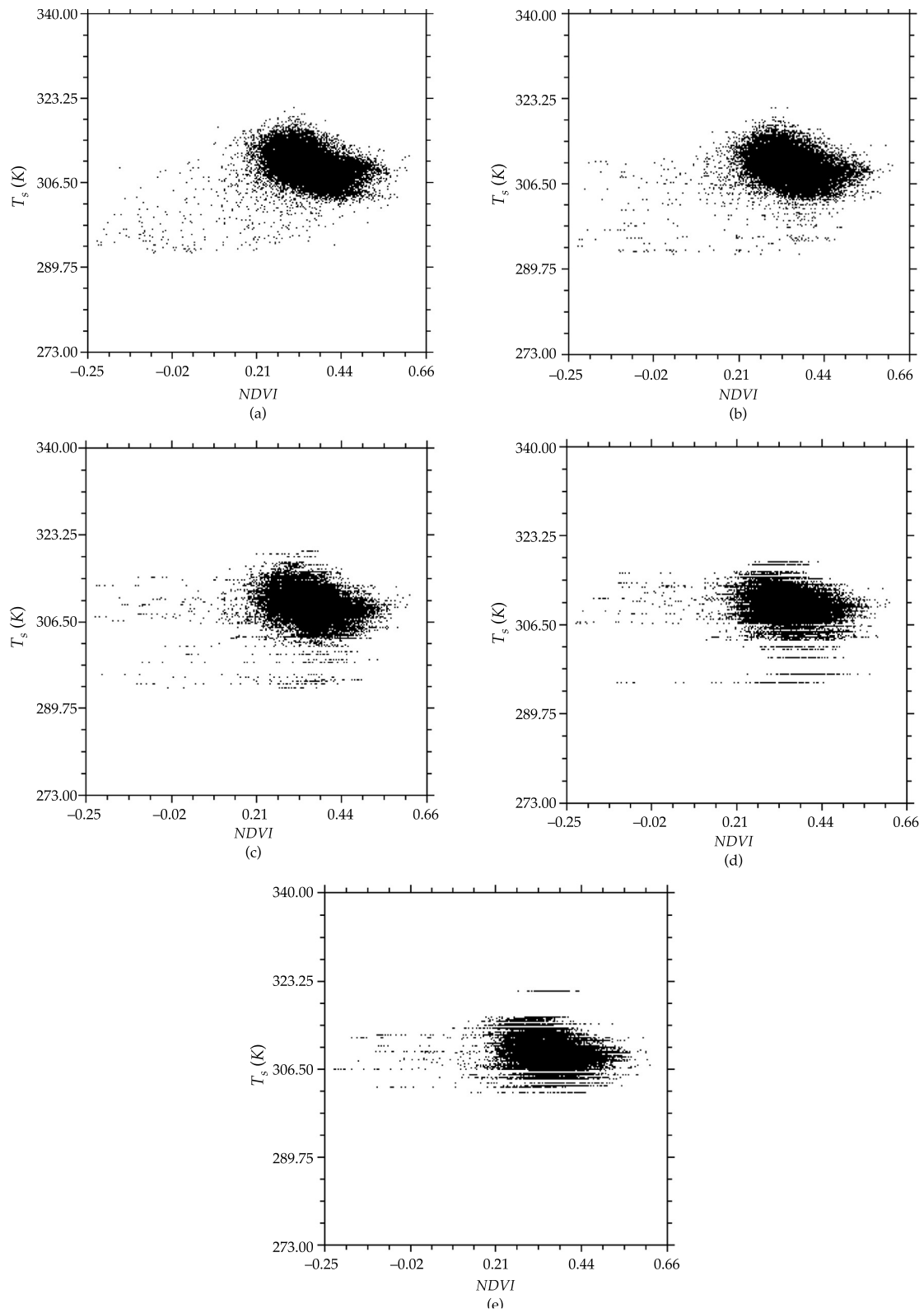


Figura 3. Ejemplo de los diagramas $NDVI-T_s$. Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1 x 1 km, (b) 2 x 2 km, (c) 4 x 4 km, (d) 8 x 8 km, (e) 10 x 10 km.

Cuadro 2. Características de los espacios triangulares para diferentes resoluciones espaciales.

Día 259, año 2004			
Resolución	$NDVI_{m\acute{a}x}$	Pendiente	$T_{m\acute{a}x}$ (K)
1 km	0.68	-0.0518	310.83
2 km	0.68	-0.0667	309.91
4 km	0.68	-0.0603	311.26
8 km	0.68	-0.0751	309.62
10 km	0.68	-0.0608	311.06
Día 266, año 2004			
Resolución	$NDVI_{m\acute{a}x}$	Pendiente	$T_{m\acute{a}x}$ (K)
1 km	0.66	-0.0699	312.16
2 km	0.66	-0.0506	315.00
4 km	0.66	-0.0573	313.88
8 km	0.66	-0.0701	312.37
10 km	0.66	-0.0633	313.05
Día 268, año 2004			
Resolución	$NDVI_{m\acute{a}x}$	Pendiente	$T_{m\acute{a}x}$ (K)
1 km	0.66	-0.0383	324.58
2 km	0.66	-0.0329	327.50
4 km	0.66	-0.0364	325.29
8 km	0.66	-0.0489	322.37
10 km	0.66	-0.0470	321.85

el valor de ϕ para diferentes sensores con resolución espacial 1 x 1 km, obteniendo diferencias de alrededor del 10% en el valor medio regional de ϕ . Venturini *et al.* (2004) encontraron diferencias en el valor medio de ϕ de aproximadamente un 15% para diferentes sensores, siempre con una resolución 1 x 1 km.

El desvío estándar (S) de ϕ es inferior al 20% de la media, lo que estaría indicando una baja dispersión de ϕ en torno al valor medio. En otras palabras, la región presenta valores de FE relativamente homogéneos.

Los resultados estarían demostrando que el método desarrollado por Jiang e Islam daría resultados aceptables en términos de ϕ para el área en estudio, con imágenes cuyos píxeles varían de 1 x 1 km a 10 x 10 km, siempre que $T_{m\acute{a}x}$ se calcule con la imagen de mejor resolución espacial.

Análisis del parámetro ϕ con el borde inferior $T_{m\acute{a}x}$ variable

Se entiende por $T_{m\acute{a}x}$ variable a la temperatura media de aquellos píxeles con $NDVI < 0$, obtenida para cada una de las imágenes agregadas, la que representa el borde inferior del triángulo $NDVI-T_s$. Cabe destacar que el problema de píxeles mixtos (píxeles donde podrían coexistir diferentes tipos y usos de suelos y agua libre) es mayor a medida que el tamaño del píxel es más grande. Esto implicaría que difícilmente se encuentren píxeles puros, con agua en superficie.

En este análisis se trazaron los triángulos con los bordes cálidos analizados en el apartado "Análisis del borde superior del espacio $NDVI-T_s$ "; pero en este caso, $T_{m\acute{a}x}$ se calculó para cada imagen agregada. Se observó que los triángulos se abaten a medida que la resolución espacial disminuye. Esto fue consistente en todos los días analizados. El cálculo de ϕ se realizó nuevamente con la ecuación (2), con los valores de $T_{m\acute{a}x}$ del cuadro 2, pero ahora con $T_{m\acute{a}x}$ estimadas para cada resolución espacial. La figura 4 muestra las imágenes de ϕ generadas a partir de estos triángulos (ver espacios $NDVI-T_s$ en la figura 3).

En el cuadro 4 se muestran los valores medios y desvíos estándar de las imágenes

Cuadro 3. Comparación de las medias y desvíos estándar (S) de los valores de ϕ para diferentes resoluciones para $T_{m\acute{a}x}$ constante.

Día	1 x 1 km		2 x 2 km		4 x 4 km		8 x 8 km		10 x 10 km	
	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S
259/04	0.62	0.061	0.58	0.069	0.61	0.063	0.56	0.075	0.60	0.068
266/04	0.49	0.092	0.56	0.079	0.53	0.084	0.49	0.098	0.51	0.099
268/04	0.63	0.083	0.67	0.074	0.64	0.083	0.58	0.096	0.58	0.089

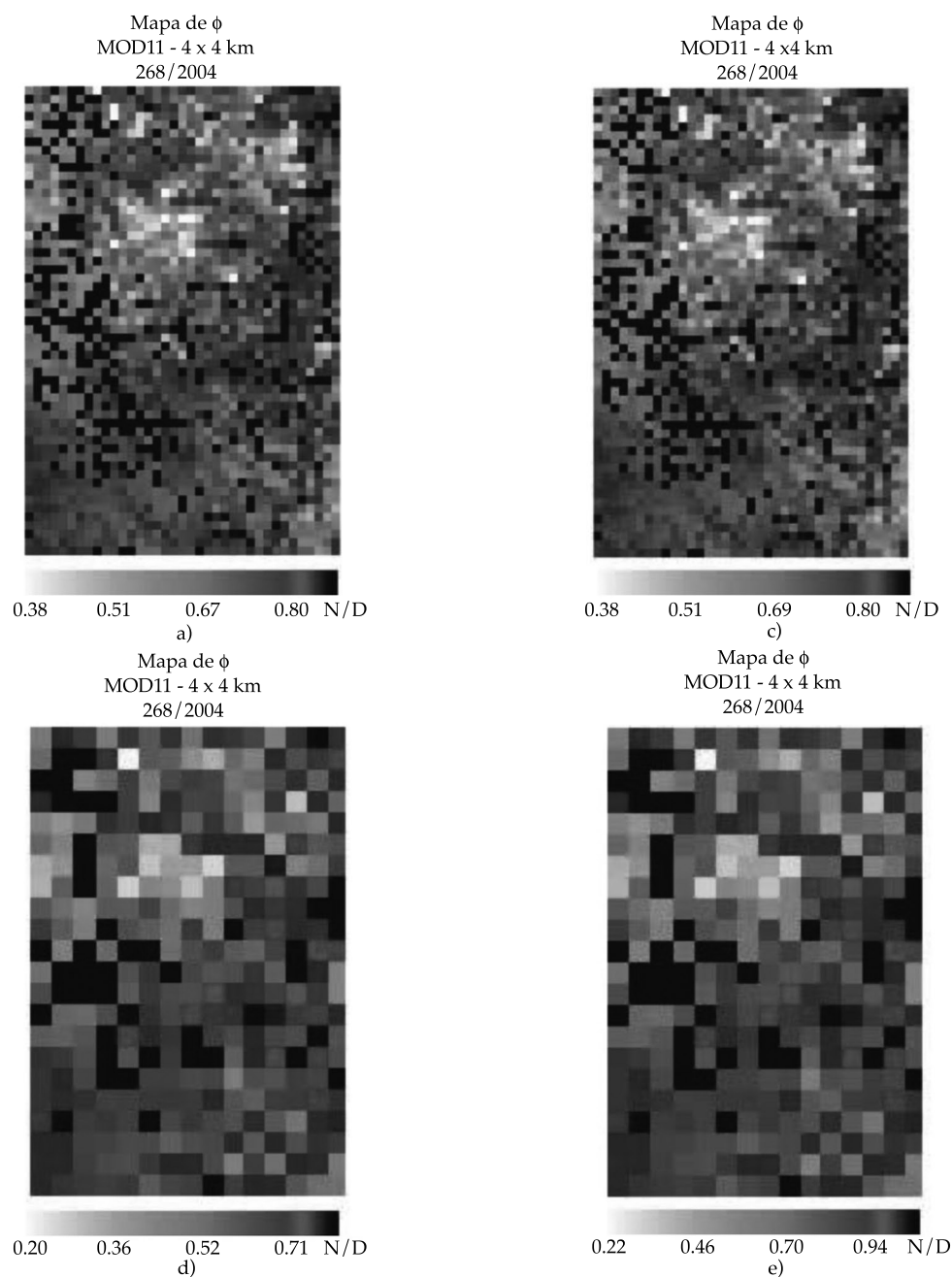


Figura 4. Imágenes de ϕ – Día 268/2004 para resolución 4×4 km (a) y 10×10 km, (b) con $T_{\min}$ constante y 4×4 km, (c) 10×10 km (d), para $T_{\min}$ variable. Nótese la diferencia en las escalas numéricas.

Cuadro 4. Comparación de las medias y desvíos estándar (S) de los valores de ϕ para diferentes resoluciones para $T_{\min}$ variable.

Día	1 x 1 km		2 x 2 km		4 x 4 km		8 x 8 km		10 x 10 km	
	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S
259/04	0.62	0.061	0.59	0.071	0.67	0.069	0.65	0.087	0.67	0.075
266/04	0.49	0.092	0.62	0.087	0.63	0.099	0.78	0.136	0.76	0.130
268/04	0.63	0.083	0.72	0.081	0.89	0.106	0.97	0.129	0.96	0.139

de ϕ para los diferentes días y resoluciones espaciales analizadas. En general, el valor medio de ϕ para cada uno de los días se incrementa a medida que aumenta el tamaño del píxel de T_s , debido a que se va perdiendo la definición de los valores extremos de T_s . Se observa que las diferencias en el valor medio estimado de ϕ oscilan entre 0.03 y 0.34 (de 5 a 54% del valor medio), evidenciándose las mayores a partir de tamaños de píxeles superiores a los 4 x 4 km.

Los resultados obtenidos indicarían que el método desarrollado por Jiang e Islam arrojaría resultados de ϕ aceptables con imágenes, cuya resoluciones espaciales varíen entre 1 x 1 y 4 x 4 km. Para resoluciones espaciales superiores a los 4 x 4 km, los resultados del método diferirían de los obtenidos con las imágenes a resolución original, por lo que se debe tener precaución al analizar los resultados en estos casos (Venturini *et al.*, 2004; Batra *et al.*, 2006; Girolimetto *et al.*, 2007).

Conclusiones

En la actualidad, los sensores remotos ofrecen información en un amplio rango del espectro electromagnético que permite estudiar propiedades de la superficie y ecosistemas en general. La información proveniente de las diversas misiones satelitales ha sido utilizada por la comunidad científica para el desarrollo de diferentes metodologías, como las publicadas por Norman *et al.* (1995), Jiang e Islam (2001), Nishida *et al.* (2003), Rivas y Caselles (2004), y Venturini *et al.* (2008), entre otros. La interpretación física del espacio NDVI- T_s ha sido objeto de diversos estudios. La mayoría de ellos coinciden en que el espacio trapezoidal resume el balance energético de la región bajo estudio, siendo la T_s la variable más dinámica y por ende la más limitante. En particular, se analizó la metodología propuesta por Jiang e Islam (2001), que permite la estimación directa de FE espacialmente distribuida, basándose en una interpretación contextual del espacio NDVI- T_s . Es por ello que en este

trabajo se puso énfasis en analizar el efecto de la resolución espacial de las imágenes de T_s y como éstas influyen en el espacio NDVI- T_s . También se evaluaron estos efectos en el cálculo del parámetro ϕ (Jiang e Islam, 2001), y por ende sobre FE, ya que esta última es directamente proporcional a ϕ .

El análisis estadístico de las imágenes de T_s agregadas indicaría que la información térmica regional no cambia significativamente con la disminución de la resolución espacial, por lo que una imagen de T_s a resolución espacial de 10 x 10 km puede representar la variación de temperatura de la zona en estudio. Sin embargo, la incertidumbre en las estimaciones hidrológicas derivadas debe analizarse cuidadosamente.

Se estudiaron las características del diagrama triangular, más específicamente del parámetro $T_{\max}$ de Jiang e Islam, y el borde inferior (representado por $T_{\min}$). Las diferencias encontradas en el parámetro $T_{\max}$ son compatibles con los errores comunes en el cálculo de T_s (Kustas *et al.*, 2003; Venturini *et al.*, 2004). Las variaciones de T_s encontradas en este trabajo son comparables con las localizadas cuando se cambia de sensor, pero se mantiene la resolución de 1 km² o se trabaja con mejores resoluciones espaciales. Estos resultados indicarían que imágenes de T_s con píxeles más grandes de 1 x 1 km no influirían en el borde superior del triángulo.

Se destaca que durante los días 259/04 y 266/04 se observan bordes fríos lineales no horizontales; sin embargo, los mismos se tomaron horizontales, tal como lo proponen los autores del método. Si bien se puede adoptar el borde frío como no horizontal, sin modificar los supuestos propuesto por Jiang e Islam, la determinación de la pendiente de la recta requeriría de más supuestos sobre dónde se asigna el valor de $\phi_{\max}$. Así, no se modificó el criterio de determinación del borde frío, a fin de no introducir incertidumbre al análisis, a pesar de lo observado. En dichos días se observaron las mayores deformaciones de los triángulos obtenidos y por consiguiente las

mayores diferencias en las imágenes de ϕ para las distintas resoluciones analizadas.

Se obtuvieron los valores del parámetro ϕ con dos procedimientos diferentes. El primero, denominado $T_{\min}$ constante, que utiliza solamente el valor $T_{\min}$ calculado a partir de la imagen original con resolución 1×1 km. El segundo procedimiento consistió en repetir el cálculo de $T_{\min}$ para de cada una de las imágenes agregadas.

Al calcular ϕ con $T_{\min}$ constante, las diferencias encontradas en el valor medio regional son inferiores al 14% del valor medio de ϕ . El método arrojaría resultados aceptables en términos de ϕ para el área en estudio y todas las resoluciones espaciales de las imágenes de T_s analizadas. Esto significa que el método da buenos resultados en la medida en que se rellenen datos faltantes con imágenes provenientes de MP, pero que los píxeles que determinan el $T_{\min}$ conserven la resolución de los sensores infrarrojos térmicos.

Al estimar ϕ con $T_{\min}$ variable, las diferencias encontradas en el valor medio de ϕ llegan al 55% del valor medio de ϕ , observándose las menores diferencias para imágenes con píxeles de 1×1 y 2×2 km. Esto sugiere que el método arrojaría valores de ϕ similares con imágenes cuya resolución espacial varíe entre 1×1 y 4×4 km. Para resoluciones espaciales superiores, los resultados del método podrían diferir sensiblemente de los obtenidos con las imágenes a resolución original.

En general se observa que el método es sensible al parámetro $T_{\min}$. En el caso de que dicho parámetro sea obtenido con imágenes de baja resolución espacial, por ejemplo con píxeles de 4×4 km, se observan diferencias importantes en relación con las imágenes de 1×1 km.

En general, el modelo desarrollado por Jiang e Islam sería aplicable con imágenes de baja resolución espacial siempre que se adopte el borde inferior del triángulo igual a la temperatura media del agua para una resolución de 1×1 km, independientemente de la resolución espacial de las imágenes de T_s con

las que se obtengan los espacios triangulares. Si no es posible calcular $T_{\min}$ con imágenes de T_s con buena resolución espacial (por ejemplo, 1×1 km), por no estar disponibles o porque la cobertura de nubes lo impide, las imágenes de T_s derivadas de microondas pasivos solucionarían el problema parcialmente, teniendo en cuenta que los resultados de FE podrían tener diferencias de hasta el 50%.

Recibido: 31/03/09

Aprobado: 05/10/10

Referencias

- BATRA, N., ISLAM, S., VENTURINI, V., BISHTI, G., and JIANG, L. Estimation and Comparison of Evapotranspiration from Multiple Satellites for Clear Sky Days. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 103, 2006, pp. 1-15.
- COLL, C., CASELLES, V., GALVE, J.M., VALOR, E., NICLÒS, R., SÁNCHEZ, J.M., and RIVAS, R. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 97, 2005, pp. 288-300.
- FICH-INA-INTA. Influencia de los cambios físicos y climáticos en el régimen de escurrimiento del Río Salado-tramo inferior. *Informe final elevado al Ministerio de Asuntos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Santa Fe, Argentina*. Santa Fe, Argentina: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas-Instituto Nacional del Agua-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2007.
- FRENCH, A.N., JACOB, F., ANDERSON, M.C., KUSTAS, W.P., TIMMERMANS, W., GIESKEE, A., SU, Z., SU, H., MCCABE, M.F., LI, F., PRUEGER, J., and BRUNSELL, M.F. Surface energy fluxes with the Advanced Space borne Thermal. Emission and Reflection Radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). *Remote Sensing of Environment*. Vol. 99, 2005, pp. 55-65.
- GIROLIMETTO, D., VENTURINI, V. y RODRÍGUEZ, L. Influencia de la resolución espacial de la temperatura de superficie teledetectada en el contexto NDVI- T_s . *TELEDETECCIÓN – Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Mar del Plata, Buenos Aires: Editorial Martín, 2007.
- GIROLIMETTO, D., VENTURINI, V. y RODRÍGUEZ, L. Influencia de la resolución espacial de la temperatura de superficie teledetectada en el contexto NDVI- T_s [en línea]. Santa Fe, Argentina: Biblioteca Virtual de la Universidad Nacional del Litoral, 2008. Disponible en World Wide Web: <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8180/tesis/handle/1/210>.

- HUETE, A., JUSTICE, C., and LEEUMEN, W. MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document. Version 3, 1999, <http://modis.gsfc.nasa.gov>.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRÍGUEZ, E., GAO, X., and FERREIRA, L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 83, 2002, pp. 195-213.
- JACKSON, R.D., REGINATO, R.J., and IDSO, S.B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*. Vol. 13, 1977, pp. 651-656.
- JIANG, L. and ISLAM, S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*. Vol. 26, No. 17, 1999, pp. 2773-2776.
- JIANG, L. and ISLAM, S. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*. Vol. 37, 2001, pp. 329-340.
- JIANG, L., ISLAM, S., and CARLSON, T.N. Uncertainties in latent heat flux measurement and estimation: Implications for using a simplified approach with remote sensing data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 30, 2004, pp. 769-787.
- KUSTAS, W.P., NORMAN, J.M., ANDERSON, M.C., and FRENCH, A.N. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 85, 2003, pp. 429-440.
- NISHIDA, K., NEMANI, R.R., RUNNING, S.W., and GLASSY, J.M. An operational remote sensing algorithm of land evaporation. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, D9, 2003, 4270 pp.
- NORMAN, J.M., KUSTAS, W.P., and HUMES, K.S. Sources approach for Estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural Forest and Meteorology*. Vol. 77, 1995, pp. 263-293.
- NORMAN, J.M., ANDERSON, M.C., KUSTAS, W.P., FRENCH, A.N., MECIKALSKI, J., TORN, R., DIAK, G.R., SCHMUGGE, T.I., and TANNER, B.C.W. Remote sensing of surface energy fluxes at 10¹-m pixel resolution. *Water Resources Research*. Vol. 39, 2003, pp. 1221-1232.
- PRIESTLEY, C.H.B. and TAYLOR, R.J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*. Vol. 100, 1972, pp. 81-92.
- RIVAS, R. and CASELLES, V. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 83, 2004, pp. 68-76.
- STISEN, S., SANDHOLT, I., NORGAARD, A., FENSCHOLT, R., and HOGH JENSEN, K. Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration—Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 112, 2008, pp. 1242-1255.
- VENTURINI, V., BISHT, G., ISLAM, S., and JIANG, L. Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 93, 2004, pp. 77-86.
- VENTURINI, V., ISLAM, S., and RODRÍGUEZ, L. Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 112, 2008, pp. 132-141.
- WAN, Z. and DOZIER, J. A Generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 43, 1996, pp. 892-905.
- WAN, Z., ZHANG, Y., ZHANG, Y.Q., and LI, Z. Validation of the land surface temperature products retrieved from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 83, 2002, pp. 163-180.
- WAN, Z., ZHANG, Y., ZHANG, Y.Q., and LI, Z. Quality assessment and validation of the global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 25, 2004, pp. 261-274.
- WAN, Z. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 112, 2008, pp. 59-74.

Abstract

GIROLIMETTO, D., VENTURINI, V. & RODRÍGUEZ, L. *The effect of the spatial resolution of NDVI- T_s spaces on the evaporative fraction calculation. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 21-33.*

This paper analyzes the effect of the spatial resolution of the images used to generate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)-surface temperature (T_s) space. This is widely used to monitor environmental variables such as evapotranspiration (ET) and evaporative fraction (FE). The method proposed by Jiang and Islam (2001) was selected to study the effect of the spatial resolution on the calculation of the FE. For this, spatial resolutions were analyzed ranging from 1 x 1 km (common for thermal sensor images) to 10 x 10 km (consistent with images from passive microwave sensors (MP)). The results suggest that the NDVI- T_s triangular space allows for obtaining reasonably accurate FE values with low spatial resolution, such as that of MP, provided that the cold edge can be determined using images with 1 x 1 km spatial resolution. If it is not possible to calculate the cold edge with images of 1 x 1 km resolution, the results would be uncertain and, therefore, should be carefully analyzed.

Keywords: surface temperature, MODIS, evapotranspiration, NDVI.

Dirección institucional de los autores

MSc. Daniela Girolimetto
Dra. Virginia Venturini
Dra. Leticia Rodríguez

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
C.C. 217, 3000 Santa Fe, ARGENTINA
dgirolimetto@fich.unl.edu.ar
vventurini@fich.unl.edu.ar
leticia@fich1.unl.edu.ar