

Validación a escala de cuenca del método del triángulo para estimar la humedad superficial del suelo

Erik Zimmermann¹ y Eugenia Chiarito²

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (UNR), CONICET, Ciudad Universitaria. Riobamba 245 bis. (2000) Rosario, Argentina

² Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (UNR), Ciudad Universitaria. Riobamba 245 bis. (2000) Rosario, Argentina

Mail de contacto: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta la validación a escala de cuenca de un procedimiento, basado en técnicas de teledetección, que permite estimar el contenido de humedad superficial del suelo, conocido como "Método del Triángulo". El procedimiento consiste en ubicar la posición relativa de un píxel de una imagen satelital en una gráfica de temperatura de brillo de la superficie vs. Índice NDVI. En trabajos previos, la metodología fue contrastada con humedades puntuales de superficie (método gravimétrico) de una parcela experimental, obteniendo resultados aceptables.

La aplicación que se pretende dar en el futuro se relaciona con escalas de cuenca. Consecuentemente, el método fue validado comparando láminas de escurrimiento estimadas y observadas en la cuenca del A° Ludueña (Santa Fe, Argentina). Las estimadas se obtuvieron indirectamente aplicando la ecuación de Green y Ampt a precipitaciones históricas, contando con mapas de suelo y la imagen LANDSAT 5 TM correspondiente, para obtener condiciones antecedentes. Las observadas se obtuvieron mediante aforos en la sección de control. Los resultados son aceptables. Comparando la metodología propuesta con metodologías alternativas, tales como el índice de precipitación antecedente, se deduce que el patrón de distribución espacial de humedad superficial es mucho más detallado, además de mejorar las estimaciones de las láminas de escurrimiento.

Palabras clave: humedad superficial del suelo, teledetección, método del triángulo, escala de cuenca.

ABSTRACT

Validation at basin scale for a procedure based on remote sensing techniques for soil moisture estimation, known as "Triangle Method" is presented. The procedure locates a pixel's relative position inside a graph determined by temperature brightness vs. NDVI values. Acceptable results were obtained in previous works for contrast between this method and in-situ punctual determinations for soil moisture.

It is intended to extend the method to basin scale in the future. Therefore, estimated runoff was compared to measured values for the Ludueña stream (Santa Fe, Argentina) for its validation. The Green and Ampt equations for historical precipitation were used for estimated values, based on soil maps and its corresponding LANDSAT 5 TM image, to determine previous conditions. Observed values of discharge were collected at a control section. The results were acceptable.

By comparing the proposed procedure with some alternatives such as antecedent precipitation index, the spatial distribution pattern is proved to be more detailed, and improves the runoff estimations.

KEY WORDS: soil moisture, remote sensing, triangle method, basin scale

1 INTRODUCCIÓN

El creciente nivel de detalle y precisión que presentan los nuevos modelos hidrológicos, se traduce en una representación más fiel y realista de los fenómenos físicos que se analizan, a partir de la posibilidad de trabajar con una subdivisión de las regiones en estudio en unidades cada vez más pequeñas, pero al costo de demandar un volumen de datos más significativo y de actualización más frecuente. Esta situación obliga a descartar la recopilación manual de datos para escalas de trabajo extendidas territorialmente, situación de gran frecuencia para zonas de escasa pendiente, como es el caso de la llanura pampeana, en Argentina. En este marco, actualmente, se observa una tendencia cada vez más marcada hacia la opción por sistemas remotos, que coincide con su progresiva accesibilidad y aumento de precisión.

Paralelamente, es destacable la importancia que reviste la humedad del suelo, como variable de estado de un sistema hidrológico, ya que, entre otras cosas, condiciona los flujos de intercambio entre superficie y subsuelo, escurrimientos y recargas subterráneas. Asimismo, regula el intercambio de agua y energía entre la superficie y la atmósfera a través de los procesos de evapotranspiración.

En trabajos anteriores al presente, se ha aplicado el denominado “método del triángulo”, que permite estimar la humedad superficial utilizando reflectancias de imágenes satelitales (bandas roja e infrarrojas cercana y térmica), el cual es descrito sucintamente en el apartado siguiente. El método fue testeado con mediciones realizadas en una parcela experimental, cercana a la ciudad de Rosario. Los resultados alcanzados hasta el presente son aceptables y promisorios.

La aplicación futura que se le pretende dar a la estimación de la humedad, está asociada con escalas de trabajo mayores a las usadas para testear el método. Consecuentemente, es necesario, validar la metodología a escala de cuenca, y es el trabajo que aquí se presenta. Para este objetivo, la validación se hará en forma indirecta, comparando láminas de escurrimiento estimadas y observadas en la cuenca piloto adoptada (cuenca del A° Ludueña).

2 MATERIALES Y METODOS

La cuenca del arroyo Ludueña se encuentra situada Sur de la provincia de Santa Fe, entre los paralelos 32°45' S y 33°08' S y los meridianos 61°04' O y 60°39' O (Fig. 1). Linda al sur con la cuenca del A° Saladillo, al norte y al oeste con la del A° San Lorenzo y engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario, desembocando en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 740 km², una pendiente media de 1,4 por mil y su cabecera se ubica en la cota 70 IGM.

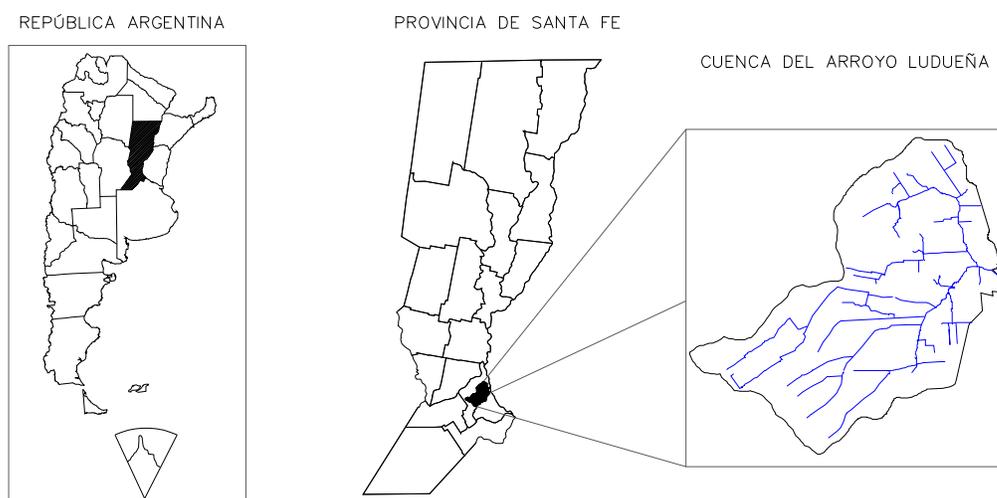


Figura 1. Ubicación geográfica cuenca del Arroyo Ludueña.

La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. El arroyo fue canalizado hasta 10 km aguas arriba de su desembocadura, finalizando esta obra en el año 1964. Al ingresar en la ciudad de Rosario es entubado hasta 500 m aguas arriba de su descarga en el río Paraná. El sector norte de la cuenca es drenado mediante dos canales artificiales, Funes-Salvat e Ibarlucea-Nuevo Alberdi, construidos en 1948.

La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La red de cursos y canales primaria tiene una extensión de aproximadamente 140 Km, en tanto que con el agregado de cunetas y canales secundarios esta longitud de vías de drenaje alcanza los 360 Km. La densidad de drenaje considerando solamente los cursos naturales es de 0,19 Km/Km², en tanto que al cabo de la alteración antrópica alcanzada a la fecha, la densidad de drenaje asciende a 0,49 Km/Km², lo que conforma un importante indicador del grado de transformación que ha sufrido la cuenca.

2.1 Caracterización física de los suelos de la cuenca de estudio

Se partió de la información elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1972), que caracteriza los perfiles de suelos presentes en el área de estudio. En trabajos previos, fueron realizadas las siguientes tareas: (a) digitalización y georeferenciación de las cartas de suelo; (b) discretización acorde a la grilla de trabajo empleando sistemas de información geográfica (SIG); (c) asignación de propiedades hidráulicas de suelos para las asociaciones mediante funciones de pedotransferencia ya probadas en la región de estudio (Zimmermann y Basile 2007). Para el último punto, se extractó de las cartas de suelos disponibles la información de las series de suelos presentes en la cuenca. En cada perfil de las series, en función de su profundidad y su estratigrafía, se detallan entre 3 y 8 horizontes de los cuales se ha publicado la composición textural, junto a otros parámetros bio-físicos tales como contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, etc. Se estimaron parámetros por serie de suelos utilizando la información de cada horizonte. Se incorporaron funciones de pedotransferencia para calcular, en cada uno de los estratos de las series: densidades secas, punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC), conductividad hidráulica saturada (Ks), presión capilar y conectividad de poros para la curva de retención (modelo de Brooks-Corey) y humedades volumétricas residuales y de saturación (Zimmermann y Basile 2008). Se propuso una metodología de ponderación para obtener parámetros por serie de suelos, partiendo de los parámetros calculados para cada horizonte. Los criterios fueron los siguientes: (a) para la conductividad hidráulica vertical se calculó la media armónica de las conductividades de cada estrato y (b) para el resto de los parámetros el promedio ponderado por el espesor de cada estrato.

Por lo general, las series de suelos no se encuentran “puras” en toda la extensión del territorio en estudio, por el contrario, en estado natural las mismas se encuentran combinadas entre sí tomando el nombre de asociaciones, consociaciones y complejos según el grado de combinación. Es por esto, que para poder caracterizar los distintos grupos, se hizo necesario adoptar una metodología de ponderación según el porcentaje de ocupación areal de cada serie dentro de cada grupo. El mapa de asociaciones presentes en la cuenca se muestra en la Fig. 3(a).

Este trabajo previo, permitió generar una base de datos con propiedades hidráulicas de 204 asociaciones del sur santafesino, parte de las cuales han sido utilizadas en el presente trabajo (Zimmermann et al 2008).

2.2 Contexto de modelación utilizado para las validaciones

Conocidas las propiedades hidráulicas del suelo y asumidas las características de coberturas vegetales (en época estival aproximadamente el 85-90 % del suelo rural de la cuenca es ocupado por la producción de soja, en época primaveral se estima un 15-20% cubierto por trigo de acuerdo a censos agropecuarios locales e información suministrada por personal de Facultad de Ciencias Agrarias, UNR), queda por seleccionar las metodologías para estimar escurrimientos netos y compararlos con valores observados en el prototipo.

En trabajos preliminares, se desarrolló el modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-2D denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). Este sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas y permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la determinación necesaria de lluvia neta en cada celda es posible el uso de las metodologías de Green y Ampt, o del Servicio de Conservación del Suelo de Estados Unidos. El escurrimiento resultante puede ser propagado en un dominio espacial 2D mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación.

El modelo fue previamente constituido en la cuenca del arroyo Ludueña. La implementación del modelo matemático comprendió: a) la generación del modelo digital del terreno; b) la constitución de la red hídrica; c) la incorporación del trazado vial y ferroviario; d) la incorporación de estructuras hidráulicas como alcantarillas, puentes y un vertedero (Riccardi et al. 2010, Stenta et al. 2010). El modelo quedó constituido con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 250 m de lado, lo que involucró 11.855 celdas y 23.345 vinculaciones entre celdas.

2.3 Condiciones antecedentes de humedad estimadas con el VMMHH 1.0

La asignación de condiciones de humedad antecedente se realizó a partir de la aplicación de una formulación del índice de precipitación antecedente (IPA) desarrollado en forma específica para esta cuenca (Zimmermann et al., 2009). Este índice fue actualizado diariamente y se discretizó espacialmente del mismo modo que el campo de precipitaciones, contando en ese momento con 4 pluviógrafos, es decir, la cuenca fue subdividida en 4 polígonos. El índice IPA presenta la expresión que se expone a continuación:

$$IPA(n) = P(n) + IPA(n - 1) * k(n) \quad (1)$$

donde IPA(n) es el índice de precipitación antecedente correspondiente al día n del año, P(n) es la precipitación del día n, k(n) el coeficiente de decaimiento correspondiente al día n, dado por la siguiente ecuación:

$$k(n) = k_{ver} + (k_{inv} - k_{ver}) \text{seno}^2\left(\frac{\pi}{365} n\right) \quad (2)$$

donde k_{ver} y k_{inv} son los coeficientes de decaimiento extremos correspondientes a las estaciones de verano e invierno, respectivamente que se estiman en función de las tasas de evapotranspiración estacionales. El valor del IPA fue considerado como parámetro representativo de un estado de humedad antecedente de la cuenca expresado en forma continua en el tiempo. El coeficiente de decaimiento, variable durante el año, reprodujo estimativamente las extracciones por evapotranspiración variables estacionalmente debido a la variabilidad de las condiciones de insolación y estado de humedad ambiente.

Dado que en definitiva el IPA tuvo que dar información asociada con parámetros utilizados para la estimación de pérdidas del flujo, se propuso la siguiente manera de vincularlo; a través de la estimación del grado de saturación del perfil para aplicar el método de Green y Ampt. La propuesta surge directamente de considerar la siguiente relación (Zimmermann et al., 2009):

$$S_e = \frac{IPA_n - R_{PMP}}{R_{SAT} - R_{PMP}} \quad (3)$$

donde S_e es el grado de saturación efectiva, R_{PMP} y R_{SAT} son las láminas equivalentes al punto marchitez permanente y saturación, respectivamente.

La lluvia neta fue determinada a partir del algoritmo de Green y Ampt, y mediante la proposición de una pérdida inicial por interceptación en follaje y almacenamiento en

microdepresiones superficiales. Como es sabido, el método de Green y Ampt presenta como parámetros la conductividad hidráulica vertical del suelo y el potencial de succión del frente húmedo, los cuales fueron estimados a partir de los parámetros hidráulicos del suelo como se hizo referencia en el apartado 2.1. La condición inicial de humedad, que también es un dato a suministrar en el método se obtuvo a partir de la estimación de la saturación efectiva S_e .

2.4 El método del triángulo

El “Método del Triángulo”, explorado en sus inicios por Carlson et al. (1981), funda su nombre en la geometría que adopta la nube de puntos que constituyen las mediciones si se grafica en un sistema de coordenadas ortogonales temperatura de la superficie del suelo vs. Índice Normalizado Estado de Cobertura Vegetal (NDVI, EVI, Fr, etc.). Si se representa un número de píxeles (libres de cobertura por nubes) lo suficientemente grande, la forma de la envolvente del conjunto se asemeja a un triángulo (Fig. 2); siendo así la misma distribución la que fija las condiciones de borde para el modelo y evitando la necesidad de información auxiliar atmosférica y de la superficie (Carlson, 2007).

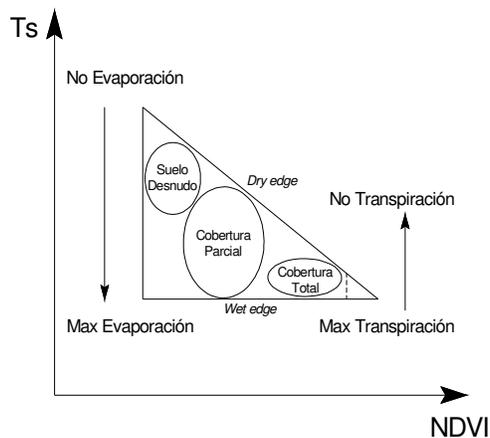


Figura 2.- Esquema NDVI/Ts. Fuente: Yang et al., 2008.

El borde cálido o seco “dry edge” se asume así como la representación de la la isólinea de cero contenido de humedad extraíble, y el borde frío o húmedo “wet edge”, la respectiva isólinea de humedad correspondiente a capacidad de campo. Se proponen, a grandes rasgos, dos alternativas para la determinación del contenido de humedad del suelo: a partir de considerar una relación lineal planteada entre ambos bordes el triángulo (Yang, et al, 2008), o bien a partir de relaciones polinómicas de grados superiores.

Ambas propuestas fueron testeadas en una parcela experimental, ubicada en una zona hortícola aledaña a la ciudad de Rosario, con el fin de analizar el desempeño de cada método comparándolos con datos de campo (Chiarito y Zimmermann, 2013). La plataforma satelital utilizada fue LANDSAT5, y durante los días de revisita se relevaron muestras de suelo in situ, de las que se extrajeron valores de humedad superficial por método gravimétrico en laboratorio. Se trató de 6 campañas de recolección de muestras (período 2010-2011), que totalizaron un centenar de muestras para la verificación.

Los resultados alcanzados hasta el presente son aceptables y promisorios. El aporte del método es muy valioso, dada su simple aplicación y la posibilidad de contar con datos frecuentes y de libre disponibilidad.

El método lineal presentó correlaciones mayores que el polinómico. Una de las razones podría deberse a que las ecuaciones de este último método surgen de aplicar el modelo SVAT, del cual debería analizarse su compatibilidad a las condiciones de la región de aplicación.

2.5 Propuesta de validación

Se consideró conveniente proponer una metodología alternativa a la presentada (IPA) para la estimación de las condiciones antecedentes de humedad, en el contexto del modelo matemático VMMHH 1.0, basada en el tratamiento de imágenes satelitales utilizando el método del triángulo. Las imágenes satelitales deben ser contemporáneas a las tormentas para las cuales hay registros de niveles y puede reconstruirse hidrogramas de crecidas y consecuentes volúmenes de escurrimiento neto.

La cuenca del arroyo Ludueña contó con una red de nueve sensores de niveles y seis sensores de lluvias. Durante el periodo de operación 2008-2010, la red no funcionó en cada evento en su totalidad, por lo que la información disponible en todos los eventos lluviosos es parcial. También existe una red de apoyo basada en observaciones pluviométricas realizadas por personal de los municipios. En la Fig. 3(b) se indican los sitios de los sensores de lluvia y niveles, al igual que un grupo de sitios críticos.

Se analizaron las tormentas monitoreadas durante el período de operación de la red de sensores y la superposición cronológica con imágenes disponibles de LANDSAT llegando a obtener tres imágenes sincronizadas, de acuerdo como se muestra en Tabla 1.

Tabla 1. Coincidencia temporal entre tormentas y pasajes de satélites

Fecha de la tormenta	Fecha de la Imagen	Desfasaje temporal
29/11/2008	14/11/2008	15 días
20/02/2009	18/02/2009	2 días
03/02/2010	20/01/2010	14 días

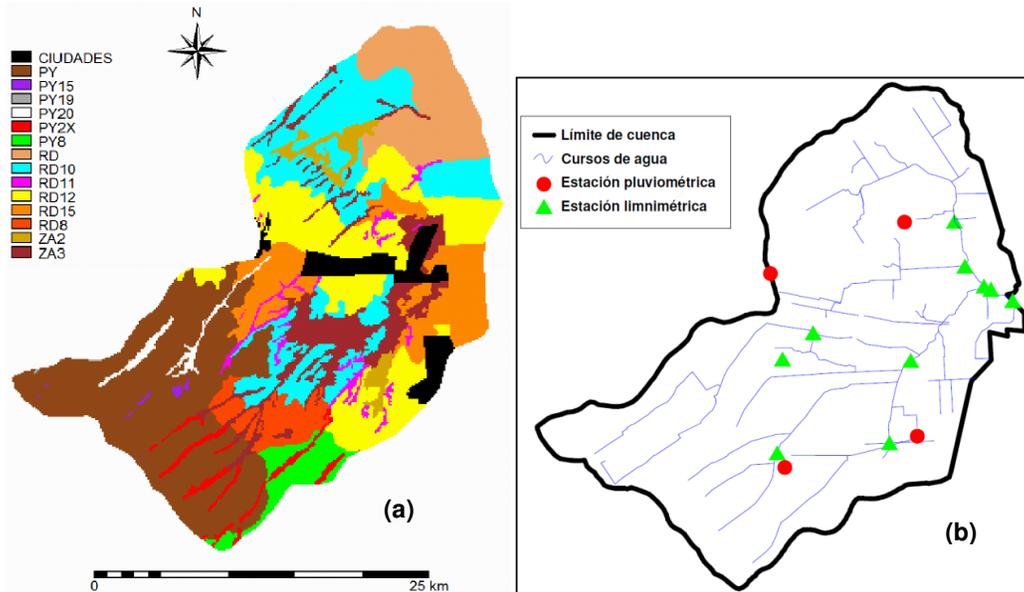


Figura 3. (a) asociaciones de suelos y (b) ubicación de los sensores en la cuenca del A° Ludueña.

El procedimiento de validación consistió en los siguientes pasos:

- estimación de un mapa de humedades de la cuenca con una resolución acorde a la imagen satelital (120 m, correspondiente a la banda infrarroja térmica del LANDSAT5) aplicando el método del triángulo.
- Adecuación del mapa de humedades a la discretización del modelo (250 m). Se desarrolló un programa de agregación escrito en FORTRAN que lee las coordenadas de centros de

celdas, la asociación de series de suelos a la que pertenece cada celda y el mapa de humedades con resolución de 120 m. Seguidamente, consulta la base de datos de parámetros hidráulicos del suelo y asigna los parámetros de interés (humedades límites y densidad aparente) acorde a las asociaciones de cada celda, transforma fracciones de capacidad de campo a contenido de humedad y saturación efectiva y los agrega a tamaño de grilla 250 m. (criterio utilizado “vecino más cercano”).

- (c) Aplicación la subrutina del modelo VMMHH 1.0 que construye los hietogramas netos de cada celda aplicando la metodología de Green y Ampt, partiendo del campo de precipitaciones correspondientes a cada tormenta, que fue desagregado a un tamaño de grilla de 250 m.

3 RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Análisis a partir de las imágenes satelitales

Los valores agregados a nivel de cuenca, es decir, sumados los volúmenes de escurrimiento con cierre en la sección de Circunvalación se presentan en la Tabla 2. Puede apreciarse en dicha Tabla conjuntamente las láminas de lluvia, lluvia efectiva (descontando intercepción) y lluvia neta observadas para las tormentas analizadas. Se ha estimado un rango de lluvia neta para los eventos debido a incertidumbres en los hidrogramas derivados de los limnigramas registrados.

De Tabla 2 es notorio que existe un desfase entre los valores estimados y observados de láminas netas, ya que en todos los casos se escapan del rango observado por defecto, y de manera notoria para la segunda tormenta. La deficiente estimación de la humedad antecedente mediante la imagen satelital puede estar asociada al tiempo de desfase entre el pasaje del satélite y el momento en que ocurre el evento (Tabla 1).

A pesar de ello, comparativamente con el método original adoptado a partir del índice IPA, se nota una mejor estimación de las láminas de escurrimiento. Salvo en la primera tormenta considerada, el método del triángulo se aparta en menor medida del intervalo observado de escurrimientos.

Tabla 2. Valores estimados de láminas netas.

Fecha de la tormenta	Lámina de lluvia (mm)	Rango de láminas netas observadas (mm)	Lámina neta estimada con HS antecedente según IPA (mm)	Fecha de la Imagen	Se medio cuenca	Lámina neta estimada por método del triángulo(mm)
29/11/2008	50,2	13 - 17	12,5	14/11/2008	0,16	10,4
20/02/2009	72,4	12 - 16	24,0	18/02/2009	0,42	6,3
03/02/2010	96,8	28 - 33	35,0	20/01/2010	0,40	27,6

Haciendo un análisis de las lluvias antecedentes a cada tormenta en los periodos entre revisita y tormenta, en el periodo entre el 14/11 y 29/11/2008, precipitan en promedio en la cuenca 4 mm el día 15/11 y 13 mm el día 26/11. Estas lluvias darían un tenor de humedad antecedente mayor que el “observado” por el satélite haciendo que la estimación de la lámina neta sea por defecto al considerar la imagen del día 14/11.

Para la tormenta del 20/02/2009, entre el 18 y el 19/02 no se registran precipitaciones, por lo cual la humedad antecedente al día 20/02 debería algo menor que la observada el día 18, teniendo en cuenta la fuerte demanda atmosférica de humedad de la época veraniega.

Para la última tormenta considerada, del 3/02/2010, cuya anterior imagen data del 20/01/2010, se registran en promedio 22 mm entre el 31/01/2010 al 2/02/2010. Debe tenerse en cuenta, además, que los 11 días previos a la tormenta del 31/01 existe una fuerte tasa de

evapotranspiración que podría incidir negativamente en el estado de humedad aún a pesar de las lluvias antecedentes a la tormenta analizada.

3.2 Modelo combinado IPA-SAT

Para tener en cuenta los eventos climáticos que ocurren en los desfases temporales entre tormenta y revisita del satélite se propone aquí aplicar un coeficiente correctivo y agregado en toda la cuenca definido como la relación entre las saturaciones efectivas (Se , ecuación 3) calculadas los días de revisita y antecedente a la tormenta considerada. En otras palabras, se propone actualizar el patrón de humedad estimado mediante la imagen satelital en función de la relación entre las Se mencionadas:

$$Cac = \frac{Se_{n-1}}{Se_d} = \frac{IPA_{n-1} - R_{PMP}}{IPA_d - R_{PMP}} \quad (4)$$

Donde Cac es un coeficiente de actualización climática, Se_{n-1} y Se_d , son las saturaciones efectivas correspondientes al día antecedente a la tormenta ($n-1$) y de revisita (d), respectivamente, IPA_{n-1} e IPA_d son los índices de precipitación antecedente correspondiente al día antecedente a la tormenta ($n-1$) y de revisita (d), respectivamente.

Con las precipitaciones registradas en el período de operación de los sensores (2008-2010), se construyeron valores de IPA para las 4 estaciones pluviométricas y se obtuvieron valores medios areales de Se aplicando la metodología de Thiessen. Con esta información se obtuvieron los “ Cac ” para cada tormenta considerada, se actualizaron los índices de saturación efectiva Se y recalculado las respectivas láminas netas acorde a la metodología descrita previamente. Los resultados de esta operación figuran en Tabla 3.

Tabla 3. Valores estimados de láminas netas (modelo combinado IPA-SAT)

Fecha de la tormenta	Lámina de lluvia (mm)	Cac	Rango de láminas netas observadas (mm)	Fecha de la Imagen	Se medio cuenca corregido	Lámina neta estimada por método del triángulo(mm)
29/11/2008	50,2	3,920	13 - 17	14/11/2008	0,31	14,4
20/02/2009	72,4	0,965	12 - 16	18/02/2009	0,40	5,6
03/02/2010	96,8	0,766	28 - 33	20/01/2010	0,31	24,4

Como puede apreciarse, los valores estimados de láminas netas se encuentran aún fuera del rango de los observados los casos analizados, salvo la primera tormenta. La propuesta de actualización de los patrones de humedad mediante el uso del IPA mejora la estimación en algunos casos, aunque prevalece la valoración por defecto en las tormentas analizadas.

Se pone de manifiesto un sesgo del método del triángulo hacia una subestimación de humedades superficiales, la cual deberá en el futuro próximo ser investigada con el fin de adaptar el mismo a las demandas de información de nuestra región. De todas maneras, el hecho que el sesgo sea en un mismo sentido en todos los casos representa una situación favorable a la hora de buscar las causas de la subestimación.

Dicha tendencia podría deberse a razones de escala, en el pasaje de escala de parcela a escala de cuenca, o bien, intrínsecamente al método lo cual deberá ser desmenuzado en profundidad. En principio, se analizarían las correcciones atmosféricas en la banda infrarroja térmica que no se han realizado siguiendo recomendaciones del autor del método. Otra cuestión a analizar es que el mismo estima valores superficiales de humedad, de los primeros centímetros de espesor, lo que no representa la humedad del perfil que interviene en el proceso de infiltración en la duración de la tormenta.

No obstante, si consideramos los errores absolutos respecto al promedio de los valores de escurrimiento observados, la metodología basada en el IPA arroja un error promedio de 5,67 mm, la basada en el método del triángulo un error medio de 5,06 mm y con las correcciones, 5,03 mm de error, respectivamente. Es decir, las estimaciones con el método del triángulo mejoran levemente los resultados. Además, intrínsecamente, el método sintetiza patrones de heterogeneidad espacial de la lluvia que se aprecian en la imagen satelital de partida, aspecto que el método basado en el IPA no tiene sensibilidad.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la validación a escala de cuenca de un procedimiento, conocido como “método del triángulo”, que se basa en técnicas de teledetección y permite estimar el contenido de humedad superficial del suelo. El procedimiento consiste en ubicar la posición relativa de un píxel de una imagen satelital en una gráfica de temperatura de brillo de la superficie vs. Índice NDVI.

En trabajos previos, la metodología fue contrastada con humedades puntuales de superficie (método gravimétrico) de una parcela experimental, ubicada en las cercanías de Rosario, obteniendo resultados aceptables en esa escala de trabajo.

La aplicación que se pretende dar en el futuro se relaciona con escalas de cuenca. Consecuentemente, el método fue validado comparando láminas de escurrimiento estimadas y observadas en la cuenca del A° Ludueña (Santa Fe, Argentina).

Las estimadas se obtuvieron indirectamente aplicando la ecuación de Green y Ampt a precipitaciones históricas, contando con mapas de suelo y la imagen LANDSAT5 correspondiente, para obtener condiciones antecedentes. Las observadas se obtuvieron mediante aforos en la sección de control.

Los resultados alcanzados al presente, se acerca a las expectativas puestas en el método, aunque para los casos analizados, las estimaciones de humedad superficial han sido por defecto.

Se propuso un coeficiente de ajuste, basado en el índice de precipitación antecedente (IPA) para compensar los desfases temporales entre revisita del satélite y día del evento, constituyendo de esta manera una metodología híbrida (IPA-SAT) para estimar las humedades superficiales.

La mejora introducida no compensa los errores por defecto encontrados al comienzo. Las causas podrían deberse a cuestiones intrínsecas del método que deberán analizarse en profundidad a continuación de la investigación.

No obstante, comparando la metodología propuesta con metodologías alternativas, tales como el índice de precipitación antecedente, se deduce que el patrón de distribución espacial de humedad superficial alcanzado es mucho más detallado y las humedades estimadas presentan una mejora en términos medios areales.

5 REFERENCIAS

- Carlson T. N., Dodd J. K., Benjamin S. G., y Cooper J. N., 1981. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia, *Journal of Applied Meteorology*, Volume 12, Issue: 1, publisher: NOAA Central Library, Department of Commerce.
- Carlson T. N.; An overview of the “Triangle Method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery; *Sensors* 2007, 7, 1612-1629
- Chiarito E y E. Zimmermann. 2013. Hidrología ambiental para sistemas de llanura: estimación de la humedad superficial del suelo mediante teledetección. *Primer Congreso Iberoamericano De Protección, Gestión, Eficiencia, Reciclado Y Reúso Del Agua*. Córdoba. Argentina.
- Riccardi Gerardo A., Erik D. Zimmermann, Pedro A. Basile, Hernán R. Stenta, Carlos M. Scuderi, Marina L. García, Juan P. Rentería. 2009. “El Modelado Del Escurrimiento Superficial En Cuencas Del Sur De La Provincia De Santa Fe, Argentina”. Capítulo 1. En: *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (Riccardi Gerardo A., Pedro A. Basile, Erik D. Zimmermann, Hernán R. Stenta, Carlos M. Scuderi, Juan P. Rentería, Marina L. Garcia). UNR editora. Rosario.

- Argentina. ISBN 978-950-673-691-0. pp 3-20.
- Riccardi Gerardo, Erik Zimmermann, Pedro Basile, Stenta Hernán, Carlos Scuderi, Juan Rentería. 2010. "Experiencias de Simulación Físicamente Basada de Escurrimiento Superficial en Cuencas de Llanura en Ambientes Rurales y Urbanos". *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Azul, Buenos Aires, Argentina. Trabajo completo. Vol. II. Pp 163-170.
- Stenta Hernán, Erik Zimmermann, Gerardo Riccardi, Pedro Basile, Juan Rentería, Carlos Scuderi. 2010. "Comparación de la Respuesta Hidrológica en una cuenca de Llanura mediante el uso del modelo HEC-HMS y el Modelo de Aproximación Difusiva VMMHH 1.0". *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Azul, Buenos Aires, Argentina. Vol. II. Pp 555-562.
- Yang X., Wu J. J., Shi P. J., Yan F. 2008. Modified Triangle Method to estimate soil moisture status with moderate resolution Imaging spectroradiometer (MODIS) products; The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Volume XXXII Part B8 commission VII; *ISPRS Congress* Beijing.
- Zimmermann, E; Basile, P. 2007. Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones no lineales con propiedades físicas y granulométricas. *XXI Congreso Nacional del Agua*. Tucumán. Argentina.
- Zimmermann Erik y Pedro Basile. 2008. "Uso De Funciones De Pedotransferencia Para La Estimación De Parámetros Hidráulicos En Suelos Limosos (Llanura Argentina)". *Boletín Geológico y Minero de España (Journal of Earth Sciences)*. Vol. 119 (1). p71-80.
- Zimmermann Erik D., Carlos M. Scuderi, Gerardo A. Riccardi, Hernán R. Stenta, Pedro A. Basile, Marina L. García, Juan P. Rentería. 2008. "Asignación De Parámetros Hidráulicos De Suelos Utilizando Funciones De Pedotransferencia Con Información De Las Cartas De Suelo Del INTA ". Capítulo 2. En: *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (Riccardi Gerardo A., Pedro A. Basile, Erik D. Zimmermann, Hernán R. Stenta, Carlos M. Scuderi, Juan P. Rentería, Marina L. García). UNR editora. Rosario. Argentina. ISBN 978-950-673-691-0. p145-156.
- Zimmermann Erik D., Pedro A. Basile, Carolina López, Gerardo Riccardi, Hernán Stenta, Carlos Scuderi y Juan P. Rentería. 2009. "Condiciones Antecedentes para la Tormenta de Diseño en el Área del Gran Rosario". *XXII Congreso Nacional del Agua y V Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Trelew. Argentina. vol. 1, CD, núm. T201, 11 pp.