

UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN PROCEDENTE DE TELEDETECCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS SUBTERRÁNEOS

ON THE USE OF REMOTELY SENSED INFORMATION FOR THE ANALYSIS OF GROUNDWATER SYSTEMS

Gustavo Ferreira^{1,2}, Marta Marizza¹, Leticia Rodríguez¹

Resumen

En áreas de llanura como la zona central de Argentina, el riesgo de anegamiento de zonas rurales y urbanas está asociado a la presencia de una superficie freática cercana a la superficie. Además, la relación de los niveles freáticos con la producción agropecuaria constituye un tema de investigación creciente dado su enorme impacto socioeconómico. En estas áreas, la posición del nivel freático está en directa relación con los factores climáticos, topográficos y geológicos, el uso de la tierra y la presencia o ausencia de canales de drenaje. Las fluctuaciones de los niveles freáticos están muy influenciadas por la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la evapotranspiración, el drenaje artificial y la percolación profunda. Estos mecanismos tienen importancia relativa diferente en función de la posición del nivel freático respecto de la superficie del suelo.

Conocer la profundidad del nivel freático es tan o más necesaria a escala regional que local, con el fin de implementar estrategias eficaces de manejo de recursos hídricos para la producción agrícola-ganadera y la mitigación del riesgo de inundaciones.

La información satelital surge entonces como una alternativa atractiva brindando la extensión areal deseada con una periodicidad adecuada. El desafío es entonces vincular información remotamente sensada con variables que caractericen el sistema subterráneo.

En este trabajo se presentan los resultados de correlacionar variables derivadas de imágenes satelitales como la evapotranspiración, con la posición del nivel freático, en una estación freatimétrica situada en la llanura central de Argentina, mediante la aplicación de un balance hídrico simplificado.

La metodología aplicada a una serie de 5 años (2004-2009), permitió inferir los niveles freáticos medios mensuales en la zona de estudio los que fluctuaron entre aproximadamente 4 y 8 m de profundidad. Teniendo en cuenta las simplificaciones establecidas en la metodología, la estimación de los niveles fue satisfactoria, ya que el error promedio para el período analizado fue de 0,36 m, correspondiente al 6 % de la profundidad media mensual. En la actualidad, la metodología se está probando en otros puntos de validación para reducir las incertidumbres del método y probar su aplicabilidad en diferentes sectores de la cuenca, con el fin de generar mapas de niveles freáticos a escala regional, que permitan implementar estrategias eficaces de manejo de recursos hídricos.

Palabras clave: teledetección, aguas subterráneas, evapotranspiración

Abstract

In lowland regions of Central Argentina, the flooding risk in urban and rural areas is associated to the presence of a water table near the surface. In addition, the relationship of phreatic levels to crops productivity has gained a growing research interest due to its enormous socio-economic impact. In those areas, the location of the water table is related to climatic, topographic and geologic factors, land use and the presence/absence of drainage canals. The phreatic levels fluctuations are influenced by recharge from precipitation and discharge from evapotranspiration, artificial drainage and deep percolation. These mechanisms have a different relevance according to the location of the water table with respect to the soil surface.

Knowing the depth to the water table is even more important at regional than at local scale in order to implement efficient water resources management strategies for agricultural production and flooding risk mitigation.

Satellite information emerges as an attractive alternative yielding the desired spatial coverage with adequate temporal resolution. The challenge is then; to link remotely sensed information to variables characterizing the groundwater system. In this work, results from the correlation between variables derived from satellites images such as evapotranspiration with phreatic levels by means of a simple water balance are presented. The method was applied at a monitoring station located in a lowland area in Central Argentina. The analysis for a 5 year period (2004-2009), allowed estimating mean monthly

¹ Centro de Estudios Hidro-ambientales, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL) Ciudad Universitaria, CC217, Paraje el Pozo (3000) Santa Fe, Argentina

² Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente. Provincia de Santa Fe. Argentina.
Mail de contacto: cgf@fich1.unl.edu.ar

*Artículo enviado el 16 de julio de 2012
Artículo aceptado el 21 de agosto de 2012*

phreatic levels at the study site, which fluctuated approximately between 4 and 8 m deep. Considering the simplifications set forth in the methodology, the results were considered satisfactory, with an average error of 0.36 m for the analysed period, corresponding to 6 % of the mean monthly water table depth. Currently, the methodology is being tested at additional sites aiming at reducing its uncertainties and expanding its applicability to different sectors of the basin. The final objective is to generate phreatic levels maps at regional maps to help the implementation of water resources management practices.

Keywords: remote sensing, groundwater, evapotranspiration

INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones de los niveles freáticos son el resultado de las tensiones que el ciclo hidrológico y algunas actividades antrópicas ejercen sobre los sistemas de aguas subterráneas, los que se traducen en cambios en el almacenamiento freático (Custodio y Llamas, 1996; Freeze y Cherry, 1979; Kienitz, 1979). Entre todos los mecanismos que influyen sobre los niveles freáticos, la recarga y la descarga de agua subterránea suelen ser predominantes (Rushton y Ward, 1979), por ende la identificación de áreas de recarga y descarga y la cuantificación de ambas son críticas no sólo para conocer la relación entre los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, sino también para una correcta gestión de los recursos hídricos de una zona o cuenca en particular.

Por otra parte, en áreas de llanura, el riesgo de anegamiento de zonas rurales y urbanas está asociado a la presencia de una superficie freática cercana a la superficie (Ferreira y Rodríguez, 2005), en tanto que la relación de los niveles freáticos con la producción agropecuaria se ha tornado un tema de investigación creciente dado su enorme impacto socioeconómico (Nosetto et al., 2009).

A diferencia de otras variables hidrológicas, la densidad espacial de puntos de monitoreo de NF es usualmente escasa como para definir comportamientos regionales y los registros son de corta duración. Además, la heterogeneidad que caracteriza a los medios porosos y la falta de homogeneidad en la toma de datos, hacen que la información que pueda obtenerse de tales series sea de carácter puntual o de alcance local.

Sin embargo, conocer la magnitud de los NF es tan o más necesaria a escala regional que local, con el fin de implementar estrategias eficaces de manejo de recursos hídricos para la producción agrícola-ganadera y la mitigación del riesgo de inundaciones y de sequías. Una opción sería la realización periódica de censos de pozos. Los mapas de niveles (o profundidades) resultantes permiten identificar zonas de recarga/descarga, direcciones y gradientes de flujo, zonas afectadas por bombeo, caracterización de la interacción aguas superficiales/subterráneas, entre otras características. Al menos en países en vías de desarrollo, estos censos se realizan muy esporádicamente y con un fin determinado debido a su alto costo, por lo que no brindan información sobre la evolución histórica del almacenamiento freático, sino sólo estados del sistema en fechas determinadas.

Las aplicaciones de la teledetección dedicadas a la zona saturada son escasas, y generalmente se orientan a caracterizar los acuíferos a partir del mapeo de otras variables que sí pueden ser sensadas remotamente y correlacionadas con datos de campo. En comparación con otras componentes del ciclo hidrológico, el agua subterránea y la humedad del suelo han sido las últimas variables en beneficiarse de la tecnología satelital (Becker, 2006). Usualmente la interpretación de imágenes pretende, a través de la visualización de rasgos geológicos/geomorfológicos de la superficie de la tierra, identificar interrelaciones entre las características superficiales y los sistemas subterráneos (Meijerik, 2007). Por otra parte, Groeneveld (2008), estimó ET a escala anual, a partir del NDVI (índice de vegetación) y lo correlacionó con la profundidad del agua subterránea, encontrando que los métodos basados sólo en el NDVI, subestiman la ET por no considerar la evaporación directa del agua subterránea desde la superficie del suelo para el caso de una zona semiárida con vegetación alcalina arbustiva.

La posición de los niveles freáticos en zonas de llanura está en directa relación con los factores climáticos, topográficos y geológicos, el tipo de explotación que se realiza y la presencia o ausencia de canales de drenaje. En este tipo de ambientes los movimientos horizontales de agua son poco significativos, por lo que predominan los movimientos verticales.

En la llanura central de Argentina, el acuífero freático es de relevancia estratégica desde el punto de vista agropecuario. Es utilizado profusamente como fuente de bebida para el ganado, en una zona eminentemente tambera, y en forma creciente es vinculado a la productividad de los cultivos (Jobbágy y Nosetto, 2009; Nosetto et al., 2009). Contar con mapas regionales de niveles freáticos permitiría, por ejemplo, realizar un cálculo aproximado de la capacidad de almacenamiento de excesos hídricos en la zona no saturada del suelo con anterioridad a la estación lluviosa, teniendo en cuenta su vinculación con el riesgo hídrico de inundaciones urbanas y rurales, y encontrar relaciones funcionales entre la profundidad a la freática y la productividad agrícola.

En la provincia de Santa Fe, Argentina, los registros continuos de NF están disponibles en pocos puntos de observación y las series son de corta duración. Por otro lado, sólo se cuenta con cuatro censos regionales de pozos en cuarenta años (CAAAS, 1976; INCYTH, 1986; INA, 2002; Ferreira et al., 2003). Las fluctuaciones temporales de los NF son

principalmente atribuidas a la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la ET, y en menor medida, el drenaje artificial y la percolación profunda. Estos mecanismos tienen importancia relativa diferente en función de la posición del nivel freático respecto de la superficie del suelo (Ferreira y Rodríguez, 2005).

La información satelital surge entonces como una alternativa atractiva para superar los inconvenientes del monitoreo de NF arriba apuntados, brindando la extensión areal deseada con una periodicidad adecuada. El desafío es entonces vincular información satelital con variables que caractericen el sistema subterráneo (Meijerink, 2007).

El objetivo de este trabajo es correlacionar variables derivadas de imágenes satelitales con la posición del nivel freático a escala mensual, en una estación freática situada en la llanura central de Argentina, mediante la aplicación de un balance hídrico simplificado.

El método planteado es netamente operativo, y sus resultados preliminares alientan la posibilidad de construir mapas secuenciales, convenientemente validados en suficientes puntos, de la profundidad al nivel freático a escala regional.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La provincia de Santa Fe integra la región agrícola-ganadera e industrial de la Argentina que concentra gran parte de la población del país (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA, Agencia Rafaela, 2008). Se encuentra ubicada entre los meridianos de 59° y 63° de longitud oeste y los paralelos de 28° y 34° de latitud sur, en una extensa planicie que se caracteriza por la suavidad de su relieve. La provincia ocupa el segundo lugar en el aporte al PBI agropecuario nacional, con una proporción del 18%, y representa el 21% del área sembrada del país. Es la primera productora de oleaginosas y segunda en la producción de cereales. La variabilidad climática y de suelos que presenta el sector Central de la provincia, no garantiza la rentabilidad de una agricultura pura pero puede incluirse dentro de sistemas mixtos basados en la ganadería lechera y/o de invernada, aportando alrededor del 35% de la producción láctea nacional y del 50% de la producción de carne bovina de la provincia.

El área de estudio comprende la cuenca del Arroyo Cululú, afluente por margen derecha del Río Salado, ubicada en el sector central de la provincia de Santa Fe, aunque una delgada franja de ancho variable correspondiente a sus cabeceras, se ubica al oeste, en la vecina provincia de Córdoba (Figura 1). La cuenca, de aproximadamente 9500 km², posee una amplitud máxima de 130 km en sentido Este-Oeste (E-O) y de 100 km en sentido Norte-Sur (N-S). Desde el punto de vista climático, se caracteriza por un clima templado pampeano. El área está inserta entre las isoterms medias anuales de 18 y 19°C. La preci-

pitación media anual es cercana a los 1000 mm con un leve gradiente decreciente en sentido E-O (serie 1971-2000). La distribución de precipitaciones se concentra en el semestre noviembre-abril con un 75 % del total anual. Los suelos de la zona pertenecen a asociaciones de Argiudoles. La geomorfología del área corresponde a la parte sur de la denominada faja de cañadas paralelas (Iriondo, 1987). La capa más superficial del perfil litológico está constituida por sedimentos loésicos, en los cuales se ubica el acuífero freático. El flujo subterráneo regional es en dirección predominantemente Oeste-Este (Ferreira y otros, 2003), teniendo como nivel de base el río Salado.

En cuanto a la hidrografía, la red de drenaje tiene dirección O-E, en tanto que el Arroyo Cululú tiene dirección N-S. La red de drenaje natural es fuertemente asimétrica, de 210 km de longitud, que se completa con una extensa red de canales artificiales de más de 1000 km. Los inicios de su construcción se sitúan en la década del 1930. Esta red ha sido ampliada a lo largo de los años con redes de drenaje menores o locales (DPOH-FICH, 1995).

El sitio elegido para validar la metodología descripta en la sección siguiente corresponde a la Estación Meteorológica de la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud (EACV) (Provincia de Córdoba), cuyas coordenadas son 30°50'22" de latitud sur y 61°57'35" de longitud oeste (Figura 1). Se encuentra en la cabecera de la cuenca, donde prevalece el movimiento vertical del agua, con escaso escurrimiento superficial, característico de la llanura circundante.

Se cuenta con datos hidrometeorológicos desde noviembre de 1997 y de nivel freático desde septiembre de 2003. La Figura 2 muestra el climograma correspondiente a la serie 1999-2008. Para este período se registró una temperatura media anual de 19,2 °C y una precipitación media anual de 955 mm.

En la Figura 3, se presenta el registro de niveles freáticos y precipitaciones diarios en la estación EACV para la serie septiembre 2003-marzo 2009. Se destaca que hasta julio de 2007 los niveles se medían en forma manual mediante sonda piezométrica, con una periodicidad de lectura de dos veces por semana; en setiembre de 2007 se instaló en el pozo un limnógrafo con datalogger que registra continuamente la profundidad al NF tomando una lectura cada 4 horas. De la observación de las fluctuaciones de los niveles se desprende que el sistema tiene una gran inercia para descargarse. Sin embargo, la respuesta ante eventos de precipitación refleja ascensos más rápidos.

Análisis del comportamiento de ET

Debido a la importancia del proceso de ET en el balance hídrico en ambientes de llanura, primeramente se investigó su comportamiento en la cuenca del Arroyo Cululú. Ferreira et al. (2003, 2009) analizaron inventarios de pozos y registros continuos de profundidad del nivel freático en algunos sitios con el fin de

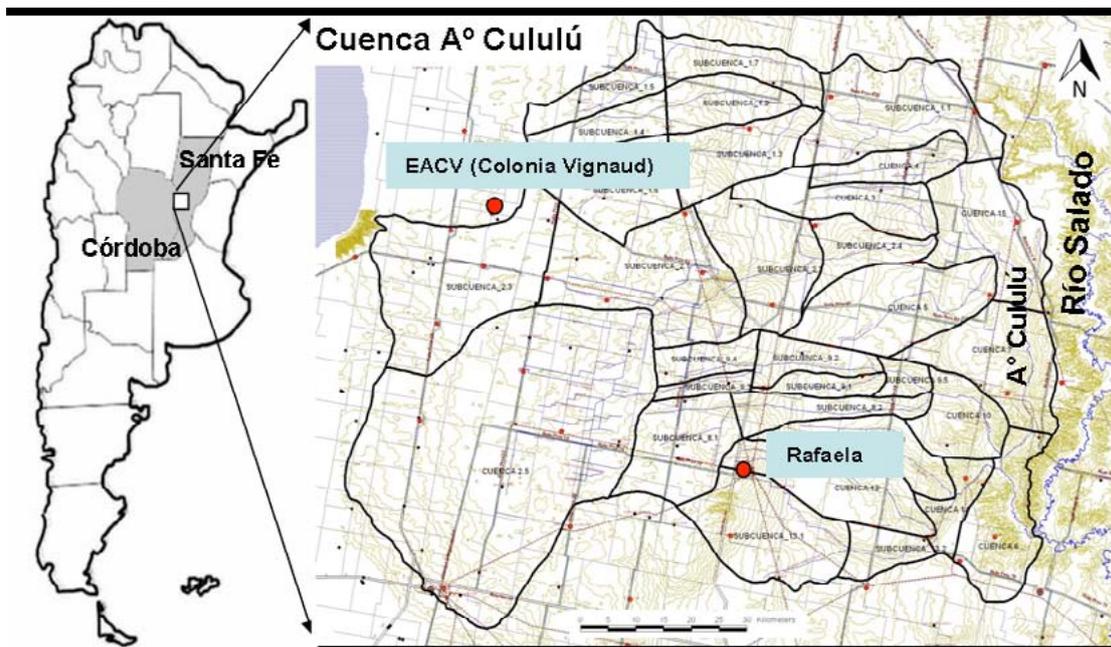


Figura 1. Área de estudio, Cuenca del Arroyo Cululú (Fuente: INA 2007).

estimar la recarga neta anual del acuífero freático y caracterizar los períodos de descarga. Los autores verificaron que la ET juega un papel importante en los procesos de descarga identificando diferentes tasas de descenso de NF según se trate de los meses invernales o estivales (Ferreira y Rodríguez, 2005; Ferreira et al., 2009).

Como ejemplo de la influencia de la ET sobre los NF, la Figura 4 muestra una comparación entre distintas curvas de descensos de NF medios mensuales obtenidas en base a 40 años de registros de NF en la Estación Experimental Agropecuaria Rafaela (EEA Rafaela), del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), situada en la Prov. de Santa Fe, a

64 km al sudeste de Colonia Vignaud (ver localización en la Figura 1).

En la leyenda de la figura se indica el mes y año de inicio del tramo de descenso. Los registros se graficaron en coincidencia con los meses de tres años sucesivos, independiente del año (así el mes de enero en abscisas, corresponde al mes 1, 13, o 25). Ejemplo: la curva de descenso identificada con "x", se inicia en enero de 1976 (mes 1) a una profundidad de 7,88 m, finaliza en febrero del año siguiente (mes 14) con una profundidad de 8,80 m. Se destacan en color los tres períodos de descensos más prolongados registrados en la serie.

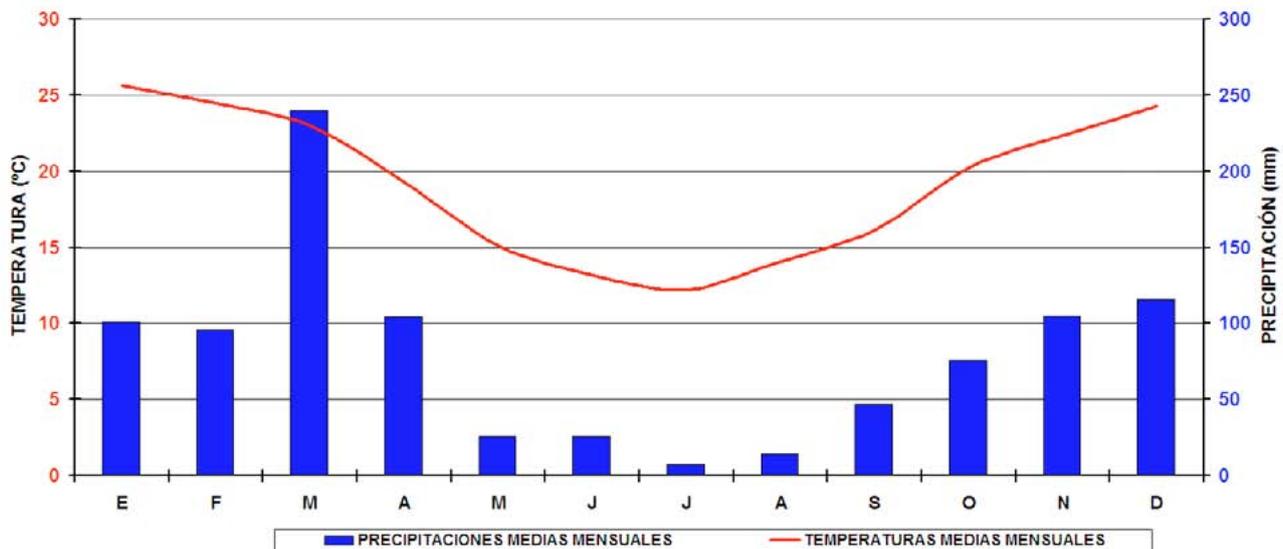


Figura 2. Climograma de Colonia Vignaud (Provincia de Córdoba). Serie 1999-2008.

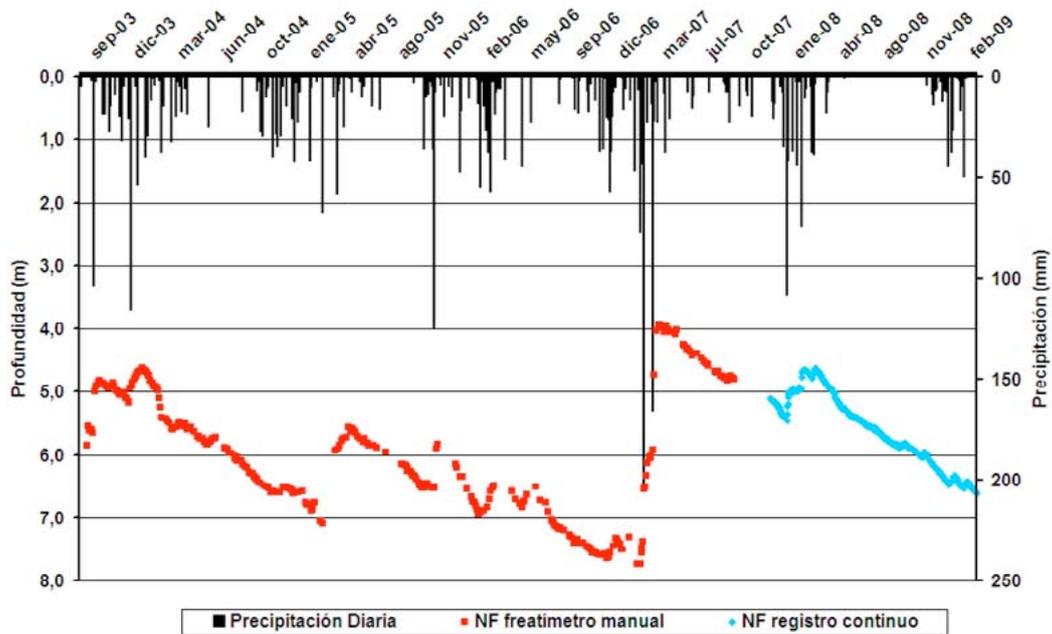


Figura 3. Niveles freáticos y precipitaciones diarias en la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud (EACV)

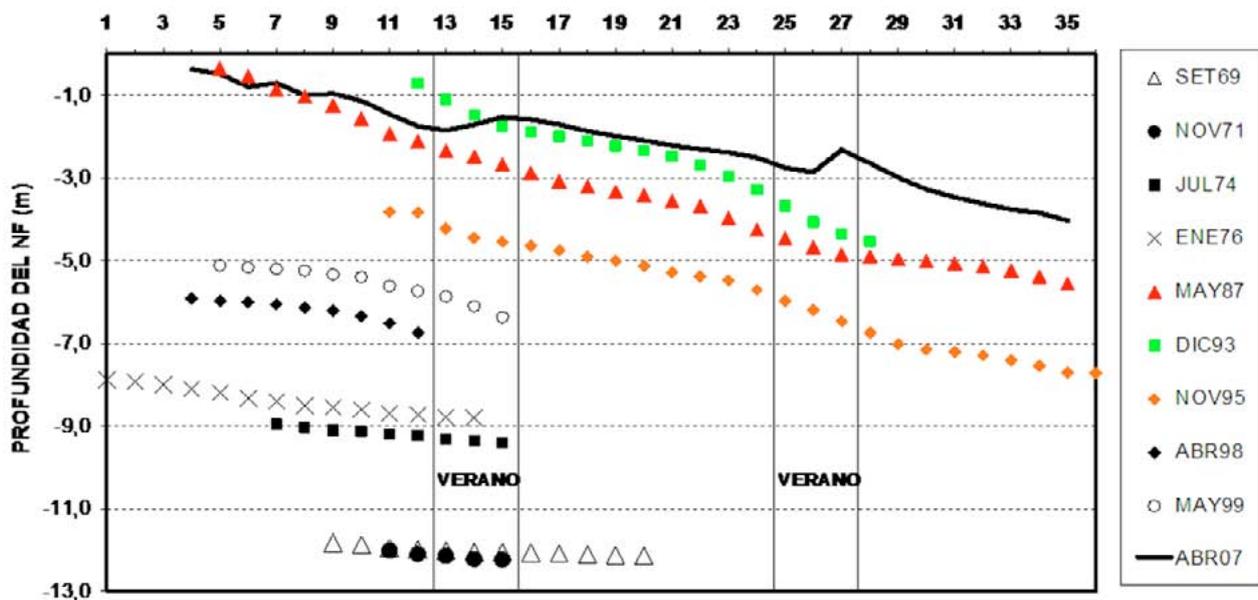


Figura 4. Comparación de tramos de curvas de descenso de niveles freáticos mensuales en la EEA Rafaela, Prov. de Santa Fe. En abscisas se indica el paso de tiempo mensual a lo largo de 36 meses.

La descarga varía con la profundidad reduciéndose a medida que la profundidad aumenta, indicando que el proceso de descarga deviene más lento. Ferreira et al.(2009) encontraron que entre los 2 y 5 m de profundidad los procesos de descarga son muy dinámicos debido a la coexistencia de varios mecanismos que afectan al nivel freático, entre ellos, ET, drenaje artificial y descarga regional del acuífero. Este último proceso esta siempre presente independientemente de la profundidad de la superficie freática, en tanto que los otros dos mecanismos varían en magnitud según el caso. El efecto de la descarga regional se

observa claramente en la Figura 4, en las curvas ubicadas por debajo de los 11 m de profundidad.

Se aprecia que existe un paralelismo en la curva de descenso cuya pendiente está vinculada con la profundidad al NF. A medida que la profundidad aumenta, la pendiente de cada tramo de descenso disminuye, debido a que la ET pierde importancia en el proceso de la descarga subterránea y los niveles descienden más lentamente. Se observa además que durante los meses de verano, y para profundidades aproximadamente menores a 7 m, la pendiente de descenso es mayor que durante el período inver-

nal, por efecto de la ET. Esos quiebres de pendiente entre el verano y el invierno no se observan a profundidades mayores a 7 m, lo que podría reflejar un límite (al menos a nivel local) para la influencia de este mecanismo (Ferreira y Rodríguez, 2005). Este límite local coincide con los valores de profundidad media máxima de enraizamiento obtenido por Canadell et al. (1996) para distintas especies arbóreas, a nivel global (árboles: 7,0+/- 1,2 m). Se debe destacar que en un área de 0,5 km² cercana a la estación freaticométrica, existe una agrupación de árboles de distintas especies, que superan los 10 m de altura.

La línea continua a partir de abril 2007 (mes 4) ilustra el período de sequía más reciente, con una tendencia general al decrecimiento del NF. Sin embargo, durante los meses de verano difiere de los otros períodos de descenso analizados, dado que durante los dos períodos estivales que incluye la curva se registraron eventos de precipitación importantes que dieron lugar a recarga y por ende a un leve aumento en los niveles.

METODOLOGÍA

Datos disponibles

Para el presente trabajo se utilizaron datos diarios de temperaturas extremas, precipitaciones y profundidad del NF de la estación EACV, para la serie enero 2005-marzo 2009.

Asimismo se utilizaron mapas de evapotranspiración real ETR (aquí denominada ET remota) estimada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA - <http://www.sepa.inta.gob.ar/>) para el intervalo temporal correspondiente a enero 2005-marzo 2009 que cubren el área de estudio. Los mapas tienen una resolución es de 1,1 km x 1,1 km, donde cada píxel representa el valor de ET remota máxima de un período de 7 o 10 días, expresado en mm/mes. Los mapas de ET remota son el resultado de la aplicación del algoritmo desarrollado por Di Bella et al. (2000), que se obtiene a partir de una serie de rutinas automáticas de procesamiento de mapas diarios del NDVI y la temperatura de superficie (T_s) obtenidas de imágenes NOAA AVHRR, válido solamente para los meses de primavera y verano, resultando en la ecuación:

$$ET = - 88.3439 + 1.77636T_s + 286.406 \text{ NDVI} \quad (1)$$

donde ET se expresa en mm y T_s en °C. Di Bella et al. (2000) contrastaron ET obtenida mediante la ecuación (1) con ET obtenida de balance hídrico en varios sitios de la llanura central de Argentina, que cubren un amplio rango de cobertura vegetal, desde pastizales naturales hasta agricultura intensiva. Uno de los sitios validados es la EEA Rafaela, por lo tanto se consideró que la ET remota estimada por el mé-

todo de Di Bella et al. (2000) es representativa de la zona de estudio.

Procedimiento de cálculo

La metodología se aplica a nivel mensual y consta de los siguientes pasos:

1. Obtención de la ET remota mensual a partir de varios mapas consecutivos para el píxel correspondiente al sitio de análisis;
2. Aplicación de un balance hídrico simplificado utilizando ET remota para meses cálidos;
3. Obtención de la recta de regresión entre el resultado de 2) y la variación del nivel freático medio mensual observado;
4. Estimación de la ET remota para meses invernales;
5. Aplicación del balance en conjunción con la recta de regresión de 3) para reproducir la evolución temporal de los niveles observados en el sitio de estudio para todo el período de análisis.

El balance hídrico a escala mensual puede expresarse según la ecuación 2:

$$\pm \Delta L = P - ET \text{ remota} \quad (2)$$

donde:

P = precipitación mensual (mm)

ET remota = evapotranspiración real (mm)

ΔL = cambio en el almacenamiento de agua subterránea (mm)

Si $P > ET$, es una situación de exceso hídrico, implica un incremento de agua almacenada en la zona de aireación y eventualmente incrementos del NF por recarga. Si $P < ET$, indica que las salidas en su conjunto son mayores que P , dando lugar a una disminución de la humedad del suelo y una potencial ausencia de recarga, lo que llevaría a una disminución de los NF por efecto del escurrimiento regional. Se debe destacar que ET depende de la disponibilidad de agua y de energía, además del tipo, estado de desarrollo y profundidad radicular de la vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo, la precipitación mensual se obtuvo de los datos meteorológicos de la estación EACV acumulando los datos diarios observados en pluviómetro. La evapotranspiración real mensual resulta de acumular el valor del píxel de sucesivos mapas de ET remota, que contiene las coordenadas de la estación EACV, utilizando el software ENVI (ITT Industries, 2005).

La Figura 5 muestra la correlación entre la variación del nivel freático medio mensual observado (DL, expresado en m) y ΔL obtenido con el balance. El valor de DL se obtuvo a partir de mediciones freatigráficas. Para los meses de primavera-verano del período analizado comprendido entre enero de 2005 y marzo de 2009, el coeficiente de correlación resultó $R^2 = 0,8$ y la recta ajustada (ecuación 3):

$$DL(m) = 3.910^{-3} m / mm * (P - ET_{remota}) + 3.510^{-2} m \quad (3)$$

Previo a inferir la evolución temporal de niveles de agua subterránea para el período de estudio, fue necesario estimar ET remota para los meses invernales dado que no son provistos por el INTA. A partir de estudios previos realizados por el grupo de trabajo,

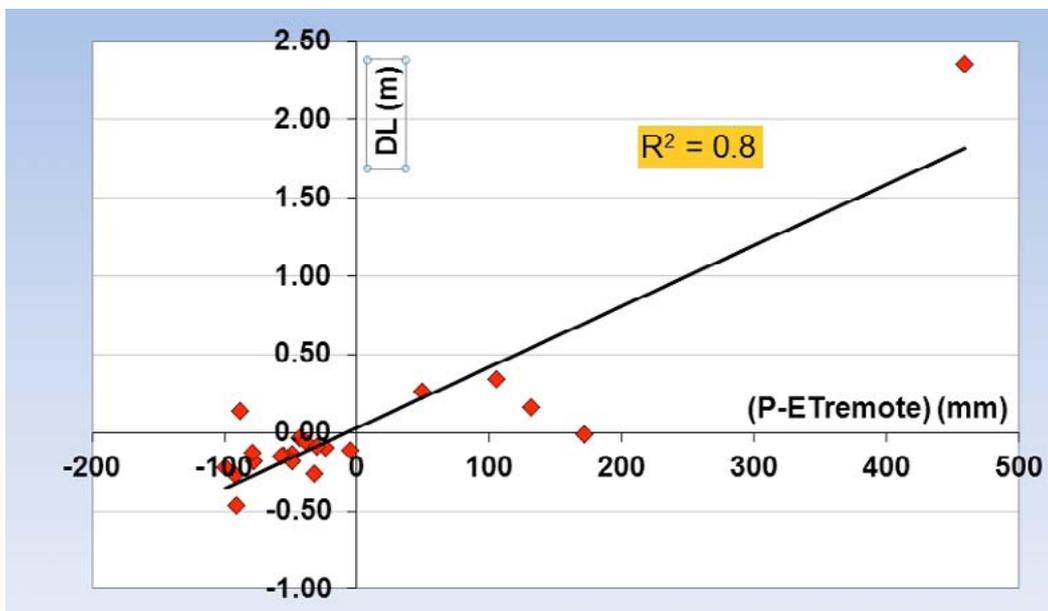


Figura 5. Correlación entre P-ETremota y DL a escala mensual

se estimó la ET para la estación INTA Rafaela mediante las fórmulas de Priestly-Taylor (Priestly y Taylor, 1972), Mankkink (Mankkink, 1957) y Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

Con estos valores se definió una evapotranspiración de referencia ETo promedio mensual, que posteriormente se adimensionalizó (Figura 6) dividiendo el valor mensual por el valor de ETo correspondiente al mes de enero, el de mayor valor en condiciones medias. Por lo tanto al mes de enero le corresponde un coeficiente de ETo adimensional igual a 1.

En este trabajo se asume que la distribución adimensional de la ET remota a lo largo de un año medio tiene igual distribución adimensional que la ETo mostrada en la Figura 6. De esta manera se pudieron calcular los valores de ET remota de los meses que tienen temperaturas medias inferiores a 20°C (para los cuales el INTA no provee datos), partiendo de un mes conocido perteneciente al verano, por ejemplo enero. A modo de ejemplo la ecuación 5 refleja el cálculo de ET remota para el mes de agosto:

$$ET_{remota}(\text{agosto}) = ET_{remota}(\text{enero}) * \text{coef-adim ET}_{remota}(\text{agosto}) \quad (5)$$

Por ende, los coeficientes adimensionales para los meses de otoño e invierno fueron multiplicados por la ET remota de enero de cada año analizado (2005-2009) con el fin de completar la serie de ET para

el período total. La serie de ET remota obtenida fue utilizada en el balance hídrico mensual simplificado para inferir la evolución temporal de los niveles freáticos en el sitio de estudio a partir de la correlación encontrada representada por la ecuación (3).

El NF para un mes determinado, se calculó partiendo del NF del mes anterior, sumando o restando según corresponda, el DL obtenido de la ecuación (3). El cálculo se inició considerando conocido el NF correspondiente al primer mes del período analizado.

La Figura 7 muestra el resultado de la comparación entre valores estimados y observados de NF medio mensual en la estación EACV.

La máxima diferencia entre los niveles medidos y estimados mediante el balance fue de 1,32 m y la mínima de 0 m, con un error promedio de 0,36 m. Cabe destacar que la profundidad media mensual del nivel freático para el período de análisis fluctuó entre 3,98 m y 7,63 m.

La mayor diferencia encontrada corresponde al mes de abril de 2007. Como consecuencia de un evento extremo de precipitaciones (560 mm en un mes), los NF en la región donde se encuentra la estación EACV experimentaron un ascenso mensual récord para la zona de 3 m (Ferreira et al., 2009). La metodología aplicada refleja la ocurrencia del ascenso, aunque no ajusta perfectamente la magnitud del mismo debido



Figura 6. ETo mensual adimensional

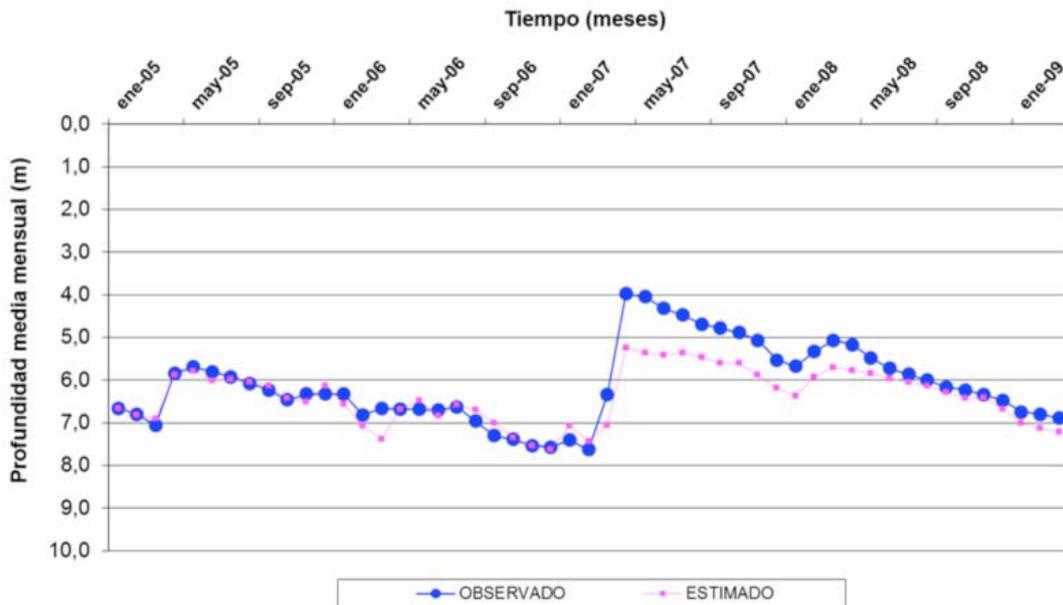


Figura 7. Comparación de valores de NF medio mensual calculados y observados entre Ene2005 y Ene2009

a lo extraordinario del evento. Esa diferencia se va disipando paulatinamente en los meses siguientes de cálculo hasta que prácticamente desaparece un año después, en mayo de 2008. A partir de este mes se obtiene un ajuste muy bueno entre niveles estimados y observados.

CONCLUSIONES

Para el sitio de estudio se verificó que las fluctuaciones temporales más notables de los niveles freáticos observados son aquellas referidas a la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la evapotranspiración real hasta una profundidad cercana a los 7 m. En el período analizado las fluc-

tuaciones de los NF variaron aproximadamente entre 4 y 8 m.

Teniendo en cuenta las simplificaciones establecidas en la metodología, la estimación de los niveles freáticos ha sido satisfactoria, con un error promedio correspondiente al 6 % relativo a la profundidad media mensual, considerando además que se vinculan datos a nivel puntual (pluviómetro y freatómetro) con información satelital a nivel píxel.

La metodología se considera acertada para la zona de recarga de la cuenca en estudio, ya que los resultados obtenidos a nivel mensual muestran que es posible -en términos medios- desprestigiar el flujo superficial.

La recta de regresión encontrada se aplica indistintamente para todo el rango de profundidad observado, sin considerar el diferente comportamiento que presentan las variaciones de los niveles freáticos con la profundidad. Asimismo, la recta se ajusta para la información correspondiente a los meses cálidos y se aplica para estimar los niveles freáticos en los meses fríos. Si bien se introducen errores, para la escala de trabajo se consideran aceptables. La aplicación de esta simple metodología muestra que la utilización de información remota combinada con un modelo sencillo de balance hídrico tiene un gran potencial en el análisis de sistemas subterráneos, minimizando la realización de los costosos levantamientos de campo de escala regional.

En la actualidad, la metodología se está aplicando en otros puntos de validación para reducir las incertidumbres del método a escala espacial. Una vez culminada esta tarea se estará en condiciones de generar los primeros mapas de evolución mensual de NF en la cuenca del Arroyo Cululú. Estos mapas estarán destinados a distintos tipos de usuarios, por ejemplo, los agricultores podrán conocer el estado del sistema subterráneo previo a la época de siembra, a su vez los organismos públicos podrán establecer la condición de humedad de la cuenca antes de los períodos lluviosos, y adaptar estrategias y políticas de prevención de inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al personal del INTA Castellar de la Provincia de Buenos Aires - particularmente Patricio Oricchio- y a la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud por el aporte de datos meteorológicos.

Los estudios desarrollados para la elaboración del presente trabajo han sido posibles, en parte, gracias a los fondos provenientes de la Acción de Coordinación VIAGUA (410AC0399) del Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo) de España y del programa CAI+D de la Universidad Nacional del Litoral de Argentina.

Se extiende el agradecimiento a los dos revisores anónimos cuyos comentarios y sugerencias contribuyeron a mejorar la calidad del trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R.G., L. Pereira, D. Raes, & M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo (Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO.

Becker, M. 2006. Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water. *GroundWater* 44 (2): 306–318.

CAAAS - Convenio Argentino Alemán de Aguas Subterráneas. 1976. Recursos de Agua Subterránea y su aprovechamiento en la Llanura Pampeana y en el Valle del Conlara. Tomo 8. Servicio Geológico de la República Federal de Alemania.

Canadell, J., R. Jackson, J. Ehleringer, H. Mooney, O. Sala & E. Schulze. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108: 583–595.

Custodio, E. & M. Llamas. 1996. Hidrología Subterránea. Ed. Omega. Barcelona. España. T1, 333–335.

Di Bella, C., C. Rebella, & M. Paruelo. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. INTA, IFEVA. Buenos Aires, Argentina.

DPOH-FICH (Dirección Provincial de Obras Hidráulicas – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas) (1995) Préstamo de Protección contra las Inundaciones. Canalización y Obras de Arte Cuenca del Arroyo Cululú. Anexo Específico. Santa Fe. Argentina.

Ferreira, G., G. Farías & L. Rodríguez. 2003. Comportamiento de Niveles Freáticos en Zonas Rurales: Cuenca Inferior del Río Salado, Santa Fe, Anales del 3er. Cong. Arg. de Hidrogeología y 1er. Seminario Hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea. Rosario. Argentina. UNR Editora. T1, 255-262.

Ferreira, G. & L. Rodríguez. 2005. Uso de niveles freáticos para la caracterización de la recarga/descarga. XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina

Ferreira, G., L. Rodríguez, C. Vionnet, J. Choque & P. Marano. 2009. Avances en el conocimiento del acuífero libre de la cuenca del Arroyo Cululú (Provincia de Santa Fe), Argentina. VI Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. La Pampa, Argentina.

Freeze, R. & J. Cherry. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Inc. New Jersey.

Groeneveld, D. (2008) Remotely-sensed groundwater evapotranspiration from alkali scrub affected by declining water table. *Journal of Hydrology* 358, pp. 294– 303. ISSN: 0022 1694. Available at www.sciencedirect.com.

- INA. 2002. Influencia de los Acueductos proyectados en la Provincia de Santa Fe sobre los niveles freáticos. Convenio INA/DPOH-Prov. de Santa Fe. Argentina.
- INA. 2007. Influencia de los cambios físicos y climáticos en el régimen de escurrimiento del Río Salado –tramo inferior. Convenio Ministerio de Asuntos Hídricos de la Provincia de Santa Fe - UNL (FICH) - INA(CRL) - INTA (EEA Rafaela). Santa Fe. Argentina.
- INCYTH. 1986. Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Salado. Centro Regional Litoral. Santa Fe. Argentina.
- INTA-AGENCIA EXPERIMENTAL RAFAELA. ARGENTINA. 28/06/2008. <http://www.inta.gov.ar/>.
- Iriondo, M. 1987. Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Dpto. de Hidrología General y Aplicada. UNL. Santa Fe. Argentina.
- ITT Industries. 2005. ENVI version 4.2. ITT Industries-Solution for data visualization and images analysis. August 2005. Boulder, Colorado-USA.
- Jobbágy, E. & M. Noretto. 2009. Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. XVII Congreso Nacional de AAPRESID. Argentina.
- Kienitz, G. 1979. Hydrological Regime as Influenced by Drainage of Wetlands. IHP. Unesco. Paris. France.
- Makkink G. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. J. Instn Wat. Engrs. 11: 277-288.
- Meijerink, M. 2007 Remote Sensing Applications to Groundwater. IHP-VI, Series on Groundwater No.16. Unesco.
- Noretto, M., E. Jobbágy, G. Sznaider & R. Jackson. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. Field Crop Research 113: 138-148. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.fcr.2009.04.016.
- Priestley, C. & R. Taylor.1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review 100 (2).
- Rushton, K., & C. Ward. 1979. "The Estimation of Groundwater Recharge" J. Hydrology 41: 345-361.