

GENERACIÓN DE ESCENARIOS A FUTURO DEL ESTADO HÍDRICO DE LOS CULTIVOS MEDIANTE BALANCE HIDROLÓGICO

Adriana Basualdo¹, Pablo Carbajo¹ y Sandra Occhiuzzi¹
Oficina de Riesgo Agropecuario – MAGyP - Argentina

RESUMEN

Se ha diseñado e implementado un sistema informático en lenguaje C# que utiliza bases de datos relacionales para la generación de escenarios futuros de estado hídrico. El contenido de agua se estima mediante un algoritmo de balance hídrico de paso diario (Basualdo y Occhiuzzi, 2005) tomando en cuenta los parámetros representativos básicos de cada suelo y los requerimientos hídricos en cada etapa del cultivo considerado. El modelo de balance, además de facilitar un seguimiento diario que se actualiza semanalmente con información meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), permite además realizar escenarios a futuro basados en estadísticas de las series de precipitación, con el fin de evaluar anticipadamente la probabilidad de diferentes estados de los almacenajes hídricos en periodos futuros y, en particular, adelantarse a la posibilidad de déficits o excesos hídricos en los periodos críticos de cada cultivo. La ocurrencia o no de precipitación en los días simulados se describe mediante una cadena de Markov de primer orden (Feyerherm y Dean Bark, 1965) y el monto de la precipitación, cuando se determina que esta ocurre, es descrita por una distribución gamma basada en la serie estadística correspondiente (Bruhn et al. 1980, entre otros).

ABSTRACT

Software for tracking and monitoring of hydric conditions for the crop of the pampeana region of the Argentine through the estimation of water storage in the soil was designed and implemented using C# and relational databases. Water content is estimated through a daily-step hydric balance algorithm (Basualdo y Occhiuzzi, 2005). The hydric balance used takes into account basic representative parameters of each soil and hydric requirements on each stage of the considered crops. The balance model allows daily tracking, which is updated weekly with information from the Servicio Meteorológico Nacional (SMN) and Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Besides, it calculates statistical future likely scenarios based on previous precipitation. The objective is to assess in advance probability of water availability in the short-term time scale. Particularly it is focused on crops stress periods. Precipitation occurrence in the simulation is described by a Markov chain process (Feyerherm y Dean Bark, 1965). Rain amount is described by a Gamma distribution based on previous statistics (Bruhn et al. 1980, among others).

Palabras Clave: Balance Hídrico. Cultivo. Escenarios. Riesgo.

1) INTRODUCCIÓN

De todos los elementos meteorológicos, el que presenta más variabilidad interanual y que sin duda ejerce mayor impacto en la agricultura de secano es la precipitación u oferta de agua (IPCC, 2008). De la interacción entre la oferta de agua, su infiltración y retención en el suelo, y la demanda de agua constituida por los elementos meteorológicos que producen la evaporación directa desde el suelo y la transpiración a través de los estomas de las hojas de las plantas (constituyendo en conjunto la evapotranspiración), resulta lo que llamamos reserva o almacenaje de agua en el suelo en un momento

dado. Si el almacenaje es abundante, constituye una suerte de seguro para el consumo de los días siguientes exentos de precipitación. Es un dato del que se deduce un diagnóstico del estado actual de la vegetación que cubre el suelo, entendiendo como tal la capa de la superficie del terreno hasta donde tienen actividad normalmente la mayor proporción de los sistemas de raíces de la vegetación natural y que exporta agua a la atmósfera.

Las mermas en los rendimientos de los cultivos presentes en Argentina se relacionan principalmente con deficiencias hídricas a floración o con excesos en las etapas inicial y final del ciclo del cultivo (FAO, 2012). De allí el interés de la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGyP) en desarrollar un sistema informático de seguimiento de la situación hídrica de los cultivos más extendidos en el país, es decir, trigo, soja, maíz y girasol y su posible evolución futura. Para su aplicación en ganadería, también se realiza un seguimiento del estado hídrico de las pasturas y los escenarios a futuro correspondientes.

Existen numerosos antecedentes de estimación del estado de las reservas hídricas futuras a corto y mediano plazo que utilizan valores pronosticados de las variables meteorológicas (Xing, 2011; Schlosser y Milly, 2002). Estos modelos utilizan las variables meteorológicas pronosticadas para estimar recargas o desecamientos futuros (algunos operativos y muy populares entre los usuarios del sector agropecuario, como el de COLA-IGES, <http://wxmaps.org/pix/clim.html>) y obtienen así un contenido de agua en el suelo pronosticado en periodo estimado.

En Argentina, el Ing. Agr. L. A. Forte Lay desarrolló un modelo de balance de agua en el suelo (Forte Lay et al. 2008), el cual se basa en el método de Thornthwaite–Mather con datos de precipitación diaria, de evapotranspiración de referencia obtenida con la fórmula de Penman– Monteith (Allen et al., 2004) y con las constantes hidrológicas capacidad de campo y punto de marchitez para simular las características de los distintos tipos de suelos. Al correr el modelo para un mismo periodo de días en todos los años de la serie pluviométrica disponible, agrupándolos y promediándolos según correspondieran a periodos con lluvias abundantes (quintil superior), escasas (quintil inferior) o normales (quintiles intermedios), pueden estimarse valores futuros posibles de contenido de humedad en el suelo de acuerdo a estos tres diferentes escenarios de precipitación (Forte Lay, sin publicar).

El modelo que se presenta aquí utiliza valores estadísticos derivados de series de precipitación para estimar el estado futuro de las reservas hídricas según los mismos tres escenarios posibles: lluvias abundantes, normales o escasas, en cada día del periodo simulado. Se simulan series de precipitación para el periodo futuro en función de estos estadísticos, utilizando el método Montecarlo y cadenas de Markov. Se trata de un modelo estadístico sencillo de estimación de diferentes estados hídricos a futuro en función de posibles escenarios de lluvia, que sólo utiliza estadísticos aportados por las series pluviométricas y el balance hídrico desarrollado en la Oficina de Riesgo Agropecuario ((Basualdo y Occhiuzzi, 2005). El escenario más probable a corto o largo plazo se selecciona según pronósticos del tiempo o tendencias climáticas, respectivamente, elaboradas por el Servicio Meteorológico Nacional.

Los resultados de balances hídricos tanto calculados como estimados a futuro (escenarios) son salvados en formato Excel y se aprovecha su motor de gráficos para hacer visualizaciones de fácil interpretación por parte de los usuarios, en forma de gráfico y tabla asociada.

2) ELEMENTOS DEL TRABAJO Y METODOLOGÍA

- Balance hídrico

El balance hídrico diario implementado para el cálculo del almacenamiento de agua en el suelo considera los siguientes términos:

$$ALM_{final} + EXC_{final} = ALM_{inicial} + EXC_{inicial} + PP - ESC - PER - ETR \quad (1)$$

En esta ecuación ALM es el almacenamiento de agua en el suelo, EXC los excesos de agua acumulados en superficie, PP la precipitación, ESC el escurrimiento superficial, ETR la evapotranspiración real del cultivo y PER la percolación o infiltración profunda.

En el mismo se han despreciando movimientos horizontales subsuperficiales de agua, que resultan en general de orden menor que los verticales. A continuación se resumirá muy brevemente la forma en que el modelo implementado estima cada uno de estos términos, ya que la metodología fue publicada en los Anales del X CONGRESO ARGENTINO DE METEOROLOGIA (Basualdo y Occhiuzzi, 2005).

La capacidad de un suelo de almacenar agua depende de la cantidad y tamaño de sus poros, es decir de su estructura, textura y contenido de materia orgánica. Para la estimación de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PMP), el modelo considera el método de Ritchie (1987). Los valores de capacidad no se refieren a una profundidad fija, sino que tienen en cuenta la profundidad típica de exploración radicular en cada zona. Frecuentemente se llama a esta medida “capacidad efectiva”. El método de Ritchie para la estimación de la CC y el PMP considera distintos horizontes, la profundidad de cada uno de ellos, porcentajes de arena, arcilla, limo y materia orgánica.

Dependiendo del tipo de suelo, no es posible extraer por completo el agua del perfil, sino que existe un contenido mínimo de agua residual o límite de desecamiento. Distintos tipos de suelo muestran límites de desecamiento diferentes: los arenosos pueden perder todo el contenido de agua si se dan las condiciones para ello, mientras que los arcillosos mantienen una cantidad mínima que no es utilizable por las plantas pero se conserva aún en condiciones de sequía severas. Se utilizó el algoritmo definido por Forte Lay et al (2007).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizó la denominada ecuación de FAO Penman-Monteith (FAO, 1998), recomendada por la FAO. El valor de ETP se calcula en función de la radiación máxima (astronómica) del día y valores de las siguientes variables meteorológicas: temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, viento y heliofanía. Cuando no se dispone de datos de heliofanía, se utiliza la nubosidad, según la aproximación sugerida por FAO (1998). En los casos en los que no se cuenta con los datos suficientes, se estima la ETP como el promedio histórico por períodos de 10 días.

Cuando la humedad del suelo es inferior a la capacidad de campo, la evapotranspiración real del sistema suelo-cultivo es menor que la potencial, y va disminuyendo a medida que aumenta el nivel de estrés hídrico al que está sometido el cultivo. De acuerdo al esquema anterior, el valor de evapotranspiración real (ETR) se halla a partir de su valor potencial (ETP) y del almacenaje inicial del suelo expresado como fracción de la capacidad de campo.

A la relación entre el consumo de un cultivo y el de una pradera permanente se lo denomina coeficiente de cultivo (Kc). Estos coeficiente, sugeridos por expertos de INTA en el desarrollo del sistema de Monitoreo y Alerta Temprana de la Oficina de Riesgo Agropecuario, se utilizan para estimar el consumo hídrico de cada cultivo en particular.

El escurrimiento superficial es la parte de la precipitación que no ingresa al suelo debido a que el mismo no es perfectamente permeable. También el modelo estima un paulatino escurrimiento de los excesos eventualmente acumulados en superficie luego de lluvias intensas. En cada zona se parametriza el escurrimiento superficial según una adaptación del método de Warrilow y otros (1986), propuesto para este fin por Thomas y Henderson-Sellers (1991):

El coeficiente de drenaje (CE) será igual a 1 para terrenos perfectamente drenados, y se acercará a 0 en áreas sin drenaje. Las categorías intermedias de drenaje (regular, pobre, etc.) corresponderán a valores intermedios de CE. Los valores de “escurrimiento” asociadas a las cartas de suelo son cualitativos y se les asigna un valor cuantitativo entre 0 y 1 dependiendo de esta clasificación convencional.

La percolación disminuirá desde un valor máximo, cuando $ALM = CC$, y un valor nulo cuando el almacenaje sea menor que un umbral, determinado arbitrariamente como la mitad del agua útil máxima (diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez). La magnitud de la percolación dependerá de cada suelo, siendo menor cuanto mayor sea su contenido de arcilla. El coeficiente de percolación se determinó en cada caso según el modelo propuesto por Noilhan y Lacarrere (1995).

Para la realización del cálculo del balance hídrico descrito, las variables meteorológicas diarias utilizadas fueron valores diarios de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento, heliofanía (o en su defecto nubosidad) del periodo 1970 a la actualidad, aportados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Las estaciones para las que se generan escenarios a futuro del estado de las reservas se pueden ver en la Figura 1.

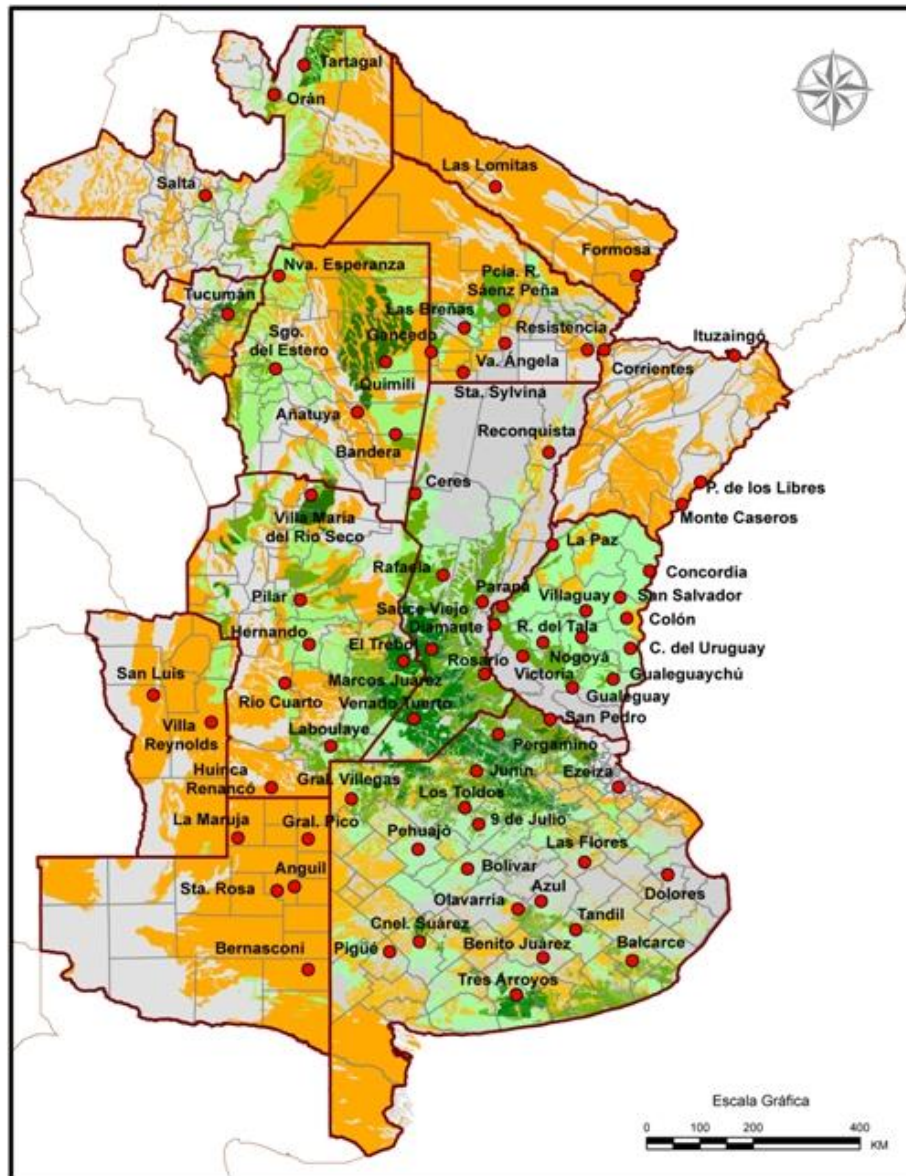


Figura 1: Estaciones meteorológicas utilizadas en la generación de escenarios a futuro de estado de las reservas hídricas para cultivos .

Los datos para el cálculo de los parámetros correspondientes a cada tipo de suelo fueron extraídos de cartas de suelo de INTA (Geo INTA, <http://inta.gob.ar/unidades/212000/geointa>) en escala 1:100.000 o 1:500.000, dependiendo de la disponibilidad de los mismos. De las cartas se obtuvo: tipo de escurrimiento, porcentaje de arcilla, limo, arena y materia orgánica, profundidad máxima de exploración radicular. Los valores de CC y PMP se calcularon según el método de Ritchie y en función de porcentajes de limo, arena, arcilla y materia orgánica.

La información acerca del cultivo modelado (fecha de siembra, fecha estimada de cosecha, duración aproximada de cada etapa fenológica, profundidad radicular en cada etapa fenológica, consumo hídrico en cada etapa fenológica, periodos críticos de susceptibilidad a sequía y excesos hídricos) fue aportado por expertos de INTA del Instituto de Clima y Agua y de distintas Estaciones Experimentación Agropecuaria (EEA) a través de encuestas específicas (sin publicar). Los cultivos evaluados dependen de la región geográfica.

- Escenarios a futuro

Para la determinación de escenarios a futuro se necesita una serie de datos históricos (tres o cuatro décadas), ya que para la producción de los mismos se realiza una generación sintética de series de precipitación diaria a 30 o 60 días del tipo Montecarlo (Vrugt et al. 2008; Husak et al. 2009), en base a las distintas distribuciones de precipitaciones para el período a evaluar.

La ocurrencia de precipitación se describe habitualmente mediante una cadena de Markov de primer orden (Chin, 1977; Conejo et al. 2001) y el monto de la precipitación, cuando se determina que esta ocurre, es descrita por una distribución gamma (Bruhn et al. 1980, entre otros). La determinación de la lluvia diaria, según una cadena de Markov de primer orden, implica la dependencia de la ocurrencia o no de precipitación el día anterior (estado previo), y la independencia de la historia previa. Se evalúa específicamente para un periodo de 30 días centrado en cada día del escenario a generar (Rajagopalan et al. 1996). La probabilidad de lluvia / no lluvia se describe como sigue:

$$\text{Prob (P}_i) = f (T_i, P_{i-1}, XU)$$

$$\text{Prob (R}_i) = f (T_i, XG)$$

Prob (P_i) = probabilidad de ocurrencia de lluvia el día i

T_i = periodo de 30 días centrado en el día i

XU = variable aleatoria con distribución uniforme

Prob (R_i) = probabilidad de un determinado monto o registro de lluvia el día i

XG = variable aleatoria de distribución gamma

En este modelo la ocurrencia de precipitación depende solamente de la ocurrencia o no de precipitación el día anterior y de la probabilidad XU, es decir, de la cantidad de casos en la serie estadística disponible para el periodo considerado en cada una de estas categorías:

P _{i-1} =0	P _i =0
P _{i-1} =0	P _i ≠0
P _{i-1} ≠0	P _i =0
P _{i-1} ≠0	P _i ≠0

Cuando se decide si llueve o no en un día posterior a uno con lluvia, la probabilidad de que llueva depende del monto de la lluvia del día anterior (feedback). Es decir, si R_{i-1} es un valor “alto”, habrá

mayor probabilidad de $P_i \neq 0$ que si R_{i-1} es “bajo” (García Guzmán et al. 1985). Puede obtenerse la probabilidad de ocurrencia de un día de lluvia posterior a un día con un milimetraje dado, o distintos intervalos de milimetrajes, pero las subdivisiones posibles dependen de la cantidad de eventos que pueden hallarse en cada intervalo en la serie histórica disponible.

Se compararon las frecuencias observadas y esperadas en tablas de contingencia a las cuales se le aplicó el test Chi Cuadrado (Feyerherm et al. 1965). Los resultados del test fueron diferentes según la localidad y la época del año. Se consideró que el tratamiento como cadena Markov es una buena primera aproximación para la mayor parte de las estaciones meteorológicas testeadas, y la consideración de órdenes superiores no arroja diferencias que justifiquen el esfuerzo computacional. Luego de varias pruebas, se determinó que para la serie de datos disponible la mejor opción resulta la división en lluvias diarias superiores al cuartil superior (CS) en la distribución gamma correspondiente. Se llega así a las siguientes categorías, cada una con su propia probabilidad de ocurrencia:

$P_{i-1}=0$	$P_i=0$
$P_{i-1}=0$	$P_i \neq 0$
$P_{i-1} < CS$	$P_i=0$
$P_{i-1} < CS$	$P_i \neq 0$
$P_{i-1} \geq CS$	$P_i=0$
$P_{i-1} \geq CS$	$P_i \neq 0$

Las ecuaciones correspondientes al modelo con feedback son ahora las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Prob}(P_i) &= f(T_i, P_{i-1}, R_{i-1}, XU) \quad (11) \\ \text{Prob}(R_i) &= f(T_i, XG) \end{aligned}$$

Se ve que la ocurrencia de lluvia el día i depende también del monto de la lluvia del día anterior.

Se generan así simulaciones de tipo Montecarlo (estocásticas) en base a las distintas distribuciones de precipitaciones para el período a evaluar, generando miles de casos posibles. Estas series de precipitación sintéticas alimentan al algoritmo de balance hídrico para dar como resultado miles de estados de humedad en el suelo al término del periodo T . El valor del almacenaje final obtenido en cada caso se expresa como porcentaje del agua útil máxima (AU) del suelo correspondiente.

Las situaciones se caracterizan según la reserva de agua al final del período a evaluar según el siguiente criterio:

- Déficit ($ALM < 0,25 AU$)
- Escasa ($0,25 < ALM < 0,5$)
- Regular ($0,5 < ALM < 0,75$)
- Adecuada ($ALM > 0,75$)
- Exceso ($EXC \neq 0$)

Se contabilizan las iteraciones de la simulación tipo Montecarlo que finalizaron en cada una de las categorías de reserva señaladas y se muestra una tabla de probabilidades, que ayuda al analista de riesgo a evaluar las posibilidades. Además, cada iteración es clasificada según las precipitaciones totales del período simulado en tres casos: escenario seco (primer quintil), normal (segundo a cuarto quintil) o húmedo (quintil superior). El sistema presenta una curva con el promedio para cada caso en el gráfico de almacenaje.

3) RESULTADOS

El resultado del balance diario en cada punto geográfico de seguimiento se visualiza en un gráfico que muestra la evolución del contenido de agua en el suelo (mm) a lo largo del ciclo del cultivo. La Figura 2 muestra la evolución de los almacenajes para maíz de siembra temprana en Tandil (Buenos Aires) durante la campaña 2013-2014, representado con una línea negra, desde la fecha de siembra (19/10) hasta casi dos meses después (15/12). En el gráfico se señalan los periodos más críticos a sequía (naranja) y a excesos hídricos (celeste) para este cultivo. Como se mencionó anteriormente, los periodos críticos para cada cultivo y región fueron aportados por expertos locales de INTA a través de encuestas.

También es posible comparar la evolución en la campaña en curso con los valores de almacenaje medios (1970-2010) y los valores mínimos extremos: los almacenajes normales son los que corresponden al límite superior del área verde, mientras que los mínimos históricos se ubican en el límite superior del área amarilla. Cuando se determinan excesos hídricos, los mismos son señalados en el día correspondiente con un punto azul (la ocurrencia, no su magnitud). En el ejemplo de la Figura 2, aparecen días con excesos hídricos en el mes posterior a la siembra. Estos gráficos pueden verse para distintos cultivos y localidades en la página www.ora.gov.ar.

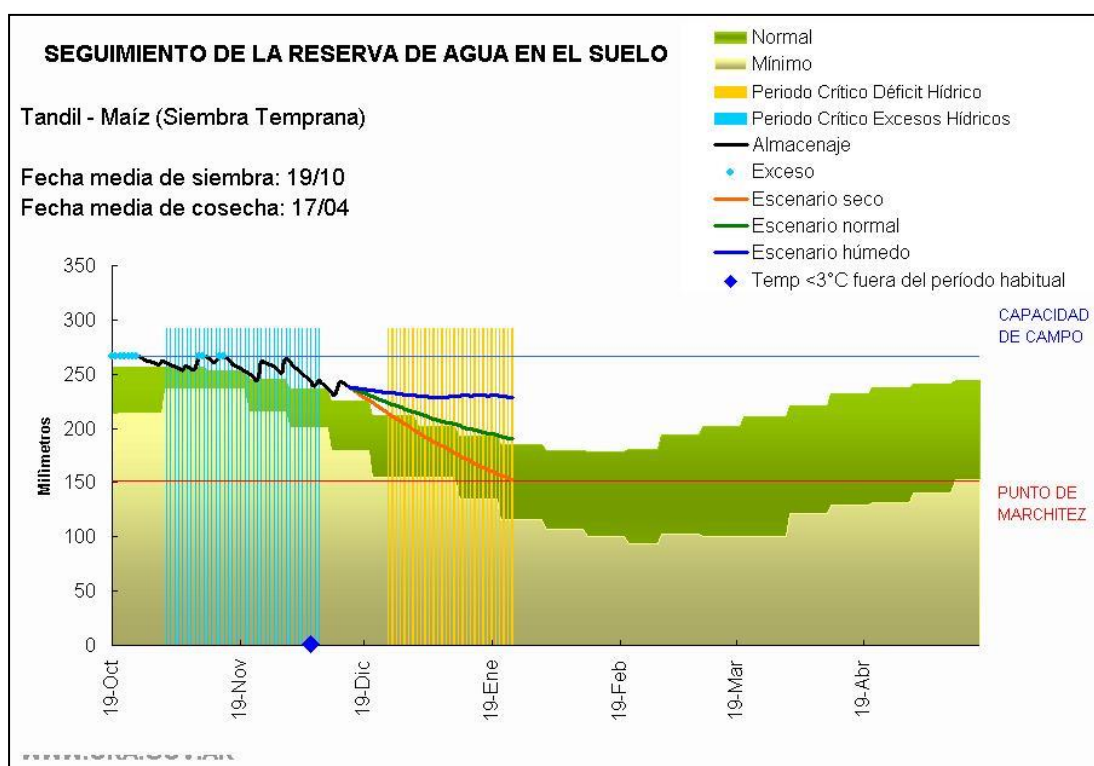


Figura 2: Seguimiento de las reservas hídricas profundas (línea negra) para maíz de siembra temprana en Tandil (Buenos Aires) en el inicio de la campaña 2013-2014, y escenarios a 40 días calculados a partir del 15/12/2013 (líneas azul, verde y roja).

En la misma Figura 2 se puede observar que la siembra de maíz temprano (19/10/13) se realizó eventualmente con reservas hídricas adecuadas o levemente excesivas. A partir de los primeros días de diciembre los almacenajes disminuyeron, producto de un mayor consumo y menos aporte de lluvias. Días antes del inicio del periodo crítico para déficit hídrico para este cultivo se realizó una estimación de escenarios a 40 días, hasta el final del período crítico de déficit. El fin fue evaluar la posibilidad

estadística de un mejoramiento de la situación hídrica en la zona para esa fecha o de un eventual déficit hídrico durante este período crucial para el rendimiento.

Los escenarios a futuro generados mediante simulación Montecarlo se grafican a partir del último día del seguimiento. La línea azul corresponde a un escenario húmedo (lluvias superiores a las normales, quintil superior), la línea roja corresponde a un escenario seco (lluvias inferiores a las normales, quintil inferior), y la línea verde representa un escenario de lluvias normales (situaciones intermedias, segundo a cuarto quintil). Se observa en la Figura 2 que con lluvias normales o abundantes se alcanzarían los valores normales o levemente superiores a estos de reserva para maíz en Tandil durante el periodo crítico a estrés hídrico. Si hubiera un escenario seco, la situación sería delicada para el cultivo, con la posibilidad de mermas en el rendimiento si se diera un estrés hídrico. El escenario previsto para el trimestre Dic 2013- Ene-Feb 2014 por el Servicio Meteorológico Nacional para la región eran precipitaciones normales y temperaturas normales a sobre lo normal.

La probabilidad estadística de distintas categorías de almacenaje al final del periodo simulado en los escenarios son consignadas por el modelo en una tabla de valores. Como ejemplo se muestra en la Tabla 1 los resultados correspondientes a los escenarios de la Figura 2. Como se ve, en este caso resulta altamente probable la amenaza de un periodo crítico con valores muy deficitarios (menos del 25% del agua útil). Esta información (escenarios y probabilidad de distintos estados futuros de las reservas) es de uso interno de la ORA (MAGyP) y no puede consultarse en la página citada.

Tabla 1: probabilidad asociada a distintos estados de humedad a la siembra de maíz en Nueve de Julio, 40 días antes de la siembra.

ESTADO DE LAS RESERVAS	PROBABILIDAD ESCENARIO SECO	PROBABILIDAD ESCENARIO NORMAL	PROBABILIDAD ESCENARIO HÚMEDO
Déficit	99 %	32 %	1 %
Escaso	1 %	50 %	15 %
Regular	0 %	17 %	47 %
Adecuada	0 %	1 %	34 %
Exceso	0 %	0 %	3 %

Entre mediados de diciembre de 2013 y de enero de 2014 el balance hídrico mostró una entrada al periodo crítico del maíz temprano en condiciones adecuadas a regulares, coincidentemente con lo estimado por el escenario seco. Hacia el final del período crítico la oferta de agua mejoró y los cultivos de soja de la zona tuvieron rendimientos normales. El rendimiento estimado para la campaña maicera analizada, en el departamento Tandil fue de unos 3400 kg/ha, aproximadamente, siendo el valor medio de los anteriores 5 años cercano a los 5700 kg/ha (SIIA – MAGyP, <http://www.sii.gov.ar/apps/siia/estimaciones/estima2.php>). Este nivel deficiente en los resultados locales pudieron preverse antes de la entrada al periodo crítico del cultivo y cuatro meses antes de la fecha media de cosecha.

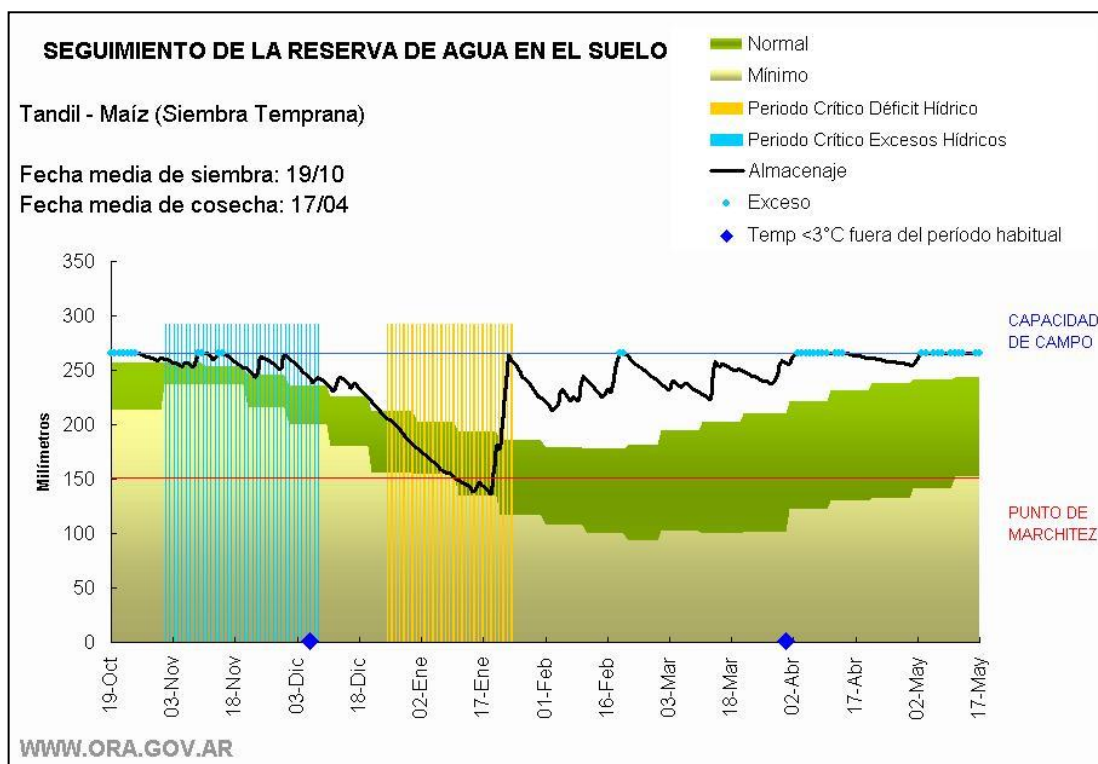


Figura 3: Seguimiento de las reservas hídricas profundas (línea negra) para trigo de siembra temprana en Tandil (Buenos Aires) en la campaña maicera 2013-2014.

4) DISCUSIÓN

El monitoreo del desarrollo de las condiciones hídricas para cada cultivo a lo largo de una campaña resulta de gran valor para la estimación de los resultados finales zonales y nacionales de producción de granos y forrajeras (ganadería). El seguimiento actualmente en funcionamiento se ha desarrollado de forma que pueda aprovechar toda la información disponible en los puntos en que ésta existe, y adaptarse a la información menos completa que puedan ofrecer otros puntos. Por ejemplo, en algunas estaciones meteorológicas no se dispone de heliofanógrafo; en ese caso la estimación de la ETP se realizó según una adaptación de la ecuación Penman-FAO que utiliza nubosidad (octavos de cielo cubierto) en vez de heliofanía (FAO, 1998). Incluso puede realizarse un seguimiento adecuado de puntos que disponen únicamente de pluviómetro, utilizando los datos locales de suelo y precipitación, y una estimación de la ETP que consiste en un ajuste sencillo del valor de ETP estimado en la localidad más cercana con información suficiente. Actualmente se trabaja en la extensión del área de cobertura del monitoreo, siendo el principal inconveniente la poca disponibilidad de información de suelos con detalle suficiente.

La posibilidad de generar escenarios a futuro permite adelantarse a los eventos perjudiciales que podrían devenir y sus consecuencias sobre los rindes. Existen diferentes grados de correlación “estado hídrico – rindes”, dependiendo del cultivo (Bergamaschi et al. 2006; Calviño et al. 2003; Sadras y Calviño, 2001; entre otros). A pesar de que la influencia de otros factores adversos afectan también los resultados –granizo o heladas tardías–, se puede inferir que si las condiciones hídricas serán inadecuadas en los periodos críticos, los rendimientos se verán reducidos en forma significativa.

5) REFERENCIAS

- Basualdo, A. y S. Occhiuzzi, 2005:** Balance hídrico aplicado a la elaboración de mapas de riesgo agroclimático. Buenos Aires, Argentina. 3-7 Octubre 2005. Actas del Congremet IX en CD. CONGREGMET IX.
- Bergamaschi, H.; G. Dalmago; F. Comiran; J. Bergonci, A. Müller, S. França, A. Santos, B. Radin, C. Menegassi Bianchi e P. Pereira, 2006:** Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.41, n.2, p.243-249, fev. 2006 243-249
- Bruhn J. A., Fry W. E. y Fick G. W., 1980.** Simulation of daily weather data using theoretical probability distributions. *J. Appl. Met.*, Volume 9, Issue 9, pp. 1029-1036.
- Calviño, P. A., F. H. Andrade and V. O. Sadras, 2003:** Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agronomy Journal*, VOL. 95, MARCH–APRIL 2003, p. 275-281
- Chin, Edwin H., 1977:** Modeling Daily Precipitation Occurrence Process With Markov Chain. *Water Resources Research*, VOL.13, NO. 6, DECEMBER 1977.
- Conejo, S., A. Morata y F. Valero, 2001:** First order Markov chain model and rainfall sequences in several stations of Spain. Detecting and modelling regional climate change. Part III: Regional climate variability patterns. M. B. India et al (eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001.
- FAO, 1998.** Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- FAO, 2012:** Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua – ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE Nro. 66, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Feyerherm A. M. y Dean Bark L., 1965.** Statistical Methods for persistent precipitation patterns. *J. Appl. Met.*, Volume 4, pp 320-328.
- Forte Lay, J. , Scarpati, O. , Spescha L. and A. Capriolo, 2007.** Drought risk in the pampean region using soil water storage analysis. *Environmental change and rational water use*. ISBN 978-987-9260-46-3. P.146-168. 458 páginas. Orientación Gráfica Editora SRL. Buenos Aires.
- Forte Lay, J. A., O. E. Scarpati and A. D. Capriolo, 2008.** "Precipitation variability and soil water content in pampean flatlands (Argentina)", *Geofísica Internacional*, vol. 47, no. 4, pp. 341–354.
- García Guzman A. y Torrez W., 1985.** Daily Rainfall Probabilities: Conditional upon Prio Occurrence and Amount of Rain. *J. Appl. Met.*, 24, pp 1009-1014.
- Husak, G., J. Michaelsen, P. Kyriakidis, J. Verdin, C. Funk and G. Galu, 2009:** The Forecast Interpretation Tool – a Monte Carlo technique for blending climatic distributions with probabilistic forecasts. *International Journal of Climatology*. Int. J. Climatol. (2009) Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/joc.2074
- IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2008:** El cambio climático y el agua: Documento técnico VI del IPCC.– Sección c.4: El cambio climático y los recursos hídricos, por sistemas y sectores Autor: https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/ccw%20sp/chapter_4_sp.pdf
- Noilhan J. and P. Lacarrere, 1995:** GCM grid-scale evaporation from mesoscale modelling. *J. Climate*, 8, 206-223.
- Rajagopalan, B., U. Lall and D. Tarboton, 1996:** Nonhomogeneous Markov model for daily precipitation. *Journal of Hydrplogic Engineering*, January 1996.
- Ritchie, J.T; L. F. Ratliff and D. K. Cassel. 1987.** Soil laboratory data, field descriptions and field measuring soil water limits for soils of the united States. *Agr. Soil Survey. Technical Bulletin*. USDA.
- Sadras, V. O. and P. A. Calviño, 2001:** Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. *Agronomy Journal*, VOL. 93, MAY–JUNE 2001, p. 577-583
- Schlosser C. A. and P. C. D. Milly, 2002:** A Model-Based Investigation of Soil Moisture Predictability and Associated Climate Predictability. *Journal of Hydrometeorology*. AUGUST 2002, p.483-501

SIIA: Sistema Integrado de Información Agropecuaria

<http://www.siiia.gov.ar/apps/siiia/estimaciones>

Thomas G. y A. Henderson-Sellers (1991): An evaluation of proposed representations of subgrid hydrologic processes in climate models. Journal of Climate, Vol. 4, 898-910.

Vrugt J. A., C. ter Braak, M. Clark, J. Hyman and B. Robinson, 2008: Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. Water Resources Reserch, VOL. 44, W00B09, doi:10.1029/2007WR006720, 2008

Warrilow, D.; A. Sangster y A. Silingo, 1986: Modelling of land-surface processes and their influence on European climate. DCTN 38, Bracknell, Berkshire, 92 pp.

Xing Yuan; Eric F. Wood; Lifeng Luo and Ming Pan, 2011: A first look at Climate Forecast System version 2 (CFSv2) for hydrological seasonal prediction. Geophysical Research Letters, VOL. 38, L13402, doi:10.1029/2011GL047792, 2011

Datos de Contacto:

Sandra Occhiuzzi, Av Paseo Colón 922 (1063) – Buenos Aires - Argentina - Te: 54-11-4349 2073

adrianabasualdo@fibertel.com.ar

socchi@minagri.gob.ar