BALANCE HIDROLÓGICO OPERATIVO PARA EL AGRO Versión estudiantil (BHOAe)

María E. Fernández-Long[1]; Rafael H. Hurtado[2]; Silvia Pérez[1] y Liliana Spescha[1]

[1]Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Departamento de Recursos Naturales y Ambiente. Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Av. San Martín 4453 (C1417DSE), Buenos Aires, Argentina
[2]Universidad Nacional de Jujuy. Facultad de Ciencias Agrarias. Cátedra de Agroclimatología
E-mail: flong@agro.uba.ar

Recibido: 27/11/2018
Aceptado: 17/05/2019

RESUMEN

Conocer el contenido de agua del suelo es de vital importancia para numerosas actividades, como la agricultura, la ganadería y la ecología. Este conocimiento se trasmite en varias materias de las carreras relacionadas con el ambiente y el agro. En la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA) se desarrolló en el 2012 un modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA) que permite, entre otras cosas, cuantificar el agua almacenada en el suelo y disponible para las plantas. El objetivo de este trabajo fue presentar una versión simplificada del modelo para uso docente, posibilitando que los alumnos analicen los resultados con una mayor y más fácil comprensión de la dinámica del agua del suelo. El modelo fue desarrollado sobre una planilla de Microsoft Excel, diseñada en nueve hojas. La misma es de uso libre y se encontrará disponible en la página web del Centro de Información Agroclimática (CIAg) de la FAUBA (www.agro.uba.ar/centros/ciag/servicios), y en la de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Jujuy (FCA-UNJu).

Palabras clave: agua del suelo, docencia, tecnologías de la información y la comunicación (TICs)

OPERATIONAL WATER BALANCE MODEL FOR AGRICULTURE Student Version (BHOAe)

SUMMARY

Soil moisture content has paramount importance for many activities, such as agriculture, livestock and ecology. This knowledge is taught in several subject-matters related to the environment and agriculture. An Operational Water Balance Model for Agriculture (OWBM) that allows quantifying the water stored in the soil and available for plants was developed at the School of Agronomy of the University of Buenos Aires (FAUBA) in 2012. The aim of this paper was to present a simplified version of the model for teaching use, allowing students to analyze the results with a greater and easier understanding of soil water dynamic. The model was developed on a Microsoft Excel spreadsheet, designed in nine sheets. It is free to use and is available on the web page of the Agroclimatic Information Center (CIAg) of the FAUBA (www.agro.uba.ar/centros/ciag/servicios), and on the website of the School of Agricultural Sciences of the National University of Jujuy (FCA-UNJu).

Key words: soil moisture, teaching, information and communication technologies (ICTs)

INTRODUCCIÓN

Conocer el contenido de agua del suelo es de vital importancia para numerosas actividades; siendo sus más claras aplicaciones la agricultura, la ganadería y la ecología. El sector agropecuario utiliza más de las dos terceras partes del agua que proporcionan los ríos, lagos y acuíferos del planeta. En la Argentina, el 61% del territorio nacional se encuentra bajo condiciones de aridez y semiaridez, lo que enfatiza la importancia de una gestión integrada y sustentable de los recursos hídricos (Calcagno *et al.*, 2000). La contribución de agua edáfica en los sub-períodos críticos de mayor actividad vegetativa es el principal factor bioclimático en el rendimiento cuantitativo de los cultivos de grano (Pascale y Damario, 2004; Dardanelli *et al.*, 2010); así como en la determinación de los tipos climáticos (Thornthwaite, 1948). De allí, la importancia de optimizar el uso de este recurso cada vez más valioso. Su evaluación cuantitativa constituye una herramienta fundamental para comprender las interacciones entre el clima y el suelo, y establecer pautas de manejo que optimicen su uso.

El conocimiento sobre la disponibilidad de agua del suelo ha sido motivo de estudio desde los comienzos de la Agrometeorología (De Martonne, 1926; Thornthwaite y Mather, 1955). La cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA) ha sido pionera en este tema. Burgos (1952), Burgos y Corsi (1970), Burgos y Forte Lay (1978) realizaron estudios para la región pampeana y el nordeste de nuestro país, utilizando la metodología del Balance Hidrológico Climático (BHC) de Thornthwaite (1948). Años después, Pascale y Damario (1977) desarrollaron el balance hidrológico seriado (BHS) mensual sobre la base de este modelo. Hurtado *et al.* (2002, 2009) y Fernández Long *et al.* (2005) idearon un software en entorno *delphi* para el cálculo de BHC que brinda al usuario un rápido manejo de los resultados para diferentes localidades. En el 2012, Fernández Long *et al.* (2012) desarrollaron un modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA), que fue luego presentado y discutido frente al grupo de expertos de la "Evaluación conjunta de indicadores de humedad del suelo (JASMIN, por su sigla en inglés) para el sureste de América del Sur"; y publicado en la documentación de los distintos productos y métodos empleados actualmente para estimar la humedad del suelo (Basualdo *et al.,* 2017). Este modelo se elaboró con la finalidad de proporcionar una herramienta de decisión objetiva y en tiempo real para los tomadores de decisión del sector agrícola; así como la de generar una base de datos de agua en el suelo disponible para la comunidad científica y educativa. Esta herramienta es utilizada hoy en día por instituciones tales como el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, https://bit.ly/2pJOATS) para brindar información a los distintos actores del sector agropecuario que necesitan información de la humedad del suelo presente en cada momento, para la planificación de acciones y estrategias.

Por su importancia, este tema está presente en varias de las materias que se dictan en carreras relacionadas con el ambiente y el sector agropecuario. En la actualidad, en la FAUBA todos los alumnos que cursan las materias de grado correspondientes a la carrera de Agronomía y de la Licenciatura en Ciencias Ambientales tienen como uno de los temas principales el Balance de agua del suelo, lo que conlleva al alumno a incorporar conocimientos de los procesos matemáticos y físicos de innumerables cálculos necesarios para arribar a los primeros resultados. La base de conocimiento teórico y la literatura previa a los trabajos prácticos sobre el tema, hacen que el procedimiento matemático se pueda automatizar y hacer hincapié en el funcionamiento del sistema climático, y de ese modo llegar a un análisis integral del problema.

En el seno de la enseñanza universitaria, las posibilidades de comunicación didáctica mediatizada a través de los entornos virtuales de enseñanza y aprendizaje son objeto de un creciente interés (Fandos Garrido *et al.,* 2002; Litwin, 2002; Waldegg Casanova, 2002; Gutiérrez *et al.,* 2003; Nifle, 2004; Florio, 2017 a y b; Pérez *et al.*, 2018). El uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y la disponibilidad actual de los alumnos de celulares capaces de ver y editar hojas de cálculo, llevó a los docentes e investigadores de la Cátedra de Climatología de la FAUBA a incorporar nuevas herramientas que permitan un mejor aprovechamiento del tiempo en clase (Hurtado *et al.*, 2007; Barberis *et al.,* 2009; Fernández Long *et al.*, 2009; Fernández Long *et al.*, 2016), ya que la tecnología puede estar al alcance de todos pero es necesaria una educación adecuada para poder utilizarla. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue elaborar una versión simplificada del modelo BHOA, denominado BHOAe con la finalidad de que el alumno pueda analizar los resultados y sus consecuencias, sin quedarse en la etapa previa del cálculo. El mismo es de uso libre y se encontrará disponible en la página web del Centro de Información Agroclimática (CIAg) de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA) (www.agro.uba.ar/centros/ciag/servicios), y en la web de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Jujuy (FCA-UNJu).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este modelo fue desarrollado sobre una planilla de Microsoft Excel, diseñada en nueve hojas. En la primera hoja (Figura 1), se presentan los títulos y un breve índice de las hojas con la descripción de cada una de ellas; mientras que en la segunda (Figura 2) se deben ingresar los datos necesarios para el cálculo del balance hidrológico. El modelo no acepta datos faltantes, por eso es necesario ingresar con series de datos completas.

La escala de trabajo del modelo es diaria y permite calcular una serie temporal de hasta 10 años; para lo cual es necesario ingresar: datos diarios de precipitación (PP) y de evapotranspiración potencial (ETP, calculada con la metodología elegida por el usuario), capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM) y un valor de almacenaje inicial; todos los datos en milímetros. Cuando no se tiene el dato de almacenaje inicial, se sugiere in-

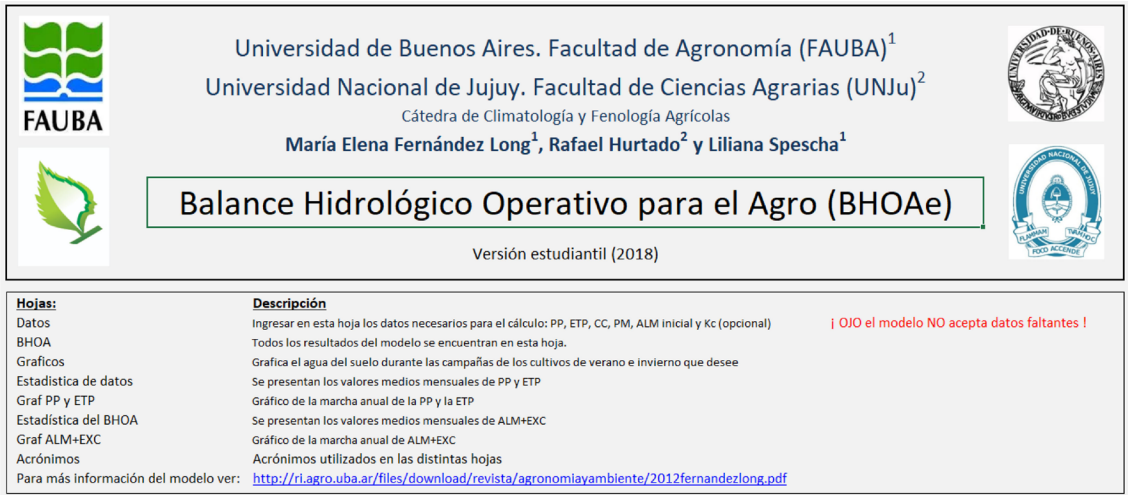


Figura 1. Primera hoja de la planilla de cálculo, en la que se encuentran los títulos y un breve índice.

gresar con la mitad de CC como valor inicial y luego desechar del análisis de los resultados todos los valores hasta el primer día que se haya alcanzado la CC. El modelo permite además ingresar el coeficiente de cultivo (Kc), valor que, si no se tiene, puede ser extraído del manual 56 de la FAO (Allen *et al.,* 2006) o bien dejar el valor que se encuentra grabado por defecto.

En la hoja siguiente (Figura 3) se muestran los resultados del modelo día por día. Las tres primeras columnas corresponden a la fecha (año, mes y día), las tres columnas siguientes corresponden a los datos de PP, ETP y coeficiente del cultivo (Kc). Y a partir de la séptima columna se exponen los resultados: evapotranspiración potencial del cultivo (ETc) calculado a partir de la ecuación (1), déficit potencial (DP) con la ecuación (2), almacenaje (ALM) con las ecuaciones (3a) y (3b), evapotranspiración real (ETR) con las ecuaciones (4a) y (4b), déficits (DEF) con la ecuación (5), excesos (EXC) con la ecuación (6), situación hídrica (SH) con la ecuación (7), agua útil (AU) con la ecuación (8) y los almacenajes más los excesos (Alm+Exc).

$$ETc = ETP \times Kc \quad (1)$$

$$DP = PP - ETc \quad (2)$$

El cálculo del ALM varía en función del signo del DP. Cuando el DP es positivo, se considera que toda el agua precipitada ingresa al suelo quedando:

$$ALM_t = ALM_{t-1} + DP \quad (3a)$$

Si DP es negativo, entonces:

$$ALM_t = ALM_{t-1}\ e^{DP/CCD} \quad (3b)$$

Dónde

$$CCD = CC - ELD$$

ELD es un límite de desecamiento que hace que el suelo no se seque nunca más allá de ese umbral, eliminando la limitación que presentaba el modelo de Thornthwaite y Mather (1955) que consideraba que el almacenaje podía llegar a cero. ELD se calcula a partir de la variable LD (variable adimensional) como:

$$LD = \left(\frac{PM}{CC} - 0\ 4\right)2,5$$

Si:

$$si \begin{cases} LD < 0 & LD = 0 \\ 0 \le LD \le 1 & LD = LD \\ LD > 1 & LD = 1 \end{cases}$$

Entonces:

$$ELD = LD' \times PM$$

Luego se calcula la variación de almacenaje (ΔAlm) como:

$$ALM = ALM_t - ALM_{t-1}$$

Cuando ΔAlm es negativo indica que el suelo se está secando, y esa cantidad de agua se pierde a través de la evapotranspiración, por lo tanto:

$$ETR = |ALM| + PP \quad (4a)$$

En cambio, cuando el ΔAlm es positivo indica que el suelo se está recargando. En estos casos la ETR va a ser igual a la ETP debido a que el suelo tiene suficiente agua para evapotranspirar lo que la atmósfera demanda y, lo que resta se almacena en el suelo, entonces:

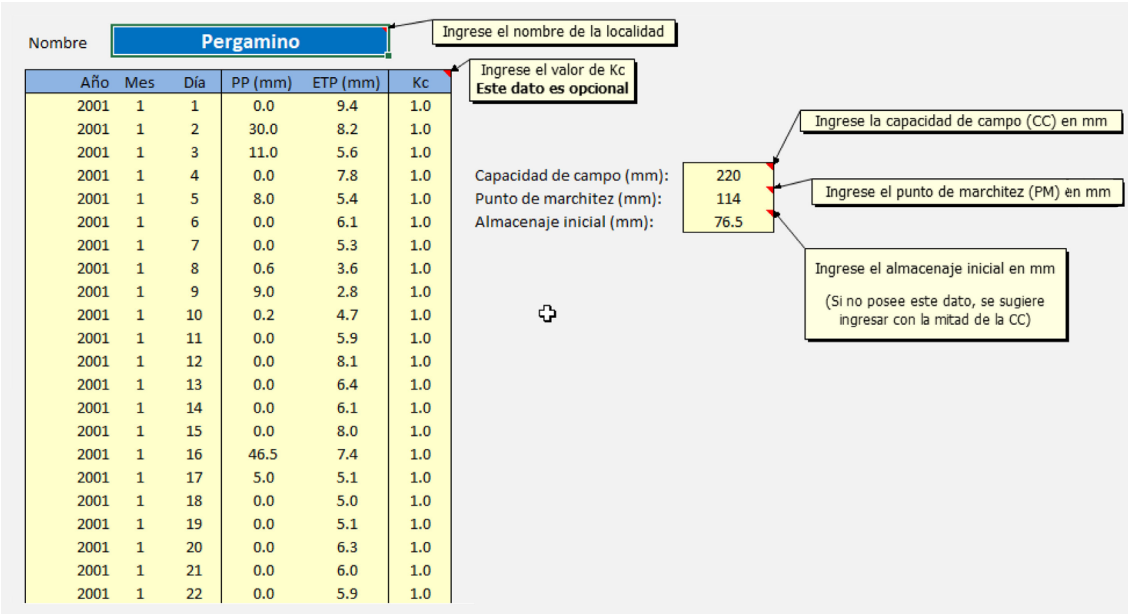
$$ETR = ETP \quad (4b)$$

Cuando la ETR es menor que la ETP se considera que las plantas comienzan a sufrir un estrés hídrico, por lo tanto, se calcula el DEF como:

$$DEF = ETP - ETR \quad (5)$$

Cuando el *ALM* supera la CC se considera que el agua restante no puede permanecer en el suelo, por lo tanto, escurre, tanto superficialmente como en profundidad. A esa cantidad de agua se la llama exceso, y se la calcula como:

$$EXC = ALM_{t-1} + DP - CC \quad (6)$$



Año	Mes	Día	PP (mm)	ETP (mm)	Kc
2001	1	1	0.0	9.4	1.0
2001	1	2	30.0	8.2	1.0
2001	1	3	11.0	5.6	1.0
2001	1	4	0.0	7.8	1.0
2001	1	5	8.0	5.4	1.0
2001	1	6	0.0	6.1	1.0
2001	1	7	0.0	5.3	1.0
2001	1	8	0.6	3.6	1.0
2001	1	9	9.0	2.8	1.0
2001	1	10	0.2	4.7	1.0
2001	1	11	0.0	5.9	1.0
2001	1	12	0.0	8.1	1.0
2001	1	13	0.0	6.4	1.0
2001	1	14	0.0	6.1	1.0
2001	1	15	0.0	8.0	1.0
2001	1	16	46.5	7.4	1.0
2001	1	17	5.0	5.1	1.0
2001	1	18	0.0	5.0	1.0
2001	1	19	0.0	5.1	1.0
2001	1	20	0.0	6.3	1.0
2001	1	21	0.0	6.0	1.0
2001	1	22	0.0	5.9	1.0

Figura 2. Segunda hoja de la planilla de cálculo, hoja de ingreso de datos. En esta hoja se ingresan los datos requeridos para la estimación del balance, indicando en cada celda la variable y las unidades.

BALANCE HIDROLOGICO OPERATIVO PARA EL AGRO (BHOAe)

(Versión estudiantil)

María Elena Fernández Long, Rafael Hurtado y Liliana Spescha (2018)

LOCALIDAD: **Pergamino**

AÑO	MES	DIA	PP	ETP	Kc	ETc	DP	ALM	ETR	DEF	EXC	SH	AU	Alm+Exc
2001	1	1	0	9.4	1.0	9.4	-9.4	74	2.1	7.3	0.0	-7.3	0	74
2001	1	2	30	8.2	1.0	8.2	21.8	96	8.2	0.0	0.0	0.0	0	96
2001	1	3	11	5.6	1.0	5.6	5.4	102	5.6	0.0	0.0	0.0	0	102
2001	1	4	0	7.8	1.0	7.8	-7.8	99	2.8	5.0	0.0	-5.0	0	99
2001	1	5	8	5.4	1.0	5.4	2.6	101	5.4	0.0	0.0	0.0	0	101
2001	1	6	0	6.1	1.0	6.1	-6.1	99	2.2	3.9	0.0	-3.9	0	99
2001	1	7	0	5.3	1.0	5.3	-5.3	97	1.8	3.5	0.0	-3.5	0	97
2001	1	8	0.6	3.6	1.0	3.6	-3	96	1.6	2.0	0.0	-2.0	0	96
2001	1	9	9	2.8	1.0	2.8	6.2	103	2.8	0.0	0.0	0.0	0	103
2001	1	10	0.2	4.7	1.0	4.7	-4.5	101	1.8	2.9	0.0	-2.9	0	101
2001	1	11	0	5.9	1.0	5.9	-5.9	99	2.1	3.8	0.0	-3.8	0	99
2001	1	12	0	8.1	1.0	8.1	-8.1	96	2.8	5.3	0.0	-5.3	0	96
2001	1	13	0	6.4	1.0	6.4	-6.4	94	2.1	4.3	0.0	-4.3	0	94
2001	1	14	0	6.1	1.0	6.1	-6.1	92	1.9	4.2	0.0	-4.2	0	92
2001	1	15	0	8	1.0	8	-8	90	2.5	5.5	0.0	-5.5	0	90
2001	1	16	46.5	7.4	1.0	7.4	39.1	129	7.4	0.0	0.0	0.0	15	129
2001	1	17	5	5.1	1.0	5.1	-0.1	129	5.1	0.0	0.0	0.0	15	129
2001	1	18	0	5	1.0	5	-5	126	2.5	2.5	0.0	-2.5	12	126
2001	1	19	0	5.1	1.0	5.1	-5.1	124	2.5	2.6	0.0	-2.6	10	124

Figura 3. Tercera hoja de la planilla de cálculo, denominada BHOA. En esta hoja se muestran los datos en las primeras columnas y luego los resultados del modelo día por día.

La SH es una combinación de los déficits y los excesos en una misma variable, calculada a partir de:

$$si \begin{cases} DEF > 0 & SH = DEF \times (-1) \\ DEF = 0 & SH = 0 \\ EXC > 0 & SH = EXC \end{cases} \quad (7)$$

El AU es considerada como la cantidad de agua almacenada en el suelo menos el PM, debido a que por debajo de ese valor las plantas ya no pueden extraer más agua. Por lo tanto:

$$AU = ALM - PM \quad (8)$$

Por último, en la hoja denominada "Acrónimos" se presenta la lista de los acrónimos utilizados (Figura 4)

ACRÓNIMOS	
PP	Precipitación
ETP	Evapotranspiración Potencial
CC	Capacidad de Campo
PM	Punto de Marchitez permanente
Kc	Coeficiente de cultivo
ETc	Evapotranspiración del cultivo
DP	Déficit Potencial
ALM	Almacenaje de agua del suelo
ETR	Evapotranspiración Real
DEF	Déficit
EXC	Excesos
SH	Situación Hídirca
AU	Agua útil
Alm+Exc	Almacenajes más excesos

Figura 4. Cuarta hoja de la planilla de cálculo, u hoja de Acrónimos, en la que se expresa cada concepto utilizado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la cuarta hoja y hasta la octava, se presentan los resultados en forma de tablas y gráficos. Si bien el usuario puede utilizar la información para hacer sus propios gráficos, en la hoja denominada "Gráficos" se muestra por defecto la evolución del agua del suelo para los cultivos de verano (campaña gruesa) e invierno (campaña fina) para una campaña determinada; la que puede ser modificada cambiando el año en la celda correspondiente (Figura 5a y 5b). Estos gráficos dan a los alumnos la posibilidad de visualizar la evolución del almacenaje del agua en el suelo en distintas campañas y, por ejemplo, modificar la capacidad de campo o el coeficiente de marchitez y en forma rápida y fácil analizar el impacto de estos coeficientes sobre la dinámica del agua del suelo. Es por ello que este modelo puede ser una herramienta útil para los docentes brindando la posibilidad de realizar trabajos prácticos basados en el análisis de los resultados a partir de simples cambios en los datos de entrada, y la posterior discusión de los resultados obtenidos, sin que esto se traduzca en una pérdida de tiempo en la realización de los cálculos necesarios.

En la hoja denominada "Estadística de datos" se presentan los datos mensuales y anual de PP y ETP con el valor promedio del período analizado. Además, se muestran los promedios mensuales y el máximo valor diario observado de cada variable (Figura 6). Con estos datos, en la hoja "Graf PP y ETP", se exponen los gráficos de la marcha anual de ambas variables, donde puede verse el régimen de PP y su relación con la ETP. En este ejemplo (Figura 7), en los meses de noviembre, diciembre y enero la PP media mensual es mucho menor que la ETP media mensual, mientras que en febrero y octubre se registran dos máximos de PP que llegan a casi igualar a la ETP. Sólo en el mes de julio la PP supera a la ETP.

La climatología del agua del suelo se presenta en la hoja denominada "Estadística del BHOA" a partir de dos variables de salida del modelo (Figura 8). Al igual que con la PP y la ETP, se presentan los valores mensuales de dos variables de salida del modelo combinadas: almacenaje más exceso (ALM+EXC), y el índice de satisfacción hídrica (ISHi). El modelo BHOA considera que una vez alcanzada la CC, si sigue lloviendo, el agua se pierde por percolación ya que el suelo no puede retener más agua debi-

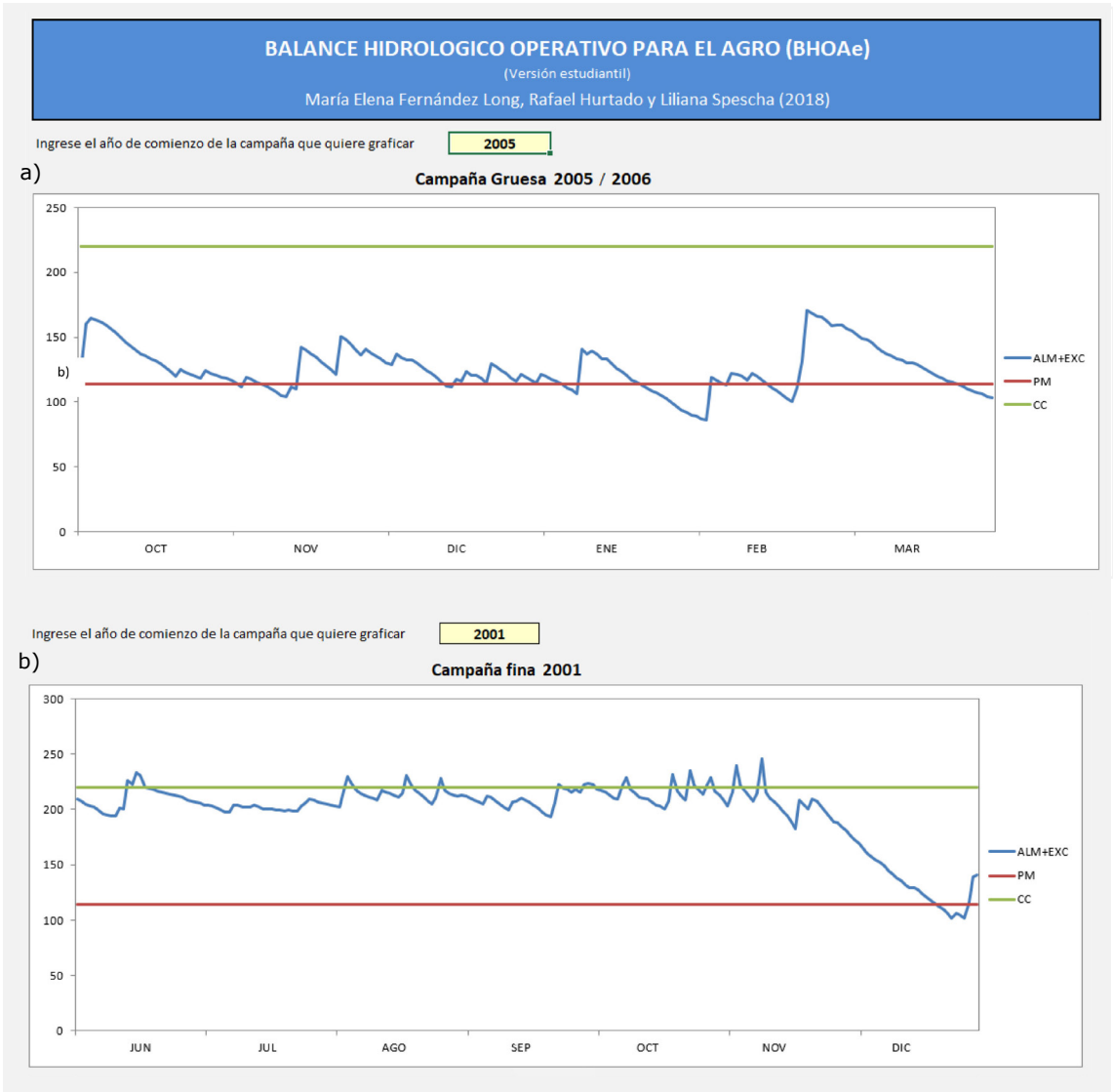


Figura 5. Hoja de Gráficos. Por defecto, a partir de los datos ingresados el modelo muestra la evolución del agua del suelo para los cultivos de verano (campaña gruesa) (a) y para los cultivos de invierno (campaña fina) (b). Se muestran los datos de la campaña gruesa 2005/2006 (a) y de la campaña fina 2001 (b).

do al supuesto de que no existe anegamiento (Fernández Long *et al.*, 2012). Por lo tanto, la variable ALM+EXC da una idea no sólo del almacenaje, sino también de los excesos que podrían llevar al anegamiento de los suelos.

El ISHi es calculado como:

$$ISHi = \frac{\sum_{1}^{n} ETR / ETP}{n} \qquad (9)$$

Dónde *n* es el número de días del mes. Este índice fue utilizado por Fernández Long y otros (2012) para validar el modelo BHOA debido a su similitud con el WRSI (Water Requirement Satisfaction Index), índice propuesto por la FAO para relacionarlo con la producción de los cultivos a través de una función lineal y calculado con la sumatoria durante el ciclo ontogénico del cultivo (Doorenbos y Pruitt 1977; Frère y Popov,

PP	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2001	135.1	120.3	70.9	184.5	90.8	64.2	30.3	95.5	82.6	123.9	144.2	70.0	**1212.3**
2002	91.8	93.0	101.4	95.9	61.2	17.0	60.6	136.8	49.9	111.4	214.7	40.3	**1074.0**
2003	32.2	67.5	33.4	28.8	36.4	10.4	43.2	35.9	39.6	141.8	68.9	106.7	**644.8**
2004	41.6	80.8	54.0	109.2	4.3	18.3	78.3	60.6	68.9	114.0	62.0	141.2	**833.2**
2005	84.3	247.0	33.0	8.8	8.8	13.6	29.8	39.2	57.8	63.2	109.0	75.3	**769.8**
2006	65.6	142.4	17.1	41.1	0.8	18.6	48.6	5.8	34.5	179.1	15.9	124.0	**693.5**
2007	27.9	117.1	89.8	62.0	45.8	1.8	2.9	1.9	159.1	107.8	44.7	17.3	**678.1**
2008	56.9	137.2	130.1	29.4	21.3	30.8	39.4	21.0	37.4	30.0	21.4	39.9	**594.8**
2009	51.5	42.3	129.3	28.8	50.3	54.8	40.2	3.7	45.8	60.8	81.9	61.2	**650.6**
2010	66.5	284.4	85.0	25.3	50.4	42.9	90.0	6.4	61.0	98.2	146.7	50.1	**1006.9**
Promedio	65.3	133.2	74.4	61.4	37.0	27.2	46.3	40.7	63.7	103.0	90.9	72.6	**815.8**

Máximo de PP diaria observada	93.0

ETP	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2001	189.8	177.7	112.0	73.3	37.4	39.9	33.8	53.6	70.7	81.1	140.3	181.7	**1191.3**
2002	180.2	150.9	107.3	69.6	48.0	38.5	37.6	48.5	69.5	111.8	135.1	182.2	**1179.2**
2003	217.8	152.2	134.4	71.9	54.8	42.7	49.3	57.8	89.9	127.7	149.5	193.6	**1341.6**
2004	197.6	140.2	144.3	77.1	41.2	46.8	47.2	50.2	85.1	112.4	120.5	175.3	**1237.9**
2005	195.1	127.4	127.4	91.1	66.8	33.4	37.4	55.5	81.5	123.4	158.4	161.8	**1259.2**
2006	180.5	135.2	126.3	87.0	48.8	39.0	49.5	65.8	92.9	111.9	171.3	202.8	**1311.0**
2007	199.2	144.2	104.7	77.8	44.9	43.2	56.5	62.9	80.5	117.1	157.9	245.5	**1334.4**
2008	204.6	142.9	104.4	99.1	58.3	40.4	37.5	73.7	77.8	140.5	209.3	210.1	**1398.6**
2009	230.9	168.0	131.1	107.2	65.7	43.5	45.0	88.0	77.8	144.8	179.6	198.5	**1480.1**
2010	237.3	133.8	105.7	86.0	50.0	42.8	36.5	70.2	80.5	117.5	139.8	241.8	**1341.9**
Promedio	203.3	147.3	119.8	84.0	51.6	41.0	43.0	62.6	80.6	118.8	156.2	199.3	**1307.5**

Máximo de ETP diaria observada	12.7

Figura 6. Estadística de los datos de precipitación (PP) y evapotranspiración potencial (ETP).

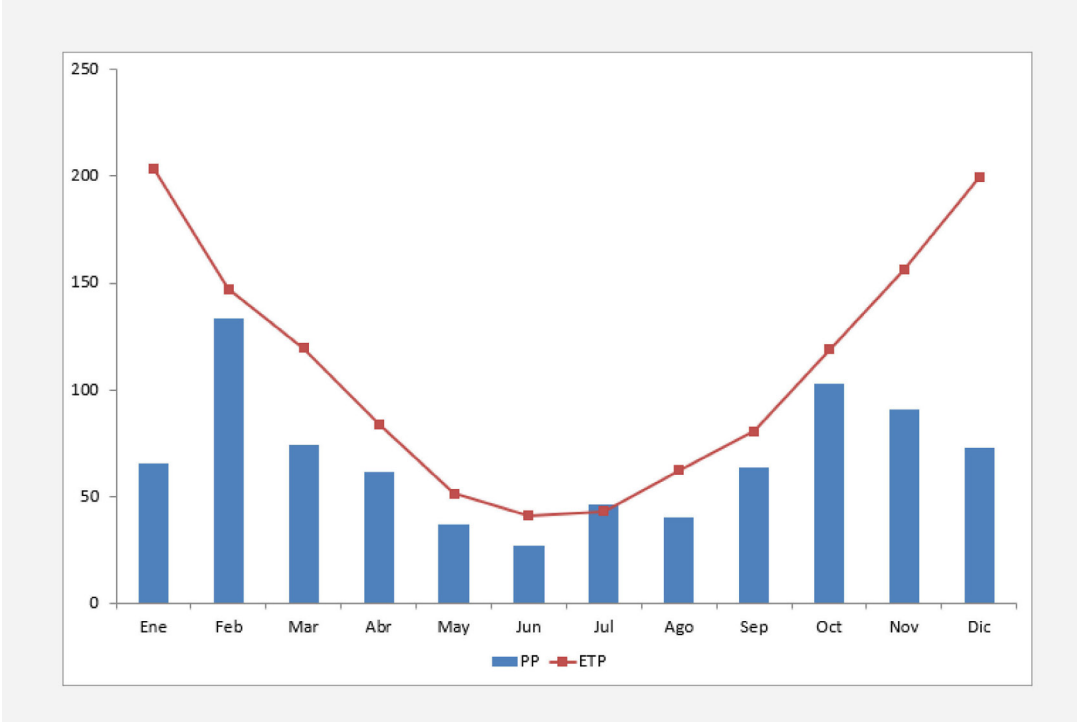


Figura 7. Marcha anual de la precipitación (PP) y la evapotranspiración potencial (ETP).

ALM+EXC	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2001	105.5	100.8	156.3	184.4	217.2	210.1	202.3	214.7	209.0	215.5	205.0	133.9	**179.5**
2002	123.4	116.5	154.0	193.6	200.5	203.6	209.2	209.1	210.2	202.9	202.2	129.4	**179.5**
2003	89.5	69.2	73.9	68.0	81.1	84.3	87.1	123.4	108.1	159.9	150.7	125.3	**101.7**
2004	88.8	107.0	86.5	130.3	142.9	128.4	135.5	186.3	191.1	191.7	164.1	179.8	**144.4**
2005	129.4	178.3	158.4	118.0	91.9	84.6	90.2	102.7	102.1	135.1	125.9	122.5	**119.9**
2006	115.7	122.7	128.4	103.4	96.2	92.2	93.8	109.7	101.2	162.1	137.9	120.9	**115.4**
2007	81.5	95.2	151.9	154.1	166.2	154.1	127.5	105.0	166.5	197.7	138.7	79.2	**134.8**
2008	52.4	86.7	185.5	151.7	124.1	134.4	140.7	136.7	113.8	106.2	70.9	53.8	**113.1**
2009	53.3	61.1	118.0	105.3	97.5	115.9	145.5	133.5	112.5	119.6	98.8	92.9	**104.5**
2010	77.5	172.5	180.9	174.7	153.4	177.7	211.6	180.2	163.1	139.2	204.1	124.3	**163.3**
Promedio	91.7	111.0	139.4	138.4	137.1	138.5	144.3	150.1	147.8	163.0	149.8	116.2	**135.6**

Máximo de ALM+EXC diario estimado	299.3

ISHi	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2001	0.53	0.41	0.74	0.78	0.98	0.94	0.94	0.97	0.95	0.97	0.92	0.61	**0.81**
2002	0.62	0.49	0.71	0.88	0.89	0.93	0.95	0.92	0.95	0.92	0.88	0.56	**0.81**
2003	0.33	0.35	0.32	0.38	0.31	0.33	0.36	0.55	0.49	0.75	0.64	0.60	**0.45**
2004	0.39	0.49	0.39	0.62	0.63	0.56	0.64	0.88	0.85	0.87	0.76	0.80	**0.66**
2005	0.62	0.81	0.74	0.51	0.40	0.43	0.46	0.51	0.48	0.59	0.58	0.58	**0.56**
2006	0.50	0.55	0.57	0.45	0.35	0.43	0.38	0.45	0.42	0.76	0.59	0.58	**0.50**
2007	0.33	0.38	0.67	0.70	0.77	0.66	0.51	0.39	0.73	0.87	0.62	0.29	**0.58**
2008	0.23	0.47	0.88	0.68	0.55	0.62	0.64	0.60	0.47	0.46	0.27	0.20	**0.51**
2009	0.22	0.25	0.58	0.44	0.42	0.47	0.66	0.55	0.54	0.52	0.44	0.42	**0.46**
2010	0.32	0.81	0.83	0.77	0.69	0.79	0.96	0.78	0.75	0.63	0.93	0.55	**0.73**
Promedio	0.41	0.50	0.64	0.62	0.60	0.62	0.65	0.66	0.66	0.73	0.66	0.52	**0.61**

Figura 8. Hoja "Estadística del BHOA", en la que se encuentra la climatología de dos de las variables resultado del modelo: almacenaje más excesos (ALM+EXC) e índice de satisfacción hídrica (ISHi).

1979; 1986). El WRSI también ha sido utilizado para zonificación de cultivos (Fenner *et al.*, 2017; Pasinato *et al.,* 2018) así como, para cuantificar el impacto de las sequías agrometeorológicas (Shukla *et al.*, 2014; Masupha and Moeletsi, 2018).

Por último, en la hoja denominada "Gráf ALM+EXC" se presenta la marcha anual del almacenaje de agua del suelo y los valores de CC y PM, que dan una clara idea de los períodos en los cuales, en promedio, existirá falta o exceso de agua en el suelo. En el ejemplo (Figura 9) se

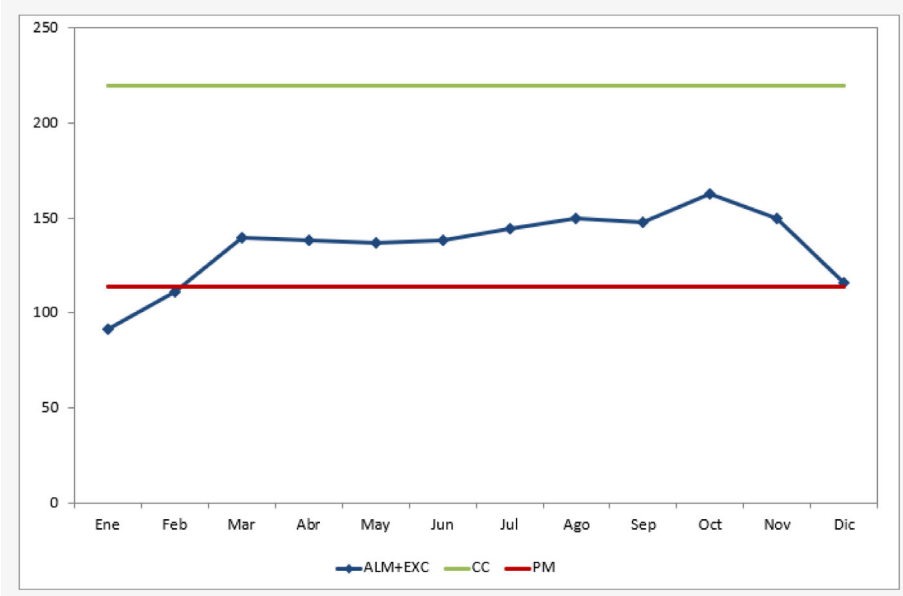


Figura 9. Marcha anual del agua del suelo, expresada a través de la variable almacenaje más excesos (ALM+EXC); y los coeficientes hídricos del suelo: capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM).

observa que durante el mes de enero es de esperar déficits dado que en promedio el almacenaje de agua del suelo se encuentra por debajo del PM, siendo ese mes el que presenta los valores más bajos; mientras que octubre es el mes con mayor contenido de agua en el suelo. Este resultado indica, entre otras cosas, que los cultivos de invierno que florecen en primavera no presentarán grandes problemas por falta de agua. En cambio, es de esperar que los cultivos de verano que tengan su período crítico en enero sufran con mayor probabilidad problemas de deficiencias de agua. Este resultado es también coincidente con Maddonni (2012) quien determina, para la región pampeana, que, como consecuencia del mayor contenido de agua en el perfil durante el período crítico de los maíces tardíos, estos estarían expuestos a un menor riesgo que los maíces tempranos.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una versión simplificada del modelo BHOA en una planilla de cálculo de Microsoft Excel denominada BHOAe para facilitar la tarea de los alumnos, docentes, investigadores y técnicos de todas las áreas que puedan llegar a necesitar de esta información. La planilla es de uso libre y se encuentra disponible en la página web del Centro de Información Agroclimático (CIAg) en el vínculo de Servicios, sobre el título de Índices de radiación (www.agro.uba.ar/centros/ciag/servicios#cal), y en la web de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Jujuy (FCA-UNJu). La misma permite obtener resultados diarios del balance hidrológico a partir de variables tales como almacenaje, déficits, excesos, etc.; y genera gráficos de la evolución del almacenaje para una campaña gruesa y/o fina determinada por el usuario. Este modelo también puede ser utilizado para aumentar la eficiencia en el uso del agua, como método de manejo del riego suplementario. Además, calcula la climatología de la precipitación, evapotranspiración potencial, almacenaje e índice de satisfacción hídrica; así como el gráfico de la marcha anual del almacenaje.

Esta herramienta proporciona estrategias para obtener e interpretar información para resolver problemas agroclimáticos específicos, tanto para usos técnicos y científicos, como para complemento de la enseñanza, de manera que las actividades y experiencias de aprendizaje seleccionadas y propuestas les brinden a los alumnos y usuarios la oportunidad de aplicar lo aprendido a situaciones concretas.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R, Pereira, L.S., Raes D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* Cuadernos de riego y drenaje Nº 56. FAO. 298 pp. Roma, Italia.

Barberis, G., Bombelli, E., Fernández Long M. E., y Hurtado R. (2009). Programas de Aplicación de Agrometeorología para Docencia e Investigación. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología TE&ET, 3*, 14-17.

Basualdo, A., Berbery, H., Dadamia, D., otros, Fernández Long, M. E. (2017). *JASMIN Joint Assessment of Soil Moisture Indicators (JASMIN) for southeastern South America*. Editorial: Facultad de Agronomía. Año: 2017. 88 pag. ISSN:978-987-3738-11-1.

Burgos, J.J. (1952). El termoperiodismo como factor bioclimático en el desarrollo de los vegetales. *Meteoros*. *2*, (3-4).

Burgos, J. y Corsi, W. (1970). Comprobación de métodos de simulación de balances de agua computados con datos meteorológicos. La Estanzuela, Uruguay. *Bol. Tec*., 57.

Burgos, J. y Forte Lay, J. A. (1978). Capacidad de almacenaje de los suelos de la región pampeana. *Actas*: Taller argentino estadounidense sobre sequías (CONICET NSF). Editor J.J. Burgos. Buenos Aires, Argentina. Pág. 152-170.

Calcagno, A., Mendiburo, N. y Gaviño Novillo, M. (2000). *Informe sobre la gestión del agua en la República Argentina*. En: www.cepal.org/drni/proyectos/samtac/inar00200.pdf

Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M.E., Sadras, V.O. (2010). Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: *Producción de granos*. Bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía. p. 377 – 442.

De Martonne, E. (1926) Aréisme et Indice d'aridité. Comptes Rendus de L'Academy of Science, Paris, 1395-1398.

Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. (1977). *Crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 24, Rome, Italy.

Fandos Garrido, M., Jiménez, J. M., & González Soto, Y. A. (2002). Estrategias didácticas en el uso de las Tecnología de la Información y la Comunicación. *Acción Pedagógica*, *11*(1), 28-39.

Fenner, W., Dallacort, R., Dalchiavon, F. C., Santi, A., Silva, F. S. da, y Barbieri, J. D. (2017). Zoning of water requirement satisfaction index for common bean in Mato Grosso. *Revista Brasileira de Engeñaría Agrícola e Ambiental, 21*(7), 476-480. https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p476-480.

Fernández Long, M. E., Hurtado, R., y Barberis, J. G. (2005). Programa de cálculo de variables agrometeorológicas para docencia e investigación. *Actas*: II Congreso Iberoamericano de EducaRed. Educación y Nuevas Tecnologías. 30 de junio, 1 y 2 de julio. Buenos Aires. Argentina.

Fernández Long, M. E., Hurtado, R. H., Barberis, J.G., y Bombelli, E. C. (2009). Actualización del programa de cálculo de variables agrometeorológicas para docencia e investigación. *Actas* XV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. p. 390-403.

Fernández Long, M. E., Spescha, L. B., Barnatán, I. E., y Murphy, G. M. (2012). Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *Agronomía y Ambiente, 32*(1-2), 31-47.

Fernández Long, M. E., Hurtado, R. H. y Spescha, L B. (2016). Planilla de cálculo de variables astronómicas (VARAST 1.0). *Agronomía y Ambiente*, *35*(2),171-177. ISSN: 2314-2243 (versión impresa) - ISSN: 2344-9039 (en línea).

Florio, M. P. (2017a). *Módulo 3: Pensar la creación: las ideas y miradas del profesor. En Entornos virtuales de enseñanza y aprendizaje (EVEA).* Nivel 1. 6° edición. Dentro del Programa Virtual de Formación Docente del Centro de Innovación en Tecnología y Pedagogía (Citep) de la Secretaría de Asuntos Académicos del Rectorado de la Universidad de Buenos Aires.

Florio, M. P. (2017b). *Módulo 4: La construcción de la propuesta: cuando vemos lo que imaginamos. En Entornos virtuales de enseñanza y aprendizaje (EVEA).* Nivel 1. 6° ed. Dentro del Programa Virtual de Formación Docente del Centro de Innovación en Tecnología y Pedagogía de la Secretaría de Asuntos Académicos del Rectorado de la Universidad de Buenos Aires.

Frère, M., and Popov, G.F. (1979). *Agrometeorological crop monitoring and forecasting.* FAO Plant Production and Protection paper N° 17, Rome, Italy.

Frère, M., and Popov, G.F. (1986). *Early Agrometeorological crop yield forecasting*. FAO Plant Production and Protection paper N° 73, by. FAO, Rome, Italy.

Gutiérrez, A.C., Echegaray, O., Legarreta y Guenaga Garai, G. (2003). Integración de las TIC en la Educación Superior. Píxel-Bit *Revista de Medios y Educación* N°21 (21-28).

Hurtado, R. H, Fernandez Long, M. E., y Barberis, J. G. (2002). Planillas de cálculo de balance hidrológico climático y evapotranspiración potencial. *Actas* dl XIII congreso Brasilero de Agrometeorología. Santa María. R.S. Brasil.

Hurtado, R. H., Fernández Long, M. E., Barberis, G. y Bombelli, E. (2007). *Programas de Aplicación en Agroclimatología.* (CD-ROM). Editorial Facultad de Agronomía, ISBN 978-950-29-0984-4.

Hurtado, R. H, Fernandez Long, M. E., Barberis J. G. y Bombelli, E. (2009). Programa de aplicación de agrometeorología para docencia e investigación. *TE&ET. Revista Iberoamericana de Tecnología en educación y educación en Tecnología*, *14* (18).

Litwin, E. (2002). Prácticas con Tecnologías. *Cuaderno de Investigación Educativa*. Universidad ORT, Uruguay, *1* (10), 43- 51.

Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina -a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology, 107*, 325-345.

Masupha, T. E., and Moeletsi, M. E. (2018). Analysis of potential future droughts limiting maize production, in the Luvuvhu river catchment area, south Africa. *Physics and Chemistry of the Earth,* 105, 44-51. doi:10.1016/j.pce.2018.03.009.

Nifle, R. (2004). Mutation dans l´enseignement universitaire. Le Journal Permanent de l´Humanisme Méthodologique. Disponible en. http://journal.coherences.com/article.php3?id_article=84.

Pascale, A.J. y Damario, E. A. (1977). El balance hidrológico seriado y su utilización en estudios agroclimáticos. *Rev. Facultad de Agronomía de La Plata*, *53*(1-2),15-34.

Pascale, A. J., y Damario, E. A. (2004). *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. Ed. Facultad de Agronomía, UBA. 550 pág.

Pasinato, A., da Cunha, G. R., Fontana, D. C., Monteiro, J. E., Nakai, A. M., and de Oliveira, A. F. (2018). Potential area and limitations for the expansion of rainfed wheat in the cerrado biome of central brazil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 53(*7*), 779-790. doi:10.1590/S0100-204X2018000700001.

Pérez, S., Fernández Long, M.E., Lamas, A., Spescha, L. (2018). *Entornos Virtuales de Enseñanza y Aprendizaje (EVEA) al servicio de la pedagogía universitaria: experiencia de la asignatura Climatología y Agrometeorología*. *Actas*: VII Congreso Nacional y VI Congreso Internacional de Enseñanza de las Ciencias Agropecuarias. 28 y 29 de noviembre de 2018, Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Shukla, S., McNally, A., Husak, G., and Funk, C. (2014). A seasonal agricultural drought forecast system for food-insecure regions of east africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18* (10), 3907-3921. doi:10.5194/hess-18-3907-2014

Thornthwaite, C W. (1948). An approach toward a racional classification of climate. Reprinted from the *Geogrphical Review*, *38*, 55-94.

Thornthwaite, C. W., and Mather, J. R. (1955). *The water balance*. Laboratory of Climatology, No. 8, Centerton, N.J., *Publications in Climatology*, *8* (1)1-104.

Waldegg Casanova, G. (2002). El uso de la nueva tecnología para la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, *4* (1).