

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

“Trabajo Final presentado para optar al Grado
de Ingeniero Agrónomo”

**PRODUCCIÓN DE SOJA EN SUELOS CON CAPA
FREÁTICA SOMERA EN EL DEPTO. ROQUE SÁENZ
PEÑA (CÓRDOBA)**

**Alumno: Horacio R. Videla Mensegue
DNI: 29.613.788**

**Director: Ing. Agr. Dr. Américo Degioanni
Co-Director: Ing. Agr. MSc. José Cisneros**

**Río Cuarto – Córdoba
Julio/2006**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final:

Autor:

DNI:

Director:

Co-Director:

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del
Jurado Evaluador:

(Nombres)

Fecha de Presentación: ___/___/___.

Aprobado por Secretaría Académica: ___/___/___.

Secretario Académico

AGRADECIMIENTOS

El autor de este Trabajo Final desea agradecer la desinteresada colaboración de las muchas personas que ayudaron a la realización del trabajo. Especialmente, se quiere destacar el aporte realizado por las siguientes personas:

Al señor Gerardo Zoppi y Carlos Anaya quienes permitieron la realización de la parte experimental de esta investigación.

Al Ing. Agr. Dr. Javier Marcos, de la Universidad Estatal de Washington (USA), por ceder gentilmente el modelo de simulación *Soil Water Balance* y por su generosa colaboración y el tiempo dedicado.

A la Universidad Nacional de Río Cuarto, especialmente a la Facultad de Agronomía y Veterinaria, y a la Municipalidad de la ciudad de Laboulaye por haberme permitido cursar mi estudio universitario.

Finalmente, a mis compañeros y amigos que ayudaron desinteresadamente a la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IX
SUMMARY	X
I. INTRODUCCIÓN	11
I.1. Hipótesis	13
I.2. Objetivos.....	13
II. MATERIALES Y MÉTODOS	15
II.1. Área experimental	15
II.2. Variables medidas	16
II.2.1. Clima	16
II.2.2. Cultivo	16
II.2.3. Suelo	16
II.2.4. Capa freática.....	17
II.3. Procesamiento y análisis de la información.....	18
II.3.4. Adaptado de un modelo de Producción de granos.....	18
II.3.5. Modelo Soil Water Balance.....	20
II.3.6. Evaluación de la bondad de ajuste de los modelos	20
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
III.1. Características del sitio de estudio y variables medidas.....	22
III.1.1. Caracterización general del sitio experimental	22
III.1.2. Evaluación de las variables medidas durante el ciclo del cultivo	25
III.2. Procesamiento y análisis de la información.....	30
III.2.3. Relación funcional entre variables climáticas y dinámica de la capa freática	30
III.2.4. Modelos de simulación.....	33
IV. CONCLUSIÓN	42
V. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	44
VI. BIBLIOGRAFÍA CITADA	45

VII. ANEXO I: MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO EN BASE A LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS.....	50
VII.1. Introducción	50
VII.2. Base matemática del modelo.....	50
VII.3. Funcionamiento del modelo.....	56
VII.4. Bibliografía	57
VIII. ANEXO II: SWBMODEL. UN MODELO DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA PARA ESTIMAR EL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO.....	58
VIII.1. Introducción	58
VIII.2. Ambiente atmosférico.....	58
VIII.3. Balance de agua en el suelo.....	60
VIII.4. Crecimiento y desarrollo del cultivo.....	66
VIII.5. Bibliografía	70
IX. ANEXO III: EVALUACIÓN DE LA BONDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS	72
IX.1. Introducción	72
IX.2. Métodos cuantitativos de evaluación de modelos	72
IX.3. Bibliografía.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1. Ubicación del área de estudio.</i>	15
<i>Fig. 2. Esquema conceptual del modelo de Producción de Granos.....</i>	18
<i>Fig. 3. Precipitación anual de Laboulaye para el período 1903-2004 (Fuente: elaboración propia. Datos INTA Laboulaye).</i>	22
<i>Fig. 4. Balance hídrico mensual de Laboulaye (Fuente: elaboración propia. Datos Cisneros et al. 2001).</i>	23
<i>Fig. 5. Evolución de la profundidad media anual de la capa freática y precipitación anual para el período 1982-2002 de Laboulaye (Fuente: elaboración propia. Datos del Servicio Meteorológico Nacional).</i>	24
<i>Fig. 6. Perfil del Haplustol udorténtico.</i>	24
<i>Fig. 7. Distribución semanal de la precipitación durante el período de estudio.</i>	26
<i>Fig. 8. Distribución semanal de la evapotranspiración potencial para el período de estudio.</i>	26
<i>Fig. 9. Distribución semanal del balance hídrico para el período de estudio.</i>	27
<i>Fig. 10. Perfiles hídricos en cinco momentos del ciclo del cultivo. Las fechas mostradas corresponden a las siguientes etapas del cultivo: 2 Dic (siembra), 4 Ene (V2), 21 Ene (R1), 17 Feb (R5) y 29 Mar (R8) en la escala fenológica de Fehr y Caviness (1977).</i>	28
<i>Fig. 11. Dinámica de la profundidad de la capa freática durante el período de estudio.</i>	30
<i>Fig. 12. Dinámica de la salinidad de la capa freática durante el período de estudio.</i>	30
<i>Fig. 13. Relación entre la profundidad de la capa freática y el balance hídrico durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológico en la escala de Fehr y Caviness, 1977).</i>	31
<i>Fig. 14. Relación entre la salinidad de la capa freática y el balance hídrico durante el período del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológico en la escala de Fehr y Caviness, 1977).</i>	31
<i>Fig. 15. Relación entre la salinidad y la profundidad de la capa freática.....</i>	32
<i>Fig. 16. Evapotranspiración del cultivo potencial y actual durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas del cultivo en la escala de Fehr y Caviness, 1977).</i>	33
<i>Fig. 17. Cantidad de agua disponible para el cultivo (ADC), agua fácilmente disponible (AFDC) y disminución del agua en la zona radical (Dr) durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas en la escala de Fehr y Caviness, 1977).</i>	34

<i>Fig. 18. Ascenso capilar diario, profundidad del sistema radical y de la capa freática durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas en la escala de Fehr y Caviness, 1977).</i>	34
<i>Fig. 19. Raíz principal de una planta de soja profundizando hasta casi tomar contacto con la capa freática</i>	35
<i>Fig. 20. Cantidad de agua disponible en la zona radical estimada y medida durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas en la escala de Fehr y Caviness, 1977).</i>	38
<i>Fig. 21. Nivel freático estimado y medido durante el ciclo del cultivo.</i>	39
<i>Fig. 22. Profundidad de la capa freática simulada y medida.</i>	41
<i>Fig. 23. Diagrama de flujo de los procesos simulados por el modelo de Producción de granos. Las líneas enteras son flujos de agua y carbono, las líneas discontinuas son flujos de información, los cuadros redondeados son almacenamiento de agua y carbono y los cuadros rectangulares son fuente de información</i>	51

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Datos analíticos del perfil del Haplustol udorténtico.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2. Componentes del rendimiento y producción de granos.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 3. Distribución del número de vainas de acuerdo al número de semillas por vaina por m².....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4. Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_{ES}) y pH.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5. Precipitación total y efectiva, ETP, ET_{C actual}, ascenso capilar y variación de almacenaje acumulados mensualmente.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 6. Producción de biomasa con y sin estrés estimada y medida en floración y llenado de grano.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 7. Rendimiento estimado con y sin estrés hídrico y medido.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8. Producción de biomasa simulada y medida.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 9. Rendimiento simulado y medido.</i>	<i>40</i>

RESUMEN

El sudeste de Córdoba es una porción de la Llanura pampeana que se caracteriza por una alta diversidad de ambientes. Últimamente, la mayor difusión del cultivo de soja ha provocado el incremento del uso agrícola en esta región. El objetivo de esta tesis es corroborar la existencia de una relación entre la producción de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] y la oscilación de la profundidad y salinidad de la capa freática en un suelo de aptitud agrícola representativo del Depto. Presidente Roque Sáenz Peña. Se midieron variables climáticas, de cultivo, suelo y capa freática. Parte de la información recabada se analizó por métodos estadísticos y se establecieron relaciones funcionales entre las variables climáticas y las de la capa freática. Por otra parte, se utilizaron dos modelos de simulación de producción de cultivos (modelo *Producción de Granos* y modelo *Soil Water Balance*) para evaluar relaciones funcionales del sistema clima-suelo-cultivo-capo freática. El balance hídrico ha resultado en un déficit de 112.2 mm al final del ciclo del cultivo. La producción de biomasa en floración, fue de 2190 Kg./ha mientras que en la etapa de llenado de grano fue de 5270 Kg./ha. El rendimiento en grano del cultivo fue de 5441.8 Kg./ha. La profundidad de la capa freática se mantuvo durante todo el ciclo del cultivo por encima de los 2 m con una salinidad que fluctuó entre los valores de 7.5 y 8.9 dS/m. En lo concerniente a los resultados aportados por los modelos, la producción de biomasa calculada por el modelo *Producción de Granos* sobreestima en aproximadamente 2000 Kg./ha los valores medidos para los estadios de floración y llenado de grano mientras que el rendimiento en grano estimado fue un 6% superior al medido. Estos resultados indican que la capa freática contribuyó en aproximadamente un 18% del total de agua consumida por el cultivo. El modelo *Soil Water Balance* subestimó la producción de biomasa medida en floración y llenado de granos en un 57% y 31% respectivamente. El rendimiento en grano simulado por este modelo fue un 8% mayor al medido. Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que una capa freática somera es una fuente de agua alternativa en un ciclo deficitario de precipitaciones bajo determinado rango de oscilación de profundidad y contenido salino. El uso de los modelos de simulación ha permitido integrar correctamente las variables climáticas, de suelo, cultivo y capa freática.

Palabras claves: producción, soja, capa freática, balance hídrico, modelos de simulación.

***PRODUCTION OF SOYBEAN IN SOIL WITH SHALLOW TABLE IN THE DEPT.
ROQUE SÁENZ PEÑA (CÓRDOBA)***

SUMMARY

The southeastern Cordoba is part of the Pampa plains that are characterized by high diversity of environments. Lately, the increasing cultivation of soybean has influenced the change in land use towards agriculture. The objective of this thesis was to corroborate the existence of a relationship between soybean production and the oscillation and salinity of the water table in a situation that represented the agricultural areas of the department of Presidente Roque Sáenz Peña, Cordoba, Argentina. Weather, crop, soil and water table data were collected. These data were analyzed by statistical methods and functional relationships between weather and water table variables were established. In addition, two crop simulation models (the *Production of Grains* and the *Soil Water Balance* models) were used to integrate weather, soil, crop and water table information. The water balance yielded a water deficit of 112.2 mm at the end of the growing season. The biomass productions at flowering and at grain filling stages were 2190 and 5270 Kg/ha respectively. The grain yield was 5441.8 Kg/ha. The water table was above the 2 m depth during most of the growing season and the salinity fluctuated about the 9 dS/m value. The *Production of Grains* model overestimated biomass production at flowering and at grain filling stages for about 2000 Kg/ha. Model estimates of yield were 6% higher than measured. Results also indicate that the water table contributed with approximately 43% to the total water used. The *Soil Water Balance* model underestimated biomass production at flowering and at grain filling for about 57% and 31% respectively. This model overestimated yield for about 8%. The results obtained in this investigation show that a shallow water table is an alternative source of water when precipitation is lacking. This alternate source of water is dependant on the range of oscillation and salinity of the water table. Results also show that simulation models allow integration of weather, crop, soil and water table information.

Keywords: production, soybean, water table, water balance, simulation model.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las principales actividades económicas de nuestro país. Actualmente, la producción agrícola argentina ha experimentado un notable incremento de la superficie cultivada. Según los datos del Censo Agropecuario 2002 (SAGPYA, 2002), la superficie cultivada con cereales y oleaginosas ha aumentado más de 55% lo que produjo un incremento de la producción de 30 a 61 millones de toneladas en los últimos catorce años. En este contexto, es relevante precisar que el cultivo que dominó este escenario de expansión ha sido la soja. Satorre (2003) indica que de las 23 millones de hectáreas sembradas con cultivos de grano, aproximadamente el 48% corresponde al cultivo de soja.

El continuo incremento del área sembrada ha incorporado tierras de baja aptitud para agricultura y, en el mejor de los casos, tierras aptas pero que están influenciadas por la oscilación de una capa freática próxima a la superficie con moderado contenido salino la cual puede causar efectos negativos sobre el recurso suelo y/o sobre la producción del cultivo.

El sudeste de la provincia de Córdoba es una porción de la Llanura Pampeana que se caracteriza por una alta diversidad de ambientes. Entre estos, los ambientes con capa freática somera ocupan aproximadamente dos millones de hectáreas (Cisneros, 1994). Una gran cantidad de suelos que predominan en la región (*Haplustoles*, *Hapludoles*, *Natralboles*, *Natracuoles*, *Natracualfes* - Gorgas y Tassile, 2003) están en contacto con una capa freática cuya profundidad oscila desde cero a cuatro metros y un rango de salinidad entre 2 y 25 dS/m de conductividad eléctrica. (INTA y SMAGyRR, 1987).

En estos ambientes, las oscilaciones de la capa freática tienen una elevada correlación con el balance hídrico local (Cisneros, 1994). En general, se produce un descenso del nivel freático durante períodos donde la evapotranspiración supera sensiblemente a la precipitación y un ascenso durante períodos de muy baja demanda evaporativa o donde la precipitación supera la evapotranspiración.

Cisneros (1994) desarrolló un modelo conceptual y estadístico para explicar las oscilaciones de una capa freática somera en relación con el balance hídrico y el contenido salino, la cubierta vegetal y las propiedades hidrofísicas de los suelos. Degioanni *et al.* (2002) y (2005) emplearon diferentes modelos de simulación del balance hídrico para sintetizar el funcionamiento hidrológico de una cuenca situada en la misma área de estudio de este trabajo y realizaron proyecciones del nivel freático a corto plazo como indicador del

riesgo de anegamiento del suelo.

En cuanto al uso de la tierra, esta zona ha sido tradicionalmente de uso agrícola y ganadero desde hace más de una centuria. Actualmente, el uso agrícola de las tierras se ha incrementado ha raíz del aumento de la actividad agrícola en general y del cultivo de soja en particular, causando un cambio en el uso del territorio. Los datos oficiales (SAGPYA, 2004) sobre el área sembrada con soja en la provincia de Córdoba, para la campaña 2003-04, indican que se han superado los tres millones y medio de hectáreas sembradas habiendo sobrepasado en un 13% a la campaña 2002-03. En el Depto. Presidente Roque Sáenz Peña, en la campaña 2003-04, la superficie sembrada fue de ochenta y ocho mil hectáreas con una producción que superó las ciento cuarenta y nueve mil toneladas obteniéndose un rendimiento medio de diecisiete quintales por hectárea (SAYGC, 2004).

Distintos estudios experimentales demuestran que la existencia de una capa freática poco profunda puede ser una fuente subterránea de agua para los cultivos en secano, cuyo beneficio estaría condicionado a las características químicas de dicha fuente. En tal sentido, el sudeste de Córdoba posee un elevado potencial productivo por la posibilidad de contar con este recurso hídrico aunque se deben especificar bajo que condiciones ambientales pueden resultar beneficiosas para la actividad agrícola.

Referente al estudio de la relación suelo - cultivo en ambientes con capa freática somera se han realizado investigaciones tanto en el ámbito nacional (Racca *et al.*, 2001; Dardanelli y Collino, 2002) como internacional (Grismer y Gates, 1988; Mejia *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2001; Sepaskhah *et al.*, 2003; Kahlowan *et al.*, 2005; Mueller *et al.*, 2005; Sepaskhah y Karimi-Goghari, 2005). Todos ellos coinciden en destacar la importancia de la capa freática como recurso de agua para los cultivos en regiones áridas y semiáridas, señalando que puede aportar hasta el 100% de los requerimientos hídricos de los cultivos.

Varios autores (Kang *et al.*, 2001; Kahlowan *et al.*, 2005; Mueller *et al.*, 2005; Sepaskhah y Karimi-Goghari, 2005) han realizado estudios en lisímetros para cuantificar el aporte de agua por parte de la capa freática a los requerimientos hídricos de varios cultivos. En general, estos estudios afirman que una capa freática a una profundidad de 1.2 – 2 m es óptima para obtener una alta producción de biomasa en varios cultivos (maíz, girasol, trigo y sorgo). Mejia *et al.* (2000) conduciendo dos años de estudios para evaluar el efecto de la capa freática en maíz y soja encontraron que, en promedio, el aumento de los rindes fue de 5 – 10% en maíz y de 23% en soja.

Por su parte, Dardanelli y Collino (2002) han efectuado ensayos similares pero en condiciones de campo. Dichos autores evaluaron indirectamente el aporte de la capa freática al consumo de agua de la alfalfa en diferentes ambientes encontrando que este aporte varió entre 15 – 25% de dicho consumo de agua.

Sarwar (2002), en ensayos realizados en lisímetros, ha evaluado la respuesta fisiológica

de la soja a diferentes profundidades de la capa freática. El mismo concluye que una capa freática poco profunda (0.15 m) reduce significativamente la producción en granos comparado con una capa freática a mayor profundidad (0.6 m). La producción obtenida con una capa freática a 0.15 m fue 48% menor que la lograda con una capa freática a 0.6 m.

Numerosos trabajos de la bibliografía (Lamsal *et al.*, 1999; Beyazgül *et al.*, 2000; Sepaskhah *et al.*, 2003; Jorenush y Sepaskhah, 2003; Sepaskhah *et al.*, 2006) refieren sobre el estudio de la relación de la capa freática en diversos cultivos empleando modelos de simulación de diferentes bases matemáticas. Ellos expresan en común la importancia de la información generada con el uso de modelos de simulación para el estudio de la relación capa freática – cultivo y como herramienta para el manejo tecnológico de la producción.

Por otra parte, como la capa freática actúa también como fuente de sales que puede afectar el desarrollo de los cultivos, Katerji *et al.* (2003) relacionando el potencial osmótico del suelo y el potencial hídrico de la hoja, clasifican a la soja dentro del grupo de las especies más sensibles. Dichos autores han demostrado que el aumento en la salinidad del suelo por encima de los 2 dS/m provoca una disminución en la eficiencia de utilización del agua. El aumento del contenido salino de un suelo tiene efectos a nivel fisiológico de la planta en la conductividad estomática, la evapotranspiración, el área foliar, el número y peso de los grano y, por ende, en el rendimiento (Desclaux *et al.*, 2000; Sarwar, 2002; Kao *et al.*, 2006).

1.1. Hipótesis

La presente tesis se caracteriza por ser un estudio confirmatorio pero con un alto grado de exploración del comportamiento de las variables físicas y biológicas intervinientes en la función de producción del cultivo de soja. En tal sentido y con la premisa de que la producción de soja en tecnología de secano es altamente dependiente del balance hídrico local, se plantea la siguiente hipótesis: *la capa freática puede ser una fuente de agua alternativa en un ciclo deficitario de precipitaciones bajo determinado rango de oscilación de profundidad y contenido salino.*

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es relacionar la producción de soja y la oscilación de la profundidad y salinidad de la capa freática en un suelo de aptitud agrícola representativo del Depto. Presidente Roque Sáenz Peña.

Los objetivos específicamente planteados son:

- Analizar el ritmo de oscilación de la capa freática en el área de estudio y su relación con los factores climáticos y edáficos en el ciclo del cultivo.

- Evaluar la producción de materia seca, en diferentes estadios fenológicos, y el producto cosechable.
- Sintetizar el comportamiento del sistema suelo - cultivo mediante el uso de modelos de simulación numéricas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. Área experimental

El área experimental de esta investigación se encuentra en la pedanía San Martín, Depto. Presidente Roque Sáenz Peña, próxima a la localidad de Villa Rossi, en el establecimiento del Sr. Gerardo Zoppi.

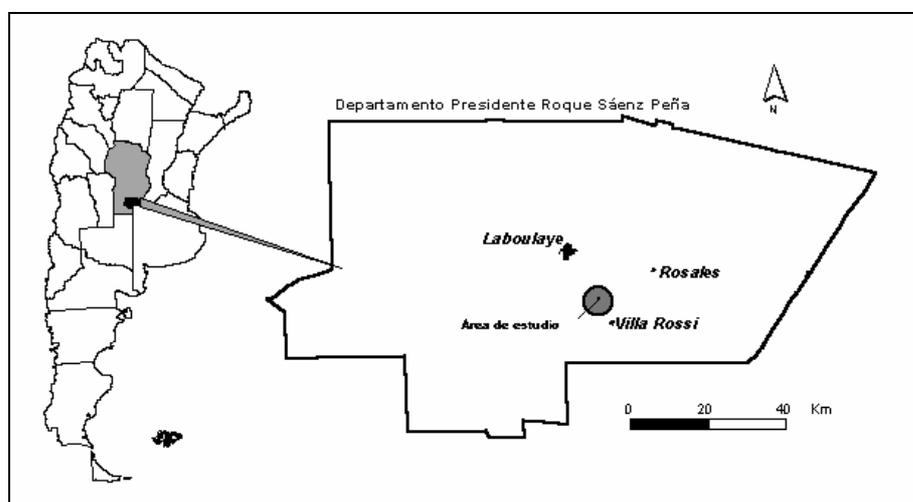


Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

El cultivar de soja sobre el que se hizo el seguimiento es “Don Mario 3700” cuyas principales características son: grupo de madurez 3.7, hábito de crecimiento: indeterminado, peso de los 1000 granos 185 gr. y altura promedio 0.72 m (Baigorri, 2003).

El cultivo fue sembrado el 2 de diciembre del 2004 a una distancia entre hileras de 0.52 m con una densidad de plantas emergidas de 44 pl/m². La tecnología de siembra (directa) y control de malezas, plagas y enfermedades fue la utilizada por el productor.

El suelo sobre el que se desarrolló el cultivo es un *Haplustol udorténtico*, Serie *Laboulaye*, de textura franca arenosa, bien drenado, topográficamente vinculado a lomas planas y ligeramente onduladas. Es un suelo de aptitud agrícola correspondiente a la unidad cartográfica *LBy* de la hoja 3563-3 *Laboulaye* (INTA y SMAGyRR, 1987).

A partir del metro y medio de profundidad, este suelo está en contacto con una capa freática con moderado contenido salino. Durante el ciclo del cultivo, el suelo permaneció con un 100% de cobertura.

II.2. Variables medidas

Las variables medidas y la metodología de medición de los componentes físicos (clima, suelo y capa freática) y biológicos (cultivo) del sistema experimental se detallan a continuación:

II.2.1. Clima

Se registraron en forma diaria la precipitación, radiación solar, temperatura máxima y mínima, humedad relativa y velocidad del viento mediante una estación meteorológica automática “Metos” (Pessl Instruments GMBH-Weiz).

II.2.2. Cultivo

Se tomaron muestras siguiendo un diseño en “X”. Se obtuvieron 5 muestras de una superficie de 0.25 m² cada una, dejando libre 10 m de distancia de los laterales. En cada estación de muestreo se extrajeron las plantas para realizar las siguientes mediciones:

II.2.2.a. Stand de plantas a cosecha: se determinó realizando el conteo de la cantidad de plantas por unidad de superficie.

II.2.2.b. Medición de materia seca: las muestras extraídas se secaron en estufa a una temperatura de 80 °C tal como aconsejan Mills y Jones (1996) hasta que las muestras se estabilizaron en un peso constante. Las mediciones de peso se realizaron en una balanza analítica con una precisión de 0.1 gramo en los estadios de floración y llenado de grano en la escala fenológica de Fehr y Caviness (1977).

II.2.2.c. Rendimiento: el mismo se calculó contando el número de frutos por planta, seleccionando veinte frutos, y se determinó el número de semillas por fruto. Del total de semillas se realizaron cinco muestras de mil semillas cada una y se pesaron.

II.2.3. Suelo

El individuo suelo se caracterizó morfológica y analíticamente de acuerdo a las *Normas de Reconocimiento de Suelos de la República Argentina* (Etchevehere, 1976) tomando como base la descripción de la *Serie Laboulaye* (INTA y SMAGyRR, 1987). Durante el desarrollo del cultivo se midieron las siguientes variables:

II.2.3.a. Conductividad eléctrica del extracto de saturación según el método propuesto por Richards (1973).

II.2.3.b. pH en agua determinado en una dilución 2.5 partes de agua en 1 de suelo.

Ambas variables fueron medidas al momento de la siembra, floración y llenado de grano según la escala fenológica propuesta por Fehr y Caviness (1977). Los muestreos se realizaron siguiendo la metodología propuesta por el *Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos* (Luters y Salazar Lea Plaza, 2000), la cual estipula que se deben realizar tres muestreos al azar. Los mismos se realizaron en una superficie de 200 m² a las profundidades de 0.1, 0.25, 0.5 y 1 m respetando la profundidad de los horizontes principales del perfil.

II.2.3.c. Contenido hídrico volumétrico: esta variable se registró con sensores potenciométricos de medición continua marca “Watermark”. Los mismos se ubicaron a profundidades de 0.10, 0.25, 0.50 y 1 metros. La conversión de las medidas de potencial hídrico a contenido hídrico volumétrico se realizó mediante las curvas de capacidad hídrica estimadas por medio del modelo *SOILPAR* (Donatelli y Acustis, 2003).

II.2.3.d. Densidad aparente: esta variable se midió utilizando el método de los anillos (Luters y Salazar Lea Plaza, 2000).

II.2.3.e. Textura: la misma se determinó por medio de la metodología de análisis propuesto por Gee y Bauder (1986).

II.2.4. Capa freática

II.2.4.a. Profundidad de la capa freática: ésta se evaluó mediante la instalación de un pozo de observación –freatímetro (Pizarro, 1978). Las observaciones se realizaron con frecuencia quincenal.

II.2.4.b. Conductividad eléctrica de la capa freática: las mediciones se llevaron a cabo utilizando un conductivímetro marca “Milwaukee” con frecuencia quincenal.

II.3. Procesamiento y análisis de la información

Para el procesamiento y análisis de los datos se utilizó el análisis de correlación para conocer las relaciones funcionales entre las variables climáticas y la capa freática y dos modelos de simulación: uno adaptado para esta experiencia y de mayor base empírica y otro de base física desarrollado en la *Washington State University*.

II.3.4. Adaptación de un modelo de Producción de granos

La producción de materia seca cosechable de un cultivo depende, en primera instancia, de la interacción entre un genotipo y la disponibilidad de radiación solar, agua y nutrientes en un determinado sitio geográfico. Para estudiar este proceso en forma integral se recurre a la elaboración de modelos que permiten, por un lado interpretar como se organizan e interaccionan los componentes del sistema clima – suelo – cultivo y por otro, simular el comportamiento del sistema en términos cuantitativos. Se presenta a continuación un modelo para el cálculo de la producción de materia seca cosechable de soja.

El modelo que se ha adaptado para esta circunstancia experimental, estima el rendimiento del cultivo afirmándose en la relación existente entre la transpiración y la asimilación de carbono cimentando el cálculo en el balance hídrico. En tal sentido, los flujos de agua que considera el modelo son: lluvia, escurrimiento superficial saliente, percolación, ascenso capilar desde la freática, cambios en el contenido de humedad del suelo, cambios en el nivel freático y evapotranspiración (*Fig. 2*).

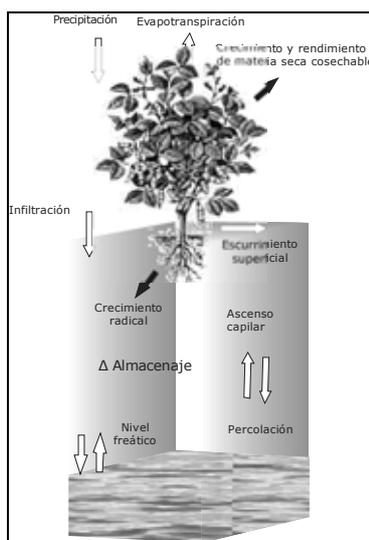


Fig. 2. Esquema conceptual del modelo de Producción de Granos.

La evapotranspiración potencial (ETP) es calculada por el método de *FAO – Penman – Monteith* (Allen *et al.*, 1998). La evapotranspiración del cultivo (ET_C) es estimada siguiendo el modelo propuesto por Doorenbos y Pruitt (1975). Estimada la ET_C , el modelo corrobora que el agua retenida en el suelo sea suficiente para abastecer el requerimiento del cultivo. Para ello, se realiza un balance hídrico que toma la forma:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - Esc)_i - Asc_i + ET_{C,i} + DP_i \quad [1]$$

dónde D_r es la disminución de agua de la zona radical (mm), P es la precipitación (mm), Esc es el escurrimiento superficial (mm) estimado según la Curva Número (SCS - USDA, 1972), Asc es el ascenso capilar de la freática (mm) estimado según De Laat (1995) y DP es la pérdida de agua de la zona radical por percolación profunda (mm) en el día i . La zona de exploración de raíces es estimada por el modelo propuesto por Borg y Grimes (1986).

El resultado de este balance es expresado como la disminución de agua de la zona radical, es decir, la diferencia entre la cantidad de agua disponible para el cultivo, equivalente al agua útil de la zona radical, y el contenido hídrico actual. Con este valor más la cantidad de agua disponible para el cultivo en la zona radical (ADC) y la cantidad de agua fácilmente disponible para el cultivo ($AFDC$) se estima un coeficiente de estrés hídrico (K_S) que varía entre 0 (máximo estrés) y 1 (sin estrés) que es el que va a determinar la evapotranspiración actual del cultivo ($ET_{C\text{ actual}}$) según:

$$ET_{C\text{ actual}} = (K_C \times K_S) \times ETP \quad [2]$$

Una vez establecida la $ET_{C\text{ actual}}$, la producción de biomasa aérea es estimada diariamente por el producto de la $ET_{C\text{ actual}}$ y la eficiencia de uso de agua (EUA), siendo el rendimiento en grano $-R$ (Kg/ha)- igual a la sumatoria de la producción de biomasa durante el período de crecimiento del cultivo (d) multiplicada por el índice de cosecha (IC).

$$R = IC \times \sum_0^d ET_{C\text{ actual}} \times EUA \quad [3]$$

(Véase Anexo I para una descripción detallada del modelo).

II.3.5. Modelo Soil Water Balance

A los fines de homologar los resultados obtenidos con el modelo adaptado de *Producción de Granos* se probó un modelo de base mecanística, *Soil Water Balance –SWB* (Marcos y Campbell, 2002).

El *SWBModel 11* es un modelo que simula el transporte de agua en el sistema suelo – planta - atmósfera acoplado con un simulador de crecimiento y desarrollo de cultivos. El modelo se ejecuta en *Microsoft Excel* utilizando el lenguaje de macros brindado por la aplicación *Visual basic*.

El *SWBModel* es un simulador de paso diario requiriendo datos de temperatura máxima y mínima del aire, precipitación y velocidad del viento diario. Además, es necesario brindarle datos y parámetros de suelo, capa freática y cultivo.

El balance de agua incluye los procesos de evaporación, escurrimiento, infiltración, redistribución, percolación profunda, transpiración y dinámica de la capa freática. La representación matemática del balance de agua en el suelo se realiza mediante la integración numérica de ecuaciones diferenciales, por el método de diferencias finitas, que describen el flujo y almacenamiento de agua en el suelo y en el perfil en su conjunto. El efecto de la capa freática en el balance de agua del perfil es simulado estableciendo el potencial agua en la capa en contacto con la capa freática en un potencial agua entre saturación y capacidad de campo.

La pérdida de agua por transpiración es regulada por la interacción entre la demanda atmosférica, el potencial agua del suelo y el potencial agua en la hoja. La evapotranspiración potencial es separada en transpiración potencial y evaporación potencial de acuerdo a la fracción de la radiación incidente que es interceptada por la canopia del cultivo.

La fracción de intercepción del cultivo es a su vez regulada por el índice de área foliar. La producción de materia seca es estimada en forma diaria y depende de la cantidad de radiación incidente y la cantidad de agua transpirada.

El desarrollo del cultivo es estimado de acuerdo al tiempo térmico y determina el ritmo de partición de acumulación de materia seca entre crecimiento vegetativo y reproductivo.

(Véase Anexo II para una descripción detallada del modelo).

II.3.6. Evaluación de la bondad de ajuste de los modelos

La capacidad predictiva o bondad de ajuste de los modelos fue evaluada por medio de dos indicadores estadísticos: el coeficiente de correlación lineal (r) y el error estándar de ajuste (S_e) (Willmott, 1982).

El primero, cuantifica el grado de covariancia lineal entre dos variables. El segundo, describe la diferencia media entre los valores estimados y observados y toma la unidad de la variable analizada.

(Véase Anexo III para una descripción detallada de los métodos de evaluación).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1. Características del sitio de estudio y variables medidas

III.1.1. Caracterización general del sitio experimental

El sitio experimental se encuentra en una región de clima semiseco, con tendencia al semihúmedo, con gran uniformidad térmica, mesotermal (Capitanelli, 1979). Según la clasificación de Thorntwaite, la región se encuentra dentro del tipo climático subhúmedo a húmedo (Ruggiero y Conti, 1988), el que agrupa áreas con Índice Hídrico entre 0 y -20. La temperatura media anual para la serie 1961-1970 es de 16.6 °C con una amplitud térmica promedio de 14.6 °C siendo la temperatura media del período más cálido 23.1 °C y 9.5 °C para el período más frío. El período libre de heladas es de 233 días, siendo la fecha media de primera helada el 16/05 y la de última helada el 13/09 (INTA y SMAGyRR, 1987).

La precipitación del área posee un comportamiento cíclico, con alternancia de ciclos secos y húmedos de duración entre 25 y 40 años (Suriano y Ferpozzi, 1993). La precipitación media anual para la serie 1903-2004 (Fig. 3) es de 799 mm de los cuales el 74% precipita durante la primavera y el verano. La precipitación promedio para la década 1928-1938 fue de 705 mm (INTA y SMAGyRR, 1987) mientras que para la década 1988-1998 fue de 952 mm con un incremento sostenido de la precipitación media anual a partir de la década del '70 (Rang *et al.*, 1999; Paoli *et al.*, 2000; Jensen *et al.*, 2000).

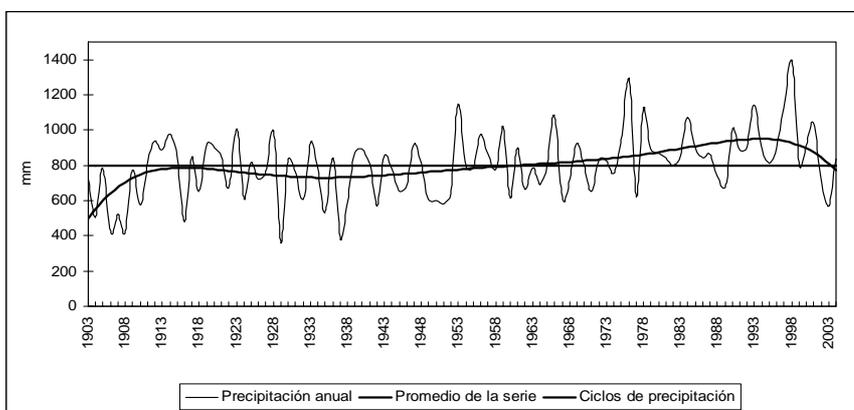


Fig. 3. Precipitación anual de Laboulaye para el período 1903-2004 (Fuente: elaboración propia. Datos INTA Laboulaye).

De acuerdo a la línea de tendencia (polinomial) se observan dos ciclos bien diferenciados: uno seco que culminó hacia fines de la década de 1960 y otro húmedo que aparentemente estaría culminando hacia 2004 tal como lo apunta Sierra *et al.* (2005).

El balance hídrico modular (*Fig. 4*) para la estación meteorológica de Laboulaye muestra un marcado déficit en los meses de diciembre, enero y febrero con un período de recarga bien definido durante los meses de marzo y abril, para una evapotranspiración potencial calculada a partir del método de Thornthwaite.

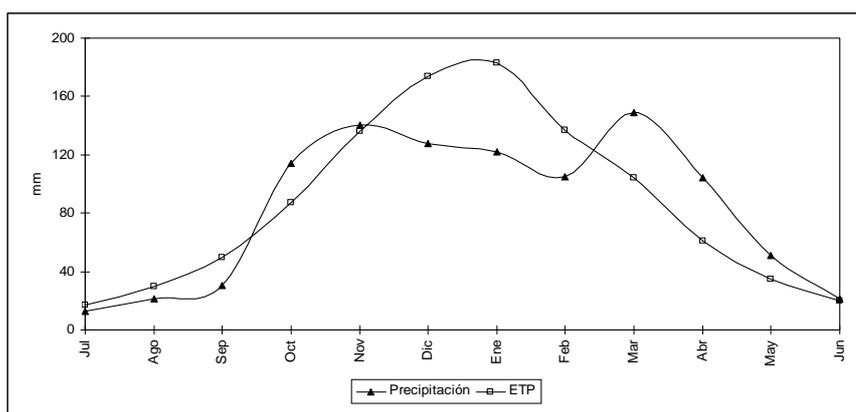


Fig. 4. Balance hídrico mensual de Laboulaye (Fuente: elaboración propia. Datos Cisneros et al. 2001).

En término del balance hidrológico de los suelos, los períodos de déficit hídrico señalados anteriormente tienen validez sólo para situaciones bien drenadas con la capa freática oscilando fuera de las profundidades de enraizamiento. Para los suelos con influencia de la capa freática, en el balance hidrológico entran en consideración los aportes de las precipitaciones, de la freática y otras fuentes, como los escurrimientos superficiales e hipodérmicos, todo lo cual define un balance positivo, en la mayor parte del año (Cisneros *et al.*, 1997).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área pertenece a la Pampa Arenosa Anegable (Gorgas y Tassile, 2003). Los escurrimientos superficiales del sector derivan hacia la laguna “La Picasa” en la provincia de Santa Fe.

En cuanto a la dinámica temporal de la capa freática (profundidad y salinidad), ésta depende de las recargas del acuífero a escala local, como principal fuente, y regional así como de las condiciones de evaporación y transpiración desde la superficie del suelo.

El escurrimiento subterráneo es responsable principalmente del traslado y acumulación de sales solubles en los acuíferos del sistema mientras que las lluvias locales son las principales responsables del aumento del nivel freático.

En la *Fig. 5* se muestra la evolución de la profundidad media anual de la capa freática y su relación con la precipitación anual de Laboulaye para el período 1982 – 2002.

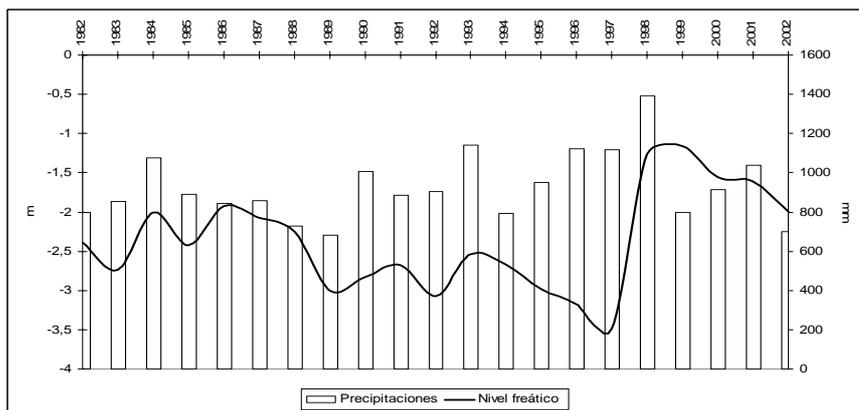


Fig. 5. Evolución de la profundidad media anual de la capa freática y precipitación anual para el período 1982-2002 de Laboulaye (Fuente: elaboración propia. Datos del Servicio Meteorológico Nacional).

El nivel freático medio para el período 1982 – 2002 fue de 2.37 m con un valor máximo de 3.5 m (1997) y, uno mínimo de 1.16 m (1999). Además, se advierte la relación existente entre la recarga de la capa freática y la cantidad de agua aportada por las precipitaciones.

En cuanto a la descarga del sistema freático este está principalmente determinado por la transferencia de agua a la atmósfera por evaporación cuando la freática se vincula capilarmente con la superficie o por la transpiración vegetal. En términos generales, la capa freática tiene una dinámica que está correlacionada positivamente con el balance hídrico local (Cisneros, 1994; Degioanni *et al.*, 2005). Donde se observan los períodos de recarga en el semestre cálido y los de descarga en el semestre frío.

El suelo donde se desarrollo la experiencia tal como se mencionó, corresponde a la unidad cartográfica *Consociación Laboulaye* que es un *Haplustol udorténtico* (Fig. 6). Se localiza en una posición topográfica de lomas planas a ligeramente onduladas, de relieve normal y con pendientes menores a 1.5%. La clase por aptitud de uso de este suelo es IIIcs. En el *Cuadro 1* y en la *Tabla 1* se presenta la descripción morfológica y analítica del perfil.

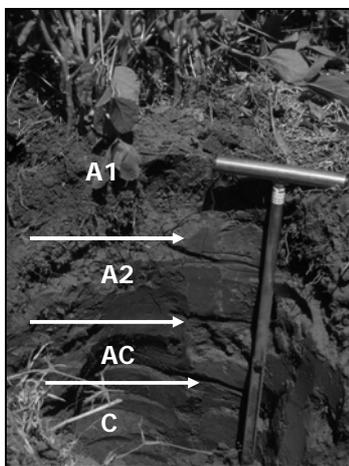


Fig. 6. Perfil del *Haplustol udorténtico*.

Cuadro 1. Descripción morfológica del perfil del Haplustol udorténtico.

Ap	0-12 cm.; pardo grisáceo oscuro en húmedo; franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios y finos, débiles, friable en húmedo; límite inferior abrupto, suave.
A12	12-22 cm.; pardo grisáceo oscuro en húmedo; franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, moderados a fuertes; friable en húmedo; límite inferior claro, suave.
AC	22-44 cm.; pardo amarillento oscuro en húmedo; franco arenoso; estructura en bloques angulares medios que rompen a subangulares finos, moderados a débiles; muy friable en húmedo; límite inferior gradual.
C	44 cm. a +; pardo a pardo oscuro en húmedo; franco arenoso; estructura masiva; muy friable en húmedo.

Tabla 1. Datos analíticos del perfil del Haplustol udorténtico.

Horizontes	Ap	A12	AC	C
Profundidad (cm)	0-12	12-22	22-44	44 a +
Materia orgánica (%)	1.81	2.01	0.83	
DAP (gr/cm ³)	1.3	1.3	1.41	1.35
Arcilla (%)	9.7	9.3	14.5	12.9
Limo (%)	24.5	23.5	29	28.1
Arena (%)	65.8	67.2	56.5	59
Capacidad de campo (% v/v)	0.17	0.16	0.21	0.20
pH en agua 1 : 2.5	6	6.08	5.91	6.48
Conductividad eléctrica del extracto de saturación (dS/m)	0.673	0.354	0.438	0.529

La capa freática cuyo contenido salino medio es de 10 dS/m fluctúa entre 1.5 y 3 m de profundidad presentando raramente conexión capilar con la superficie y limitando la posibilidad de aporte de sales a la misma. En este suelo las posibilidades de anegamiento o salinización son prácticamente inexistentes.

A nivel del Departamento Presidente Roque Sáenz Peña, el gran grupo *Haplustol* es representativo de aproximadamente trescientos treinta mil hectáreas que equivale a un 40% de la superficie del departamento (Gorgas y Tassile, 2003).

III.1.2. Evaluación de las variables medidas durante el ciclo del cultivo

III.1.2.a. Climáticas

Durante el período de estudio, es decir del 2 de diciembre del 2004 hasta el 4 de abril del 2005, la lámina precipitada sumó 517.6 mm siendo un 15.5% inferior a la precipitación media histórica de Laboulaye para el mismo período. Esto indicaría que estamos en presencia de un año deficitario de precipitaciones cumpliendo con uno de los requisitos de la hipótesis planteada.

En la *Fig. 7* se presenta la distribución semanal de las precipitaciones. La precipitación media semanal fue de 28.76 mm con un máximo de 86.6 mm y, un mínimo de 0.2 mm.

Durante el ciclo del cultivo, se registraron seis períodos, sobre dieciocho, en los cuales se superó la precipitación media semanal.

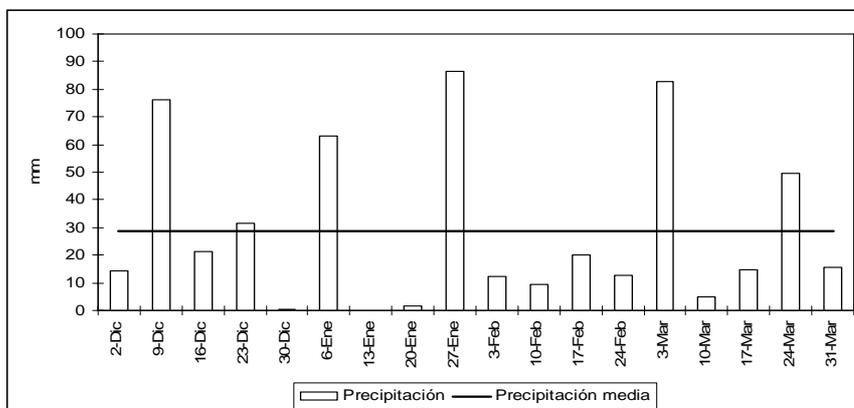


Fig. 7. Distribución semanal de la precipitación durante el periodo de estudio.

En cuanto a la evapotranspiración potencial calculada por el método de *FAO-Penman-Monteith* (Allen *et al.*, 1998) para el ciclo del cultivo totalizó 629 mm. La media semanal fue de 35 mm con un máximo de 41 mm y, un mínimo de 28 mm (Fig. 8).

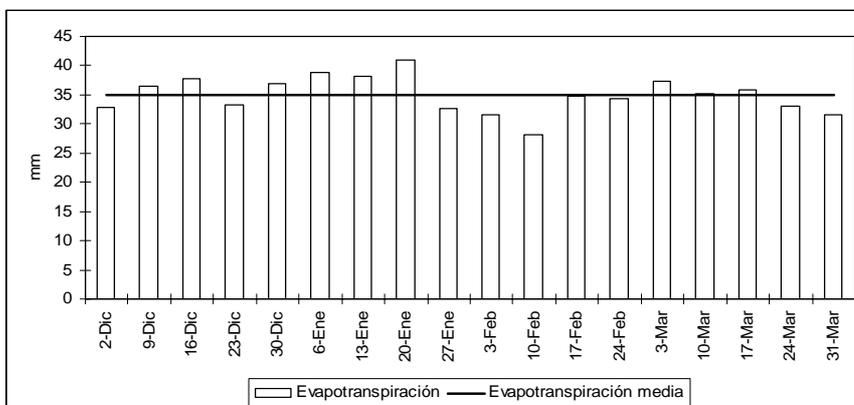


Fig. 8. Distribución semanal de la evapotranspiración potencial para el periodo de estudio.

El balance hídrico semanal (Fig. 9), calculado como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, ha resultado en un déficit de 112.2 mm al final del período de estudio.

El balance hídrico calculado arroja cinco semanas, de un total de dieciocho, con balance hídrico positivo de los cuales el máximo fue de 54 mm (semana del 27 de enero). El déficit hídrico predominó en la mayor parte del período de estudio registrándose el mayor valor negativo el 20 de enero con 39 mm.

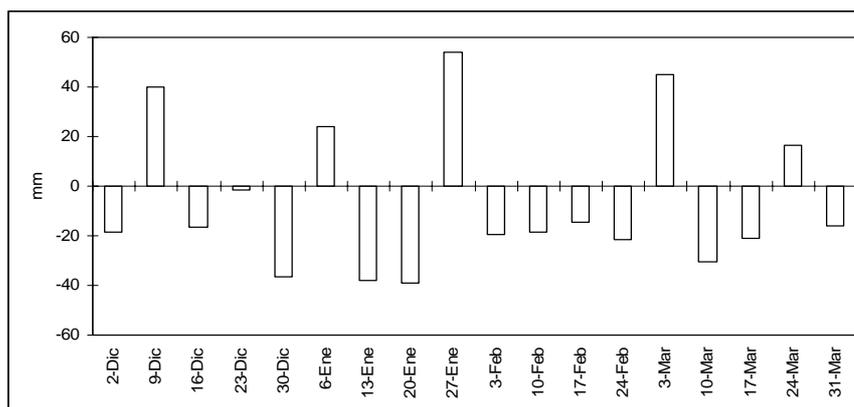


Fig. 9. Distribución semanal del balance hídrico para el período de estudio.

III.1.2.b. Cultivo

El contenido de agua al momento de la siembra, en la cama de siembra, fue de 0.20 cm³/cm³ con una CE_{ES} de 0.394 dS/m. Éstas condiciones permitieron la normal germinación de la simiente, proceso que duró 8 días en promedio.

La producción de biomasa, al momento de la floración (R1), fue de 2190 Kg./ha mientras que en la etapa de llenado de grano (R5) fue de 5270 Kg./ha.

En la *Tabla 2* se presentan los componentes del rendimiento y la producción de granos.

Tabla 2. Componentes del rendimiento y producción de granos.

Componentes del rendimiento	Media	Desvío	Coficiente de variación
Plantas/m ²	35.6	4	0.11
Nº de Vainas/Planta	42.9	5.71	0.13
Nº de Semillas/Vainas	2.34	0.03	0.012
Peso de 1000 granos (gr.)	153.39	4.2	0.027
Rendimiento (Kg./ha)	5441.8	600.2	0.11

Al momento de la cosecha el stand de plantas por metro cuadrado fue de 35.6 (\pm 4) con una media de 42.9 vainas por plantas. El número de semillas por vainas fue de 2.34 con un peso de 153.39 gr. los 1000 granos. El rendimiento en grano del cultivo fue de 5441.8 Kg./ha.

La distribución del número de vainas de acuerdo al número de semillas por vaina (*Tabla 3*) muestra un predominio de las vainas con tres y dos granos por sobre las de uno y cuatro granos.

Tabla 3. Distribución del número de vainas de acuerdo al número de semillas por vaina por m².

Número de vainas	Media	Desvío	Coficiente de variación
1 semilla	198.8	31.2	0.15
2 semilla	616	89	0.14
3 semilla	680.8	73.4	0.10
4 semilla	18	10.4	0.57

III.1.2.c. Suelo

i Contenido hídrico del suelo

Los perfiles hídricos medidos con sensores potenciométricos (Fig. 10), en cinco momentos del período del cultivo, muestran una alta dinámica en el contenido hídrico en los primeros 0.5 m de suelo.

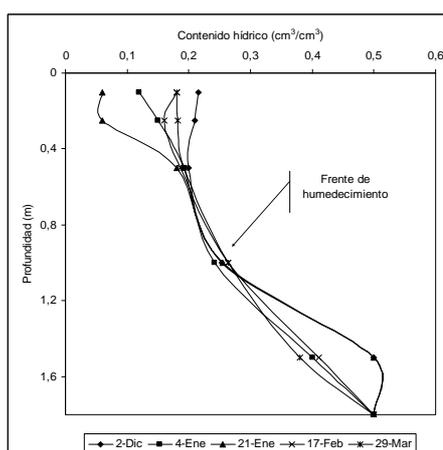


Fig. 10. Perfiles hídricos en cinco momentos del ciclo del cultivo. Las fechas mostradas corresponden a las siguientes etapas del cultivo: 2 Dic (siembra), 4 Ene (V2), 21 Ene (R1), 17 Feb (R5) y 29 Mar (R8) en la escala fenológica de Fehr y Caviness (1977).

Si bien, en la mayoría de los instantes del cultivo mostrados en la Fig. 10 el contenido hídrico del suelo en los primeros 0.2 m estuvo por encima de 0.1 cm³/cm³, es relevante destacar que las curvas correspondientes al 4 y 21 de enero son las que mostraron un menor contenido hídrico. Esta última, especialmente, es de mayor importancia por corresponderse con la etapa de floración del cultivo habiéndose medido un contenido hídrico del suelo de 0.06 cm³/cm³.

Por debajo de los 0.5 m de profundidad, la cantidad de agua retenida en el suelo aumenta gradualmente hasta el punto de saturación ubicado a 1.6 m. Al mismo tiempo, se advierte a partir de los 0.8 m de profundidad la presencia del frente de humedecimiento ya que el suelo

se encontró a capacidad de campo durante todo el período experimental, situación que fue corroborada reiteradas veces a campo por medio de observaciones visuales realizadas en calicatas y muestras de suelo obtenidas con barreno.

ii Salinidad y pH del suelo

En la *Tabla 4* se presentan los resultados de la conductividad eléctrica de los extractos de saturación y el pH del perfil en tres etapas del cultivo.

Tabla 4. Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_{ES}) y pH.

Horizontes (cm)	<i>Siembra</i>		<i>Floración (R1)</i>		<i>Llenado de grano (R5)</i>	
	CE_{ES} (dS/m)	pH (2.5:1)	CE_{ES} (dS/m)	pH (2.5:1)	CE_{ES} (dS/m)	pH (2.5:1)
Ap (0 – 12)	0.394	6	1.349	6.47	0.673	6.43
A1 (12 – 22)	0.5	6.08	0.953	6.3	0.354	6.54
AC (22 – 44)	0.558	5.91	0.519	6.02	0.438	6.59
C (44 + cm)	0.597	6.48	0.593	8.38	0.529	7.19

En el estadio de floración se observa un aumento de la CE_{ES} coincidente con un momento de balance hídrico negativo. La disminución en el contenido hídrico del suelo produce una concentración de sales en la rizósfera. Este efecto ha sido reportado por Barrett Lannard (2002). En el estadio de llenado de grano se observa un incremento de la CE_{ES} pero de menor magnitud que en el estadio anterior.

Con respecto a la concentración de sales en la zona radical, no superó los 2 dS/m establecido por Katerji *et al.* (2003) como umbral por lo que se asume que no se ha afectado la producción de soja.

En cuanto al pH, no se han medido valores extremos que puedan ser perjudiciales para el cultivo. En el estadio de floración, se percibe un aumento en pH del último horizonte.

III.1.2.d. Capa freática

En lo concerniente a la profundidad y salinidad de la capa freática (*Figs. 11 y 12*), se observa que la misma se mantuvo siempre por encima de los 2 m de profundidad. La profundidad media fue de 1.62 m con extremos de 1.38 m (16 de diciembre) y 1.85 m (24 de febrero y 3 de marzo).

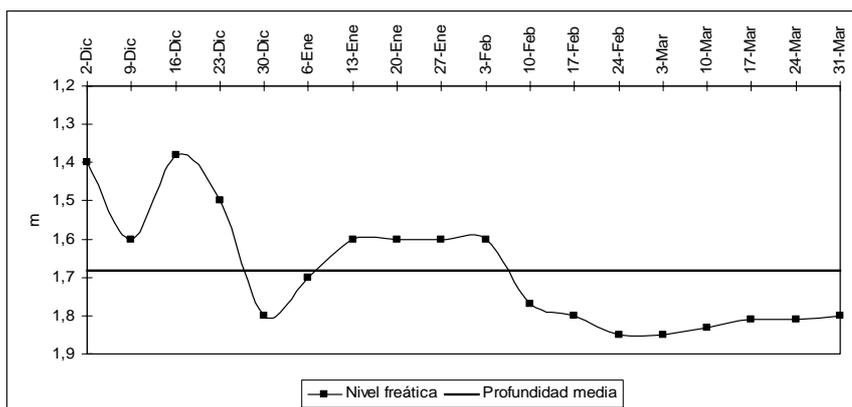


Fig. 11. Dinámica de la profundidad de la capa freática durante el periodo de estudio.

En cuanto a la salinidad (Fig. 12) fluctuó por encima de los 9 dS/m con un valor medio de 8.28 dS/m y un valor mínimo y máximo de 7.5 (24 de febrero) y 8.9 dS/m (9 de diciembre), respectivamente.

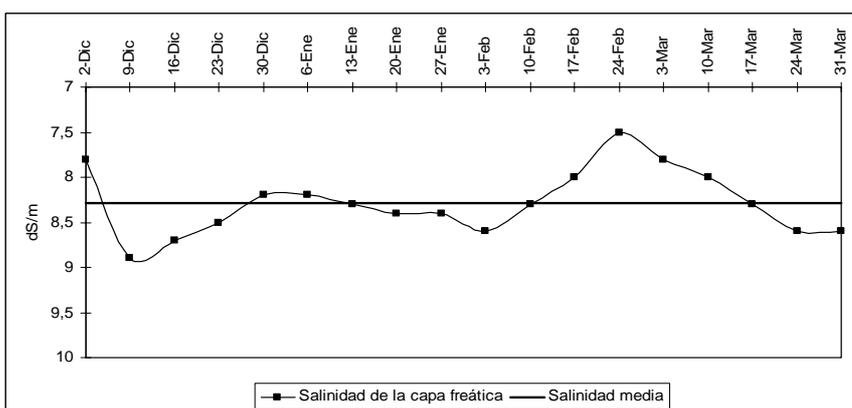


Fig. 12. Dinámica de la salinidad de la capa freática durante el periodo de estudio.

Es conveniente recordar que la salinidad máxima permitida para el agua de riego es de 6 dS/m (Luters y Salazar Lea Plaza, 2000). Por lo que no es aconsejable utilizar el esta agua para riego.

III.2. Procesamiento y análisis de la información

III.2.3. Relación funcional entre variables climáticas y dinámica de la capa freática

III.2.3.a. Relación entre la profundidad – salinidad de la capa freática y el balance hídrico

En la Fig. 13 se muestran la relación entre la profundidad de la capa freática y el balance hídrico durante el ciclo del cultivo.

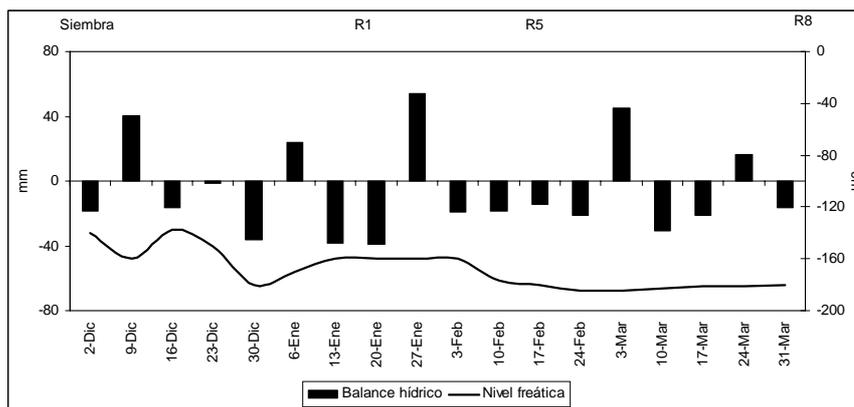


Fig. 13. Relación entre la profundidad de la capa freática y el balance hídrico durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológico en la escala de Fehr y Caviness, 1977).

Los resultados indican que no existe una respuesta directa en la oscilación de la capa freática con respecto al balance hídrico tal lo reportado por Cisneros (1994). El análisis de correlación entre el diferencial de profundidad de la capa freática (ΔNF) y el balance hídrico local tomado en períodos quincenales manifiesta que el balance hídrico solo puede explicar en un 22% las variaciones del nivel freático por lo que este tipo de balance no se muestra como un adecuado predictor del nivel freático en condiciones similares a las experimentales.

Ello parece indicar que la variación del nivel freático estaría más influenciado por las recargas regionales que por las locales. Por lo tanto, es menester tener en cuenta dichos flujos de recarga en estudios posteriores.

En cuanto a la salinidad de la capa freática y su relación con el balance hídrico (Fig. 14), se observa que ambas no están claramente vinculadas.

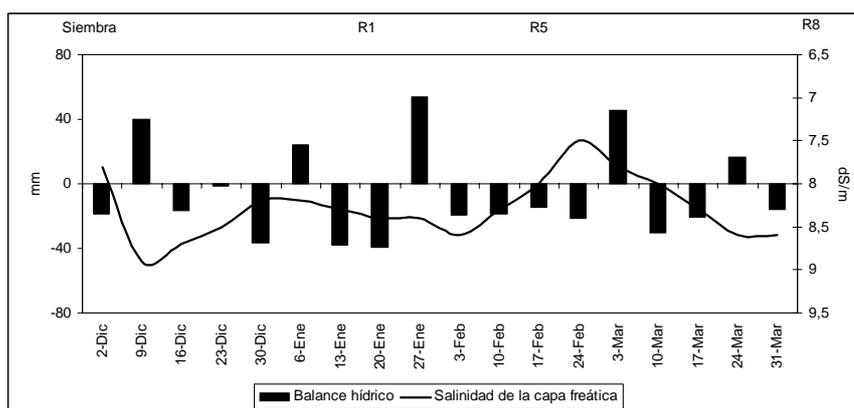


Fig. 14. Relación entre la salinidad de la capa freática y el balance hídrico durante el período del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológico en la escala de Fehr y Caviness, 1977).

Si bien, en algunos momentos se observa una respuesta inversa entre el balance hídrico y la salinidad de la capa freática, ésta no es constante. El análisis de correlación entre el

balance hídrico y el diferencial de salinidad (Δ Salinidad) tomado en períodos quincenales arrojan un valor de 0.4. Hipotéticamente, se podría pensar en un balance de sales entre el perfil de suelo y la capa freática en donde un período de balance hídrico positivo produciría un lavado de sales del perfil contribuyendo a aumentar la salinidad de la capa freática. Por el contrario, en un período de balance hídrico negativo el ascenso capilar desde la capa freática actuaría como medio para el transporte de sales produciendo una disminución del contenido salino de la capa freática.

III.2.3.b. Relación de la salinidad y la profundidad de la capa freática

En la *Fig. 15* se presenta la relación existente entre la salinidad y la profundidad de la capa freática.

Se manifiesta una tendencia negativa entre la profundidad de la freática y la salinidad, con un coeficiente de correlación de - 0.62. Similares resultados han sido reportado por Lavado y Taboada (1988).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el punto 3.2.a.i surge la conjetura que si la variación del nivel freático estuviera explicado, en su mayor parte, por la recarga - descarga del acuífero regional el cual es altamente salino podría revelar que ante un ascenso de la capa freática traería aparejado una elevación del contenido salino de la misma y viceversa.

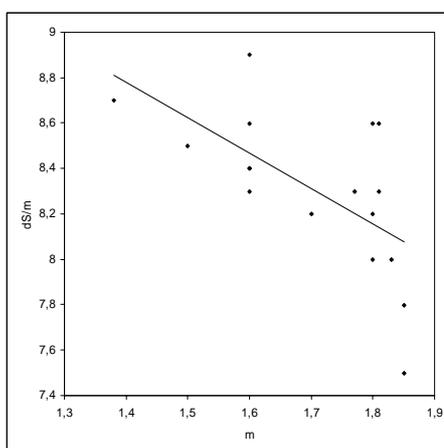


Fig. 15. Relación entre la salinidad y la profundidad de la capa freática.

Por consiguiente, la dinámica de la salinidad de la capa freática podría estar explicada, en parte, por el hídrico local - salinidad y, otra parte, por la dinámica de la capa freática en función de la recarga y descarga regional.

III.2.4. Modelos de simulación

III.2.4.a. Resultados y análisis de datos obtenidos con el modelo de Producción de Granos

Dado que el modelo se basa en la relación transpiración – asimilación de carbono, se inicia analizando la evolución de la ET_C y ET_C actual (Fig. 16) estimada durante el ciclo del cultivo. En ella se puede observar una pequeña disminución de la ET_C actual producto del estrés (K_S alrededor de 0.4) en los primeros días luego de la siembra y otra, de mayor magnitud, durante el período de floración. De acuerdo a Andrade *et al.* (2002), en soja, la cantidad de flores diferenciadas y el número de semillas por planta son proporcionales a la disponibilidad de recursos por planta durante un amplio período reproductivo. Un estrés hídrico concentrado durante la floración temprana (R1-R2) produce, en general, menor efecto en el número de semillas por metro cuadrado y en el rendimiento. Esto se debe a que el cultivo sigue floreciendo una vez aliviado el estrés con una menor tasa de aborto de flores y vainas (Andriani *et al.*, 1991) por lo que es de esperarse una baja afección sobre la producción.

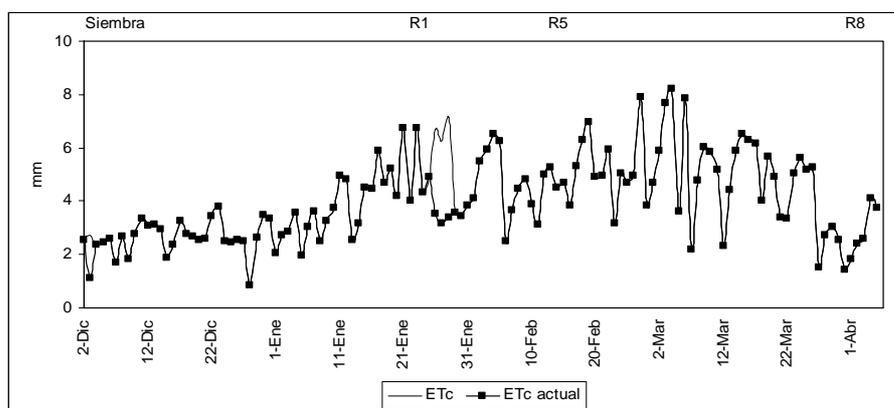


Fig. 16. Evapotranspiración del cultivo potencial y actual durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas del cultivo en la escala de Fehr y Caviness, 1977).

Esta diferencia entre la ET_C y ET_C actual se puede observar en el cálculo de la cantidad de agua disponible para el cultivo (ADC), la cantidad de agua fácilmente disponible ($AFDC$) y la disminución de agua del suelo (D_r) durante el ciclo del cultivo (Fig. 17).

En estos resultados se advierte que, según lo calculado por el modelo, la mayor parte del ciclo de crecimiento del cultivo la cantidad de agua disponible para la planta permaneció por encima del umbral de agua fácilmente disponible. A excepción del período próximo a floración en el cual el contenido hídrico del suelo desciende por debajo de $AFDC$ afectando la ET_C actual.

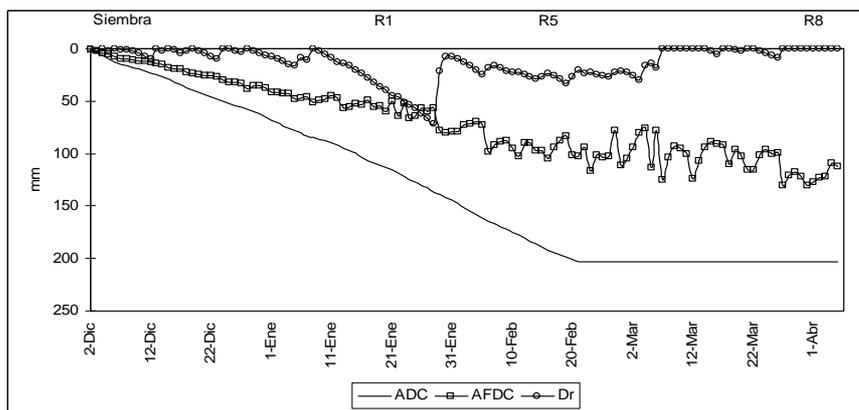


Fig. 17. Cantidad de agua disponible para el cultivo (ADC), agua fácilmente disponible (AFDC) y disminución del agua en la zona radical (Dr) durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas en la escala de Fehr y Caviness, 1977).

Un aspecto particular es observar como se relaciona el crecimiento radical con la cantidad de agua que asciende capilarmente hacia el punto medio del volumen de raíces (variables estimadas por el modelo) y la profundidad medida de la capa freática (Fig. 18).

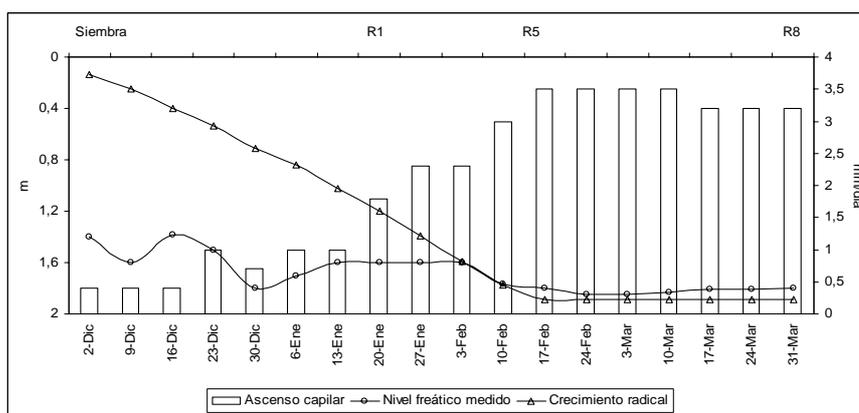


Fig. 18. Ascenso capilar diario, profundidad del sistema radical y de la capa freática durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas en la escala de Fehr y Caviness, 1977).

La tasa estimada de ascenso capilar fluctuó, en un primer momento, de 0.4 mm/día hasta un 1 mm/día cuando la freática se encontró a profundidad crítica. Cuando la profundidad de las raíces superó el metro aumentó considerablemente la tasa de ascenso capilar llegando a ser de 3.5 mm/día durante la etapa de llenado de grano momento en el cual el sistema radical alcanzó su máxima profundidad.

En cuanto a la curva de crecimiento radical (Fig. 18) exhibe una profundidad máxima de 1.7 m. Este resultado es semejante a las profundidades de enraizamiento descritas en la bibliografía (Norman, 1983; Borg y Grimes, 1986; Stockle y Nelson, 1996).

El desarrollo radical muestra un crecimiento lineal desde el comienzo de la simulación hasta aproximadamente la etapa de llenado de grano a una tasa crecimiento de 2.1 cm/día. Al respecto, Dardanelli *et al.* (2004) señala que la profundidad de raíces de soja, medida en forma directa, creciendo en suelos sin limitaciones físicas muestran un patrón sigmoideo que alcanzan la máxima profundidad cuando comienza el llenado de los granos. La velocidad de profundización en la etapa lineal de la curva fue de 2.8 cm/día.

La profundidad del sistema radical ha permitido, de acuerdo a lo estimado, que las raíces estuvieran en contacto con la capa freática durante gran parte del ciclo (*Fig. 19*). Además, se debe tener en cuenta que por encima del nivel basal de la capa freática el contenido hídrico del suelo es muy cercano a saturación.

Esta afirmación permite suponer, amén de lo observado en la *Fig. 10*, que en la mayor parte del período de estudio se registraron importantes gradientes de potencial hídrico entre la capa freática y las capas de suelo suprayacentes. Conforme a lo planteado en la ley de Darcy, es esperable que la capa freática haya aportado agua prácticamente durante todo el ciclo del cultivo con variaciones en la tasa de ascenso capilar que podría estar regulada por la tasa de absorción del sistema radical.

A tales efectos, Hess *et al.* (2000), Jorenush y Sepaskhah (2003), Raes y Deproost (2003), Hurst *et al.* (2004) y Mueller *et al.* (2005) comentan que la tasa de ascenso capilar está fuertemente vinculada a la profundidad del sistema radical.

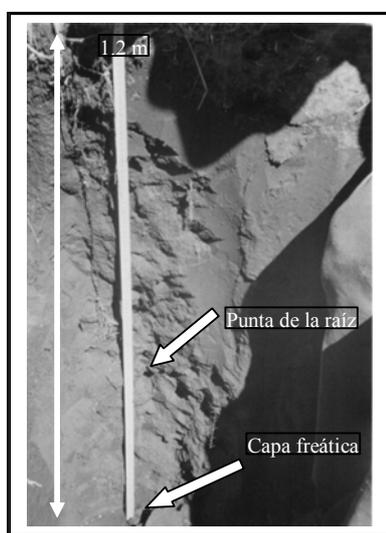


Fig. 19. Raíz principal de una planta de soja profundizando hasta casi tomar contacto con la capa freática.

Jones *et al.* (1991) atestiguan que la soja es un cultivo sensible a la falta de aireación provocada por la saturación del suelo. El contacto de las raíces con el suelo a saturación muestra una respuesta al déficit de oxígeno que provoca el incremento de las resistencias a la

permeabilidad de las membranas resultando en la inhibición de la división y elongación celular y, por consecuencia, del crecimiento radical (Campbell, 1985).

En lo que respecta al balance hídrico global, en la *Tabla 5* se muestran componentes calculados por el modelo en valores mensuales acumulados.

Tabla 5. Precipitación total y efectiva, ETP, $ET_{C\text{ actual}}$, ascenso capilar y variación de almacenaje acumulados mensualmente.

	<i>Precipitación (mm)</i>	<i>Precipitación Efectiva (mm)</i>	<i>ETP (mm)</i>	<i>$ET_{C\text{ actual}}$ (mm)</i>	<i>$ET_{C\text{ actual}}/ETP$</i>	<i>Ascenso Capilar (mm)</i>	<i>Variación de Almacenaje (mm)</i>
Diciembre	110.6	87.7	100.4	78.1	1.1	14.0	-2.2
Enero	187.3	144.2	215.0	121.5	0.6	58.0	27.8
Febrero	57.0	45.0	135.9	138.1	0.3	100.0	-10.7
Marzo	162.2	133.1	178.6	162.0	0.7	111.8	5.0
Total	517.1	409.9	629.8	499.8	0.7	283.8	19.9

La precipitación efectiva, durante el ciclo, fue un 79% de la precipitación total (517 mm) mientras que la $ET_{C\text{ actual}}$ totalizó 499.9 mm. La evapotranspiración potencial calculada durante el ciclo del cultivo fue de 629.8 mm de los cuales el 79% fue evapotranspirado por el cultivo. Según este balance el cultivo necesitó de 90 mm que en principio deben haber sido aportados por la freática. En tal sentido, el ascenso capilar a lo largo del ciclo, fue de aproximadamente 284 mm.

La cantidad de agua retenida en el suelo no presentó grandes diferencias en el transcurso del ciclo del cultivo. El balance hídrico del suelo mostró un aumento de 19.9 mm en el agua almacenada al final del ciclo de la soja.

Esto indicaría que la capa freática potencialmente podría haber contribuido en aproximadamente un 43% del total de agua evapotranspirada por el cultivo. De acuerdo a los cálculos efectuados por el modelo, es presumible que la capa freática contribuyó realmente con un 18% del agua consumida por el cultivo.

A tales efectos, varios autores (Grismer y Gates, 1988; Racca *et al.*, 2001; Kang *et al.*, 2002) reportan que la capa freática puede ser un importante recurso de agua para el cultivo. Mueller *et al.* (2005) han medido aportes de agua de la capa freática de 100-400 mm y 20-250 mm en maíz y trigo, respectivamente.

Por otra parte, Kang *et al.* (2001) indican que con profundidades de capa freática que oscilan entre los 0.5 y 2.5 m la contribución fue de aproximadamente un 33 y un 50% de la evapotranspiración para maíz y trigo, respectivamente. En Argentina, Dardanelli y Collino (2002) han estimado que una capa freática situada a una profundidad aproximada de 6 m suplía hasta el 23% del consumo de agua anual de un cultivo de alfalfa para corte.

En estudios de campo, Kahlow *et al.* (2005) indican que la profundidad óptima de la capa freática para que permita un máximo rendimiento es 2 m para maíz y girasol, y 1.5 m para trigo.

Mejia *et al.* (2000), conduciendo estudios en lisímetro sobre el efecto de la capa freática en la producción de cultivos, aseveran que una profundidad de la freática de 0.75 m es recomendada para la producción de maíz y soja. Similares valores de profundidad de freática son publicados por Sarwar (2002) para soja.

A nivel de campo, a diferencia de los lisímetros, la capa freática posee un comportamiento dinámico, por lo que la profundidad recomendada es aproximadamente el doble de la dada para los lisímetros (Mueller *et al.*, 2005).

En la *Tabla 6* se presentan los resultados de la producción de biomasa estimados con y sin estrés y la producción medida para los estadios de floración y llenado de grano.

La estimación de la producción de biomasa, con el volumen de agua evapotranspirada (ET_C) y empleando una eficiencia de uso del agua para producir biomasa de 26.1 Kg./ha.mm evapotranspirado (Della Maggiora *et al.*, 2002), es posible lograr una producción de biomasa sin estrés, al momento de la floración y llenado de grano, de 4184 y 7588 Kg./ha, respectivamente.

Tabla 6. Producción de biomasa con y sin estrés estimada y medida en floración y llenado de grano.

	<i>Producción estimada sin estrés hídrico</i>	<i>Producción estimada con estrés hídrico</i>	<i>Producción medida</i>
Floración (Kg./ha)	4184	4142	2190
Llenado de grano (Kg./ha)	7588	7285	5270

La producción de biomasa estimada por la ET_C actual para el estadio de floración y llenado de grano fue de 4142 y 7285 Kg/ha, respectivamente. Es decir, la producción de biomasa estimada con estrés resultó inferior en un 1 y 4% en los estadios de floración y llenado de grano, respectivamente.

Estos valores indican que la producción de biomasa calculada por la ET_C actual (con estrés) sobreestima en aproximadamente 2000 Kg./ha, en ambos estadios fenológicos, a la producción de biomasa medida.

Estos valores revelan que, según lo simulado por el modelo, el cultivo no sufrió pérdidas considerables de producción debido a estrés hídrico. Esto llevaría a pensar que el suelo estuvo bien provisto de agua durante la mayor parte del ciclo del cultivo razón que es posible verificar en la *Fig. 10*.

En la *Tabla 7* se presenta el rendimiento estimado con y sin estrés hídrico y el medido.

Tabla 7. Rendimiento estimado con y sin estrés hídrico y medido.

	Producción estimada sin estrés hídrico	Producción estimada con estrés hídrico	Producción medida
Rendimiento (Kg./ha)	6000	5800	5441

El rendimiento en grano sin estrés hídrico ha sido de 6000 Kg./ha asumiendo la eficiencia de uso de agua ya citada y un índice de cosecha de 0.45 (Dardanelli *et al.*, 2004). Similares valores de producción potencial son mostrados por Fauconier (1986) y Cárcova *et al.* (2004) para soja. En ensayos llevados a cabo en la zona, en condiciones de campo, se han obtenido rendimientos máximos de 3400 Kg./ha (INTA, 2004) y 4850 Kg./ha (Fuentes, 2005). Por otra parte, el rendimiento en grano estimado con estrés hídrico fue 5800 Kg./ha lo que resultaría en un 3.3% menor al rendimiento sin estrés hídrico y 350 Kg./ha mayor al rendimiento medido (6%).

i Validación del modelo

Para la evaluación de la capacidad predictiva de los modelos es imperante efectuar la validación del mismo contrastando algunas de las variables estimadas con las observadas. En este caso se evaluó la bondad de ajuste del modelo mediante la comparación de tres variables, a saber: contenido hídrico de la zona radical, profundidad de la capa freática y producción de grano.

- Contenido hídrico de la zona radical

La cantidad de agua disponible para el cultivo estimada y medida con los sensores potenciométricos es presentada en la Fig. 20. La cantidad de agua disponible en la zona radical estimada tiene un coeficiente de correlación de 0.99 y un error estándar de ajuste (S_e) de 1.80 mm con los valores medidos.

Por otra parte, el contenido hídrico del suelo estimado, expresado como m^3/m^3 , tiene un S_e de $0.054 m^3/m^3$.

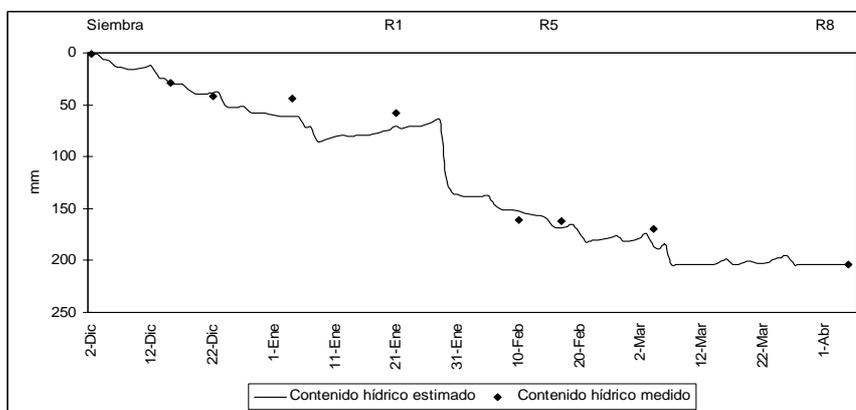


Fig. 20. Cantidad de agua disponible en la zona radical estimada y medida durante el ciclo del cultivo (Siembra, R1, R5 y R8 son etapas fenológicas en la escala de Fehr y Caviness, 1977).

El muy buen ajuste logrado en esta variable hace presuponer que la mayor parte de los componentes del balance hídrico han sido bien calculados por el modelo. Lo que implicaría la ratificación de la base sobre la cual el modelo fundamenta el cálculo de la producción.

- Profundidad de la capa freática

Las profundidades de la capa freática estimada y medida se presentan en la Fig. 21.

Los valores de nivel freático estimados siguen la tendencia de las profundidades medidas. El coeficiente de correlación es de 0.66 mientras que el estadístico S_e es de 0.26 m. Este resultado es un 50% mayor al error obtenido por Degioanni *et al.* (2005) al utilizar el modelo *Freat.1* para estimar las oscilaciones del nivel freático.

Este resultado es lógico si se tiene en cuenta lo señalado en el epígrafe 3.2.a y la forma en que el modelo calcula el ascenso y descenso del nivel freático. Debido a ello, al modelar la dinámica de la capa freática es necesario tener en cuenta los aportes producidos por la freática regional.

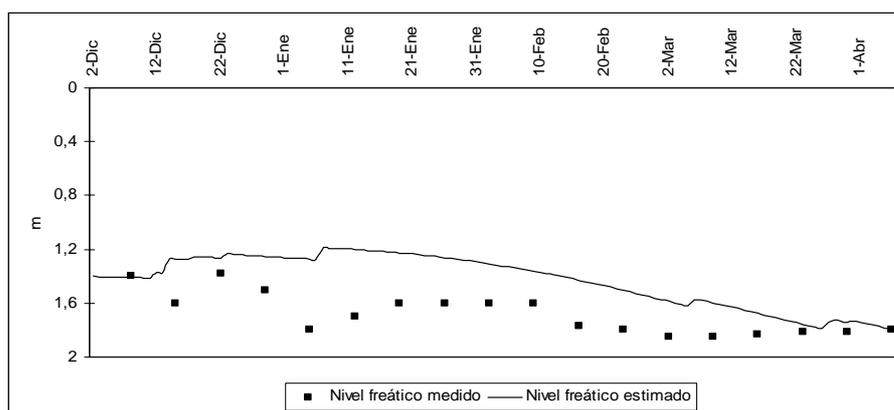


Fig. 21. Nivel freático estimado y medido durante el ciclo del cultivo.

- Producción de grano

La producción en biomasa estimada y medida arroja diferencias considerables las cuales pueden ser ocasionadas por emplear EUA constante y calculadas en diferentes condiciones de campo. En cuanto a la producción de grano, se obtuvo una diferencia de 6% entre lo estimado y medido lo cual es un indicador muy alentador sobre la capacidad predictiva del modelo.

Los resultados obtenidos en la validación del modelo muestran que la capacidad predictiva del mismo es satisfactoria para calcular el balance hídrico y estimar la producción en grano del cultivo de soja en condiciones similares a la de esta experiencia.

III.2.4.b. Modelo Soil Water Balance

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación realizada con el modelo *Soil Water Balance* -SWB- (Marcos y Campbell, 2002).

Los parámetros ingresados al modelo fueron, en el caso del cultivo, los recomendados por Stockle y Nelson (1996), Pilatti *et al.* (1999) y Andrade *et al.* (2002). Los datos climáticos y de suelo son los presentados en los epígrafes 3.1.b.i y 3.1.a, respectivamente.

El período simulado fue del 30 de noviembre del 2004 hasta el 6 de abril del 2005. La fecha de siembra fue el 2 de diciembre y la de madurez fisiológica, estimada por el modelo, el 2 de abril.

La precipitación total, del período simulado, fue de 517 mm con una precipitación efectiva de 445 mm. La evapotranspiración potencial fue de 512 mm y la real de 445 mm de los cuales el 45% fue transpiración del cultivo y el resto evaporación.

En cuanto a la evolución fenológica del cultivo, el modelo estimó correctamente los estadios de emergencia, floración y madurez fisiológica (± 3 días).

En la *Tabla 8* se exhibe la producción de biomasa simulada y medida.

Tabla 8. Producción de biomasa simulada y medida.

	Simulado	Medido	Diferencia
Floración (Kg./ha)	944	2190	1246
Llenado de grano (Kg./ha)	3640	5270	1630

En floración, la biomasa estimada fue un 57% menor a la medida mientras que para el estadio de llenado de grano, la biomasa simulada fue un 31% menor a la medida.

En la *Tabla 9* se observa el rendimiento simulado y medido.

Tabla 9. Rendimiento simulado y medido.

	Simulado	Medido	Diferencia
Rendimiento (Kg/ha)	5888	5441	447

El rendimiento en grano simulado fue de 5888 Kg./ha mientras que el medido fue de 5441 Kg./ha, es decir, el rendimiento simulado es un 8% mayor al medido.

Estos valores indican que el modelo es capaz de predecir correctamente la producción en granos del cultivo pero no así la producción en biomasa debido a las importantes diferencias encontradas entre la biomasa simulada y la medida a campo.

La profundidad de la capa freática simulada (*Fig. 22*) muestra seguir la tendencia de los valores medidos. El nivel freático medio estimado fue de 1.50 m con un máximo y mínimo de 1.7 (27 de febrero) y 1.25 (11 de enero).

Lo observado en la *Fig. 22* muestra que la profundidad de la capa freática estimada tiene una tendencia a sobreestimar los valores medidos. Los parámetros estadísticos indican que existe un error estándar de ajuste de 0.23 m con un coeficiente de correlación de 0.43.

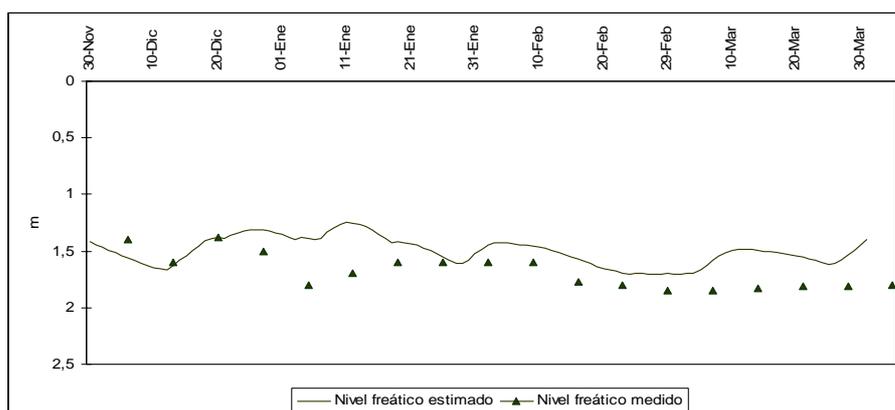


Fig. 22. Profundidad de la capa freática simulada y medida.

El *SWB*, a diferencia del modelo *Producción de Granos*, ha subestimado la producción de biomasa pero ambos han calculado satisfactoriamente la producción en grano. En cuanto a la estimación de la profundidad de la capa freática los dos modelos mostraron un ajuste similar.

IV. CONCLUSIÓN

En el estudio de los sistemas agrícolas, es imperante cuantificar la disponibilidad de recursos a fin de poder determinar cuál de ellos es el que limita la expresión del potencial productivo de los cultivos. En ambientes donde la agricultura de secano es la principal forma de producción, es relevante evaluar y comprender el funcionamiento de las variables ambientales y de manejo, especialmente el referido al balance de agua y su relación con la producción.

Lo verificado en esta investigación señala que, en ambientes con capa freática somera similares a las de esta experiencia, se origina una estrecha relación entre la producción de soja y la capa freática. De acuerdo a los resultados obtenidos con los modelos de simulación, contrastados con las variables medidas a campo, la capa freática ha contribuido a la necesidad de agua evapotranspirada por el cultivo.

La profundidad a la cual fluctuó la capa freática permitió que las raíces alcanzaran la zona de saturación restringiendo la posibilidad de que el cultivo se vea afectado por estrés hídrico razón que se evidencia al observar la producción del cultivo. Por otra parte, la salinidad de la capa freática no mostró ser un factor limitante en la producción dado que no se produjo una acumulación significativa de sales en el perfil que pudiesen afectar el crecimiento de las plantas.

Conforme a estas deducciones en un escenario climático con precipitaciones deficitarias y con la influencia de una capa freática próxima a la superficie y con un bajo contenido salino es posible mantener y hasta aumentar los rendimientos hasta aproximarlos a los rendimientos potenciales.

De aquí se desprende la idea de comprender la dinámica del nivel y la salinidad de la capa freática. El análisis realizado entre las variables profundidad y salinidad de la capa freática y el balance hídrico local mostró un bajo grado de significancia mientras que la relación salinidad – profundidad de la capa freática reveló un aceptable nivel de ajuste.

Estos resultados exteriorizan un comportamiento complejo del sistema clima-suelo-cultivo-capo freática en el cual se evidencia la interacción conjunta de factores de escala local y regional.

El modelo de *Producción de Granos*, de base matemática de origen empírico, arrojó resultados aceptables en cuanto a la estimación de la producción de biomasa del cultivo

mientras que la estimación de la producción de granos fue muy buena. El excelente grado de ajuste conseguido en la estimación del contenido hídrico de la zona radical da certeza de la fidelidad de los cálculos realizados por el modelo. La estimación de la profundidad de la capa freática evidenció un error de ajuste aceptable teniendo en cuenta la complejidad dada en la dinámica del nivel freático y la base matemática de cálculo. Por lo tanto se concluye que el modelo tiene una adecuada capacidad predictiva para las situación experimental de esta investigación.

Por su parte, el *Soil Water Balance* con su base biofísica aportó resultados buenos en lo relativo a la estimación de la producción de biomasa del cultivo. La estimación del rendimiento en granos simulados por el modelo ostentó valores similares a los obtenidos con el modelo *Producción de Granos* manifestando la buena predisposición del modelo para la estimación del rendimiento del cultivo. La estimación de la profundidad de la capa freática resultó ser afín a la realizada por el otro modelo. Si bien este modelo se empleó como una fuente de referencia para el de *Producción de Granos*, con este trabajo se avanzó en las primeras instancia para su calibración.

Consiguientemente, los modelos de simulación empleados han permitido integrar correctamente las variables climáticas, de suelo, capa freática y cultivo. Por lo que, es factible emplear ambos modelos como herramienta para integrar un amplio conjunto de variables ambientales que hacen a la producción y predecir el comportamientos de situaciones complejas, en vista a la producción, elección de uso y manejo para diferentes áreas con distinta capacidad productiva.

Finalmente, de acuerdo a la hipótesis planteada es posible afirmar que “*una capa freática somera es una fuente de agua alternativa en un ciclo deficitario de precipitaciones bajo determinado rango de oscilación de profundidad y contenido salino*”.

V. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo contribuye a la generación de varias líneas de investigación que permiten explorar a fondo el funcionamiento del sistema clima – suelo – cultivo y lograr una integración de las principales variables. A continuación se presenta una descripción escueta de las posibles líneas de investigación.

- Evaluación de la relación entre las variables climáticas (precipitación y evapotranspiración) y la profundidad y salinidad de la capa freática en un sistema de producción agrícola mediante un modelo de simulación numérica.
- Comprender el funcionamiento de los ciclos de precipitación y su vinculación con la dinámica del nivel freático en zonas de capa freática somera.
- Evaluar el efecto de una capa freática próxima a la superficie en la producción de cultivos en suelos de clase de aptitud agrícola marginales.
- Evaluar cuantitativamente el balance hídrico y de sales en suelos de aptitud agrícola marginales como un indicador del riesgo de anegamiento y salinización.
- Implementación de tecnologías de manejo de suelo y cultivo en ambientes con capa freática somera.

VI. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ALLEN, R., L. PEREIRA, D. ROES Y M. SMITH. 1998. *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. FAO - Irrigation and Drainage, Roma, Italia.
- ANDRADE, F., L. A. AGUIRREZÁBAL Y R. H. RIZALLI. 2002. Crecimiento y rendimiento comparado. En: Andrade, F. Y V. Sadras (eds), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA INTA Balcarce - F.C.A. U.N.M.P., Balcarce, Argentina.
- ANDRIANI, J. M., F. H. ANDRADE, E. E. SUERO Y J. L. DARDANELLI. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. 1. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11: 737-746.
- BAIGORRI, H. 2003. *Red de evaluación de cultivares de soja. Resultados de la campaña 2002/03*. RECSO - EEA Marcos Juárez.
- BARRETT LANNARD, E. 2002. Restoration of saline land through revegetation. *Agric. Water Manage.* 53 213-226.
- BEYAZGÜL, M., Y. KAYAM Y F. ENGELSMAN. 2000. Estimation methods for crop water requirements in the Gediz Basin of western Turkey. *J. Hydrol.* 229: 19-26.
- BORG, H. Y D. W. GRIMES. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. *Trans. ASAE* 29: 194-197.
- CAMPBELL, G. S. 1985. *Soil physics with basic: Transport models for soil-plant systems*. Elsevier Science Publishing Company, New York, USA.
- CAPITANELLI, E. 1979. *Geografía física de la provincia de Córdoba*. Editado por la Fundación del Banco de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- CÁRCOVA, J., L. G. ABELEDO Y M. LOPÉZ PEREIRA. 2004. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: Satorre, E., A. Vence, G. Slafer, E. de la Fuente, D. Miralles, M. Otegui Y R. Savin (eds), *Producción De Granos. Bases Funcionales Para Su Manejo*. Editorial FAUBA, Buenos Aires, Argentina.
- CISNEROS, J. J. 1994. *Caracterización del hidromorfismo en ambientes representativos del centro - sur de Córdoba*. Tesis Magíster Scientiae en Ciencias de Suelo. Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- CISNEROS, J. J., A. DEGIOANNI, H. GIL, J. J. CANTERO, A. CANTERO G, V. BECERRA, S. RANG, A. MILANESIO Y A. CHIAPPAROLI. 2001. *Distrito de ordenamiento ambiental en el sudeste de Córdoba*. Convenio UNRC - DPSyOH Buenos Aires, Río Cuarto, Argentina.

- CISNEROS, J. J., J. J. CANTERO Y A. CANTERO G. 1997. Relaciones entre la fluctuación del nivel freático, su salinidad y el balance hídrico, en suelos salinos - sódicos del centro de Argentina. *Rev. Universidad Nacional de Río Cuarto* 17: 23-35.
- DARDANELLI, J. L. Y D. COLLINO. 2002. Estimation of the water table contribution to alfalfa crops in the Argentinean Pampa Region. *Agriscientia* 19: 11-18.
- DARDANELLI, J. L., D. COLLINO, E. OTEGUI Y V. SADRAS. 2004. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción en los cultivos de grano. En: Satorre, E., R. Benech Arnold, G. Slafer, E. de la Fuente, D. Miralles, M. Otegui Y R. Savin (eds), *Producción De Granos. Bases Funcionales Para Su Manejo*. Editorial FAUBA, Buenos Aires, Argentina.
- DE LAAT, P. J. 1995. Design and operation of a subsurface irrigation scheme with MUST. En: Pereira, L. S.; van den Broek, B.; Kabat, P. y R. G. Allen (eds.). *Crop – Water Simulation Models in Practice*. Wageningen Pers, The Netherlands.
- DEGIOANNI, A., J. J. CISNEROS, A. CANTERO G Y S. RANG. 2005. Simulación del nivel freático en suelos con riesgo de anegamiento. En: *XXº Congreso Nacional del Agua*. Mendoza, Argentina.
- DEGIOANNI, A., J. J. CISNEROS, J. MARCOS Y A. CANTERO G. 2002. Balance hidrológico en una cuenca representativa de las llanuras del sur de Córdoba, Argentina. *Rev. Universidad Nacional de Río Cuarto* 22: 15-26.
- DELLA MAGGIORA, A. I., J. M. GARDIOL Y A. I. IRIGOYEN. 2002. Requerimientos hídricos. En: Andrade, F. & V. Sadras (eds), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA INTA Balcarce - F.C.A. U.N.M.P., Balcarce, Argentina.
- DESCLAUX, D., T.-T. HUYNH Y P. ROUMET. 2000. Identification of Soybean Plant Characteristics That Indicate the Timing of Drought Stress. *Crop Sci.* 40: 716-722.
- DONATELLI, M. Y M. ACUSTIS. 2003. *SOILPAR. Soil parameters estimate. Version v 2.00*. Research Institute for Industrial crops, Bologna, Italia.
- DOORENBOS, J. Y W. O. PRUITT. 1975. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO. Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Italia.
- ETCHEVEHERE, P. 1976. *Normas de reconocimientos de suelos. Depto. Suelos*. INTA, Argentina.
- FAUCONIER, D. 1986. Soya. Fertilising for high yield. *IPI. Bulletin* 1: 3-60.
- FEHR, W. R. Y C. E. CAVINESS. 1977. *Stages of Soybean Development*. Special Report 80. Iowa State University, Iowa, USA.
- FUENTES, F. H. 2005. *Crecimiento y desarrollo de cultivares de soja de grupos de madurez II al VIII en diferentes fechas de siembra en Marcos Juárez durante la campaña 2004/05*. EEA - INTA Marcos Juárez.
- GEE, G. W. Y J. W. BAUDER. 1986. Particle size analysis. En: Klute, A. (ed), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph 9. ASA and SSSA, Wisconsin, USA.

- GORGAS, J. A. Y J. L. TASSILE. 2003. **Los suelos. Recursos naturales de la provincia de Córdoba**. Agencia Córdoba Ambiente. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Córdoba, Argentina.
- GRISMER, M. E. Y T. K. GATES. 1988. Estimating saline water table contribution to crop water use. *Calif. Agric.* 42: 23-24.
- HESS, T.; LEEDS-HARRISON, P. Y C. COUNSELL. 2000. **WaSim. Technical Manual**. HR Wallingford – Cranfield University, Oxfordshire, Inglaterra.
- HURST, C. A.; THORBURN, P. J.; LOCKINGTON, D. Y K. L. BRISTOW. 2004. Sugarcane water use from shallow water tables: implications for improving irrigation water use efficiency. *Agric. Water Manage.* 65:1-19.
- INTA Y SMAGYRR. 1987. **Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja Laboulaye**. Editorial Fundación Banco de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- INTA. 2004. **Ensayo varietal de soja** -U. E. E. Laboulaye.
- JENSEN, R. A., M. MARAZZI, J. SAVIOLI, J. BREA Y H. TAVECCHIO. 2000. **Diagnóstico de inundación en la región NE de La Pampa, Argentina**. Informe técnico Danish Hydraulic Institute - Gobierno de la provincia de La Pampa.
- JONES, A. C., W. L. BLAND, J. T. RITCHIE Y J. R. WILLIAMS. 1991. Simulation of root growth. En: Hanks, J. & J. T. Ritchie (eds), **Modeling Plant and Soil Systems**. Agronomy Monograph No. 31 ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
- JOENUSH, M. H. Y A. R. SEPASKHAH. 2003. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. *Agric. Water Manage.* 61: 125-141.
- KAHLAWN, M. A., M. ASHRAF Y ZIA-UL-HAQ. 2005. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields. *Agric. Water Manage.* 76: 24-35.
- KANG, S. Z., L. ZHANG, Y. LIANG, X. T. HU, H. J. CAI Y B. J. GU. 2002. Effects of limited irrigation on plant biomass and water use efficiency of winter wheat in the loess plateau of China. *Agric. Water Manage.* 55: 203-216.
- KANG, S., F. ZHANG, X. HU, J. P. Y L. ZHANG. 2001. Effects of shallow water table on capillary contribution, evapotranspiration, and crop coefficient of maize and winter wheat in a semi-arid region. *Aust. J. Agric. Res.* 52: 317-327.
- KAO, W.-Y., T.-T. TSAI, H.-C. TSAI Y C.-N. SHIH. 2006. Response of three Glycine species to salt stress. *Environ. Exp. Bot.* 56: 120-125.
- KATERJI, N., J. W. VAN HOORN, A. HAMDY Y M. MASTRORILLI. 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agric. Water Manage.* 62: 37-66.
- LAMSAL, K., G. N. PAUDYAL Y M. SAEED. 1999. Model for assessing impact of salinity on soil water availability and crop yield. *Agric. Water Manage.* 41: 57-70.
- LAVADO, R.S. Y M.A. TABOADA. 1988. Water, salt and sodium dynamics in a Natraquoll in Argentina. *Catena* 15:577-594.

- LUTERS, A. Y J. C. SALAZAR LEA PLAZA. 2000. *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Traducción de: USDA. 1999. Soil quality test kit guide, Buenos Aires, Argentina.
- MARCOS, J. Y G. S. CAMPBELL. 2002. *SWBModel 11. Modelo de simulación de balance hídrico del suelo y crecimiento de cultivos*. Río Cuarto, Argentina.
- MEJIA, M. N., C. A. MADRAMOOTOO Y R. S. BROUGHTON. 2000. Influence of water table management on corn and soybean yields. *Agric. Water Manage.* 46: 73-89.
- MILLS, H. A. Y J. B. JONES. 1996. *Plant análisis Handbook II*. MicroMacro Publishing, Georgia, USA.
- MUELLER, L., A. BEHRENDT, G. SCHALITZ Y U. SCHINDLER. 2005. Above ground biomass and water use efficiency of crops at shallow water tables in a temperate climate. *Agric. Water Manage.* 75: 117-136.
- NORMAN, A. G. 1983. *Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja*. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.
- PAOLI, C., R. GIACOSA, H. BIANCHI, R. MAZZON, G. BERNAL, G. MACEDO, C. MONTAVERDE Y R. BRAVO. 2000. *Estudios en el área de derrame del río Quinto y arroyos del sur de Córdoba*. Informe Técnico. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente. Subsecretaría de Recursos Hídricos, Córdoba, Argentina.
- PILATTI, M. A., A. VEGETTI Y P. GHIBERTO. 1999. Fitometría. *Rev. FAVE* 13: 23-37.
- PIZARRO, F. 1978. *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. Editora Agrícola Española, S. A., Madrid, España.
- RACCA, R., D. COLLINO, J. L. DARDANELLI, D. BASIGALUP, N. GONZÁLEZ, E. BREZONI, N. HEIN Y M. BALZARINI. 2001. *Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la Región Pampeana*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- RAES, D. Y P. DEPROOST. 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. *Agric. Water Manage.* 62:79-91.
- RANG, S., J. J. CISNEROS, A. MILANESIO, H. GIL Y A. DEGIOANNI. 1999. *Propuesta de Creación del Distrito de Ordenamiento Ambiental para el área al Sur de Laboulaye - Rosales - Leguizamón*. Informe de Becas para el Sector Productivo de Conicor., Río Cuarto, Argentina.
- RICHARDS, L. 1973. *Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos*. Ed. Limusa, México.
- RUGGIERO, R. Y H. CONTI. 1988. Síntesis Climática. En: FECIC (ed.), *El deterioro del ambiente en la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina.
- SAGPYA. 2002. *Resultados definitivos del Censo Nacional Agropecuario 2002. Parte II*. En:www.sagpya.gov.ar. 24-7-2006.
- SAGPYA. 2004. *Estimaciones agrarias - Economías regionales - Informe provincial - Córdoba: Informe productivo*. En:www.sagpya.gov.ar. 30-11-2004.
- SARWAR, T. 2002. Physiological response of soybean to shallow water table depths. *Pakistan J. Biol. Sci.* 5: 1300-1308.

- SATORRE, E. 2003. El cultivo de soja y la sustentabilidad de la agricultura argentina y sus empresas. En: Satorre, E. (ed), **El libro de la soja**. SEMA, Buenos Aires, Argentina.
- SAYGC. 2004. **Gobierno de la Provincia de Córdoba - Ministerio de Producción y Trabajo - Secretaria de Agricultura y Ganadería - Información Estadística y Técnica - Producción Agrícola - 2003/2004** - Dpto. Roque Sáenz Peña. En: www.cba.gov.ar/vercanal.jsp?idCanal=2067. 30-11-2004.
- SEPASKHAH, A. R. Y S. KARIMI-GOGHARI. 2005. Shallow groundwater contribution to pistachio water use. **Agric. Water Manage.** 72: 69-80.
- SEPASKHAH, A. R., A. KANOONI Y M. M. GHASEMI. 2003. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use. **Agric. Water Manage.** 58: 67-79.
- SEPASKHAH, A. R., A. R. BAZRAFESHAN JAHROMI Y Z. SHIRMOHAMMADI ALIAKBARKHANI. 2006. Development and evaluation of a model for yield production of wheat, maize and sugarbeet under water and salt stresses. **Biosystems Engineering** 93: 139-152.
- SIERRA, E., S. PÉREZ Y G. NIZZERO. 2005. Efecto del comportamiento temporal del régimen de precipitaciones en el sur de Córdoba (Argentina) sobre la sustentabilidad de los agroecosistemas. En: **Acta VIII Congreso Argentino de Ingeniería Rural**. Merlo (SL), Argentina.
- SOIL CONSERVATION SERVICE; U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1972. Hydrology. En: **National Engineering Handbook**. Washington D.C., EEUU.
- STOCKLE, C. O. Y R. NELSON. 1996. **Cropsys: Cropping systems simulation model user's manual**. Washington State University, Pullman, USA.
- SURIANO, J. M. Y L. FERPOZZI. 1993. Los cambios climáticos en la Pampa también son historia. **Todo es Historia** 306: 8-25.
- WILLMOTT, C. J. 1982. Some comments on the evaluation model performance. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** 63: 1309-1313.

VII. ANEXO I: MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO EN BASE A LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

VII.1. Introducción

El crecimiento de las plantas es el resultado de la asimilación de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, amén de la incorporación de energía, en compuestos orgánicos (Sinclair & Bennett, 1998). El primer paso en el proceso de asimilación es la fijación de CO_2 en el interior de las hojas.

En contra partida al proceso de fijación y con la adición de energía, se produce la pérdida del agua contenida en las células de la hoja. Como resultado parte del agua es vaporizada y difundida a la atmósfera. Esta difusión de moléculas gaseosas de agua desde el interior de las células es llamada transpiración.

Consecuentemente, la transpiración está directamente relacionada con la fijación de CO_2 ya que: (i) la radiación solar es la fuente de energía para ambos procesos y (ii) los flujos de ambos gases tienen resistencias en común. Por consiguiente, bajo condiciones favorables para la absorción de agua, cuanto más energía absorbe un canopeo, más agua puede transpirar y más CO_2 puede fijar. Esta relación es utilizada para estimar la producción del cultivo.

Seguidamente se describirá detalladamente la base matemática del modelo para el cálculo de la producción del cultivo (Fig. 25).

VII.2. Base matemática del modelo

La evapotranspiración potencial (ETP) es calculada a partir del método *FAO-Penman-Monteith* (Allen *et al.*, 1998). Ésta realiza una estimación de la ETP diaria con la siguiente ecuación:

$$ETP = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \lambda (1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

dónde R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{día}$), G es la densidad de flujo de calor del suelo ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{día}$), T es la temperatura media diaria del aire ($^{\circ}\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento (m/s), e_s es la presión de vapor a saturación (kPa), e_a es la presión de vapor actual (kPa), $e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor a saturación (kPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$).

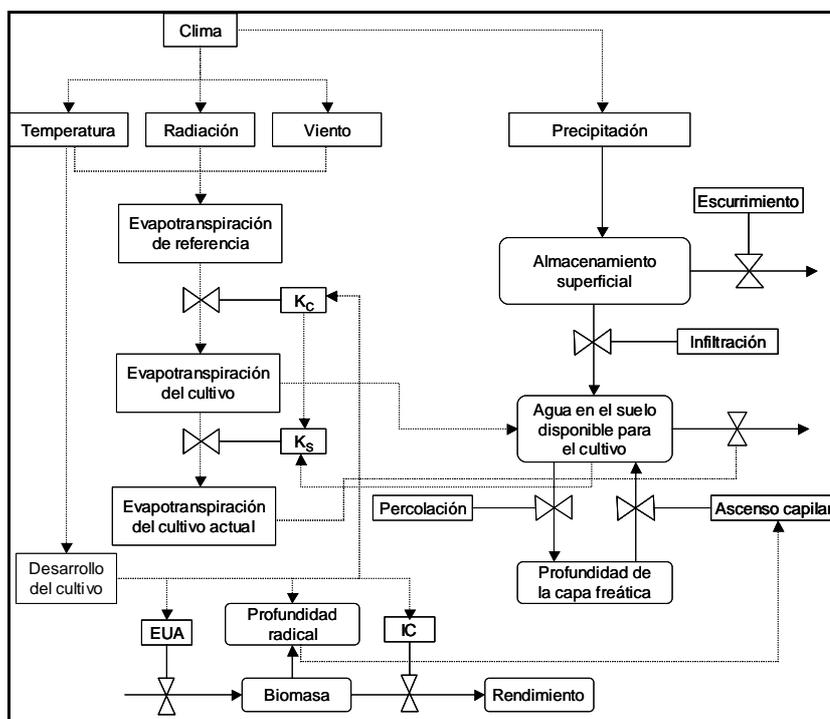


Fig. 23. Diagrama de flujo de los procesos simulados por el modelo de Producción de granos. Las líneas enteras son flujos de agua y carbono, las líneas discontinuas son flujos de información, los cuadros redondeados son almacenamiento de agua y carbono y los cuadros rectangulares son fuente de información.

La evapotranspiración del cultivo (ET_C) es estimada siguiendo el modelo propuesto por Doorenbos & Pruitt (1975). El modelo relaciona la ETP con la ET_C a través del coeficiente de cultivo (K_C), mediante la siguiente ecuación:

$$ET_C = K_C \times ETP \quad (\text{Ecuación 2})$$

El cálculo se funda en considerar que un cultivo no sufrirá reducción del rendimiento si sus necesidades de evapotranspiración a lo largo de su ciclo son plenamente satisfechas.

Posteriormente, se comprueba si la cantidad de agua almacenada en el suelo es suficiente para abastecer la demanda del cultivo. Para ello se realiza un balance hídrico.

Por un lado, la lluvia, el riego y el ascenso capilar adicionan agua a la zona radical y disminuyen su agotamiento. Por otro, la evaporación del suelo, la transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación remueven agua de la zona radical e incrementan su agotamiento.

El balance hídrico diario, expresado en términos de disminución del agua del suelo al final de cada día es:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - Esc)_i - Asc_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

dónde P es la precipitación (mm), Esc es el escurrimiento superficial (mm), Asc es el ascenso capilar (mm), DP es la pérdida de agua de la zona radical por precolación profunda (mm) e i hace referencia al día.

El método asume que el agua puede ser almacenada en la zona radical hasta alcanzar capacidad de campo. En caso de superarse ese límite, se acepta que la cantidad total de agua por encima de capacidad de campo se pierde en el mismo día por precolación profunda y por evapotranspiración.

En la ausencia de algún evento lluvioso, el contenido hídrico disminuirá constantemente hasta alcanzar un mínimo valor, el punto de marchitez permanente.

Al iniciarse el balance hídrico, la disminución de agua inicial ($D_{r,i-1}$) es estimada por:

$$D_{r,i-1} = 1000 \times (\theta_{cc} - \theta_{i-1}) Z_r \quad (\text{Ecuación 4})$$

dónde θ_{cc} es el contenido hídrico a capacidad de campo, θ_{i-1} es el promedio del contenido hídrico del suelo en la zona radical y Z_r es la profundidad de las raíces (m).

El escurrimiento superficial se estima mediante el método de la Curva Número (CN) propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS-USDA, 1972).

El ascenso capilar hacia la superficie es estimado por medio del procedimiento de cálculo presentado por De Laat (1995). Por asumirse un flujo constante entre la freática y la superficie del suelo, De Laat describió e integró la ecuación de Darcy, como:

$$q = - \int_0^h \left(\frac{K(h)}{Z_r - NF} \right) - K(h) dh \quad (\text{Ecuación 5})$$

dónde q es el flujo ascendente constante (m^3/m^2 por día) de agua, $(Z_r - NF)$ es la diferencia entre la profundidad de la raíz y la capa freática (m), h es el potencial mátrico del suelo por unidad de peso de agua (m), y $K(h)$ es la conductividad hidráulica (m por día).

Dada la relación $K-h$ y $\theta-h$ del perfil de suelo por encima de la capa freática, es posible determinar el flujo máximo de agua que puede fluir a la superficie.

La cantidad de agua que asciende puede ser removida con la misma tasa que se evapotranspira en la superficie. Por esta razón, el flujo ascendente nunca puede exceder la demanda evapotranspiratoria.

Al producirse una lluvia en donde el contenido hídrico del suelo supere capacidad de campo, la precolación profunda se calcula mediante:

$$DP_i = (P_i - Esc_i) - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Generalmente, el contenido hídrico del suelo es menor que capacidad de campo por lo que $D_{r,i} > 0$, el suelo no drenará y DP_i será cero.

El ascenso y descenso de la capa freática es cuantificado por la *Ecuación 7*, que toma la forma:

$$NF_i = NF_{i-1} - \left(\frac{V_s}{\mu} \right) \quad (\text{Ecuación 7})$$

dónde NF es la profundidad media de la capa freática, V_s es el flujo neto hacia la capa freática (mm/día) y μ es la porosidad drenable. El flujo neto hacia la capa freática es:

$$V_s = Asc_i - DP_i \quad (\text{Ecuación 8})$$

La porosidad drenable o macroporosidad es estimada por la *Ecuación 9*, que tiene la forma:

$$\mu = \varepsilon - \theta_{cc} \quad (\text{Ecuación 9})$$

dónde ε es la porosidad total.

Cuando el agua del suelo es extraída por evapotranspiración, la depresión se incrementa y el estrés puede ser inducido por D_r hasta hacerse igual a un valor umbral.

El estrés hídrico es cuantificado mediante un coeficiente (K_S) que toma la forma:

$$K_s = \frac{ADC - D_r}{ADC - AFDC} = \frac{ADC - D_r}{(1-p) \times ADC} \quad (\text{Ecuación 10})$$

dónde ADC es la cantidad de agua disponible en el suelo para el cultivo (mm), $AFDC$ es la cantidad de agua fácilmente disponible para el cultivo, y p es una fracción de ADC que el cultivo puede extraer de la zona radical sin sufrir estrés hídrico.

Para las condiciones con limitación de agua del suelo, el K_s es menor a 1 y donde no hay estrés hídrico, el K_s es igual 1.

El ADC en la zona de la raíz es la diferencia entre el volumen de agua a capacidad de campo (θ_{CC}) y el punto de marchitez (θ_{PMP}) afectado por la profundidad de enraizamiento (Z_r).

$$ADC = 1000 \times (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Z_r \quad (\text{Ecuación 11})$$

La $AFDC$ se fundamenta en que si el contenido hídrico del suelo se encuentra por debajo de un valor umbral, el agua no se transporta lo suficientemente rápido hacia las raíces para responder a la demanda transpiratoria y el cultivo empieza a experimentar estrés.

Es decir, después que la D_r excede la $AFDC$, la D_r es lo suficientemente alta como para limitar la evapotranspiración a valores menores que los potenciales y la ET_C decrece en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radical.

El factor p difiere de un cultivo a otro y se encuentra tabulado para un gran número de cultivos. Normalmente varía de 0.3 para las plantas de raíces poco profundas en condiciones ambientales de altas tasas de ET_C (> 8 mm/día) a 0.7 para las plantas de enraizamiento profundo en condiciones ambientales de bajas tasas de ET_C (< 3 mm/día).

Una aproximación numérica para p ponderado por la ET_C se presenta en la Ecuación 12:

$$P_{ajustado} = P_{tabulado} + 0.04 \times (5 - ET_C) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Por otra parte, dado que un cierto potencial matriz del suelo, en presencia de diferentes tipos de suelo, se corresponde con distintos contenidos hídricos, el valor p también es una función del tipo de suelo.

La profundidad del sistema radical es cuantificada por el modelo de crecimiento de raíz propuesto por Borg & Grimes (1986), que se expresa como:

$$D^* = \frac{1}{\left[1 + 44.2 \exp(-8.5 t^*)\right]} \quad (\text{Ecuación 13})$$

dónde D^* es la profundidad relativa de la raíz (fracción de la profundidad máxima de enraizamiento) y t^* es el tiempo relativo (fracción del tiempo fisiológico máximo de crecimiento de las raíces). El crecimiento del sistema radical es dependiente de las condiciones hídricas del suelo.

Los efectos del estrés hídrico son acusados multiplicando el K_C por el K_S en la Ecuación 14 dando como resultado la $ET_{C\text{ actual}}$:

$$ET_{C\text{ actual}} = (K_C \times K_S) \times ETP \quad (\text{Ecuación 14})$$

Con la premisa de que el agua utilizada por el cultivo está fuertemente relacionada con la producción de biomasa y con el rendimiento, la producción de materia seca total del cultivo se calcula de:

$$B = \sum_{n=0}^d ET_{C\text{ actual}} \times EUA \quad (\text{Ecuación 15})$$

dónde B es la producción de biomasa (Kg/ha), EUA es la eficiencia de uso del agua (Kg/mm) y d es la duración del período de crecimiento del cultivo (días). El rendimiento en grano $-R$ (Kg/ha) es el producto de B por el índice de cosecha (IC).

$$R = B \times IC \quad (\text{Ecuación 16})$$

Por ende, la combinación de la Ecuaciones 15 y 16 puede ser expresada de la siguiente forma:

$$R = IC \times \sum_{n=0}^d ET_{C\text{ actual}} \times EUA \quad (\text{Ecuación 17})$$

Si en el cálculo de la producción de biomasa (Ecuación 15) se reemplaza $ET_{C\text{ actual}}$ por la ET_C estimada en la Ecuación 2 se obtiene como resultado la producción de biomasa sin estrés que es equivalente a la producción potencial limitada por la disponibilidad de agua y asumiéndose que la disponibilidad de radiación, nutrientes y el efecto de las adversidades no son limitantes.

VII.3. Funcionamiento del modelo

El modelo opera en forma diaria sobre una base matemática de origen empírico integrando variables climáticas, de cultivo, suelo y capa freática. Los datos de entrada necesarios para iniciar el modelo son:

- Del clima: precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar y velocidad del viento para el cálculo de la ETP .
- Del cultivo: el coeficiente de cultivo (K_C) el cual se compone de tres valores, un coeficiente de cultivo inicial ($K_{C\ ini}$), uno medio ($K_{C\ med}$) y uno final ($K_{C\ fin}$) que ocupan un 25, 55 y 20% del ciclo ontogénico, respectivamente. Para soja, Allen *et al.* (1998) han recomendado los siguientes valores de K_C : 0.5, 1.15, y 0.5 para $K_{C\ ini}$, $K_{C\ med}$ y $K_{C\ fin}$, respectivamente. Además, se debe ingresar el valor de la máxima profundidad de raíz, EUA , p (capacidad de extracción de agua por el cultivo) y IC .
- Del suelo: contenido hídrico inicial, conductividad hidráulica saturada, contenido hídrico a capacidad de campo y punto de marchitez y densidad aparente.
- De la capa freática: profundidad inicial.

Operativamente y diariamente, el modelo calcula en primer lugar la ETP la cual es afectada por el coeficiente de cultivo (K_e) para estimar la ET_C . A continuación, comprueba la capacidad del cultivo para evapotranspirar el volumen de agua calculado anteriormente. Para ello cuantifica la cantidad de agua disponible en el suelo en la zona explorada por las raíces (Ecuación 3). Si el contenido hídrico se mantiene por encima de un valor umbral ($AFDC$) la ET_C no se ve afectada. De lo contrario la ET_C se corrige (Ecuación 14) por medio del K_S calculado en la Ecuación 10 dando como resultado la $ET_{C\ actual}$.

Luego, se estima la producción de biomasa y, al final del ciclo de crecimiento, el rendimiento en grano según la Ecuación 17.

Las salidas del modelo son:

- Del Clima: ETP .
- Del cultivo: ET_C y $ET_{C\ actual}$, producción de biomasa y rendimiento potencial y real, y profundidad de enraizado.
- Del suelo: precipitación efectiva, ascenso capilar, drenaje, escurrimiento, contenido hídrico diario y volumen de agua disponible para el cultivo.
- De la capa freática: profundidad diaria.

VII.4. Bibliografía

- ALLEN, R., L. PEREIRA, D. ROES Y M. SMITH. 1998. ***Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements***. FAO - Irrigation and Drainaje, Roma, Italia.
- BORG, H. Y D. W. GRIMES. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. ***Trans. ASAE*** 29: 194-197.
- DE LAAT, P. J. 1995. Design and operation of a subsurface irrigation scheme with MUST. En: Pereira, L. S., B. van den Broek, P. Kabat Y R. G. Allen (eds), ***Crop - Water Simulation Models in Practice***. Wageningen, Holanda.
- DOORENBOS, J. Y W. O. PRUITT. 1975. ***Guidelines for predicting crop water requirements***. FAO. Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Italia.
- SCS-USDA. 1972. Hydrology. En: ***National Engineering Handbook***. Washington D.C., EEUU.
- SINCLAIR, T. R. Y J. M. BENNETT. 1998. Water. En: Sinclair, T. R. Y F. P. Gardner (eds), ***Principles of ecology in plant production***. CAB International, Florida, USA.

VIII. ANEXO II: SWBMODEL. UN MODELO DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA PARA ESTIMAR EL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO¹

VIII.1. Introducción

El modelo SWBModel simula el transporte de agua en el sistema suelo – planta - atmósfera y está acoplado con un simulador de crecimiento y desarrollo de cultivos. El balance de agua en el suelo es estimado mediante una solución numérica por diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales que describen el flujo y almacenamiento de agua en el suelo. Opera en forma diaria y requiere datos y parámetros de entrada de clima, suelo y cultivos e información inicial del estado hídrico del suelo.

VIII.2. Ambiente atmosférico

La evapotranspiración potencial (*ETP*), es calculada con la ecuación de *Penman-Monteith* (Monteith and Unsworth, 1990) usando datos diarios de viento.

La ecuación de *Penman-Monteith* para *ETP* en kg/m² día usada en el modelo está dada por:

$$ETP = \frac{s}{s + \gamma^*} \frac{R_n - G}{\lambda} + \frac{\gamma^*}{s + \gamma^*} \frac{639VPD}{r_v} \quad (\text{Ecuación 18})$$

dónde *s* es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor, (Pa/°C), *R_n* es la radiación neta (MJ/m² día), *G* es la densidad de flujo de calor hacia el suelo (MJ/m² día), *λ* es el calor latente de vaporización del agua (2.45 MJ/kg), *VPD* es el déficit de vapor del aire (kPa), *r_v* es la resistencia al transporte de vapor (s/m), *γ** es la constante psicrométrica aparente y 639 es un factor de conversión de unidades.

La constante psicrométrica aparente, *γ**, es calculada como:

¹ Síntesis de Marcos y Campbell, 2002.

$$\gamma^* = \gamma \frac{r_v}{r_a} \quad (\text{Ecuación 19})$$

dónde γ es la constante psicrométrica termodinámica (67 Pa/°C a nivel del mar) y r_a es la resistencia de la capa límite.

La resistencia de la capa límite, r_a , está determinada por:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (\text{Ecuación 20})$$

dónde u_2 es la velocidad del viento (m/s) medida a una altura de 2 m.

La resistencia al transporte de vapor, r_v , está dada por:

$$r_v = r_a + r_c \quad (\text{Ecuación 21})$$

dónde r_c es la resistencia de la canopia para un cultivo gramíneo de referencia de 12 cm de alto (Smith *et al.* 1991). La resistencia de la canopia, r_c es establecida en 70 m/s, de esta forma todas las resistencias son calculadas en base a velocidad del viento.

Radiación neta, R_n , es computada como:

$$R_n = 0.8St + Lni \quad (\text{Ecuación 22})$$

dónde 0.8 es al absorptividad de una superficie a la radiación de onda corta, St es la radiación global diaria incidente en la superficie de la tierra (MJ/m² día) y Lni es la radiación neta de onda larga (MJ/m² día).

La radiación neta de onda larga, Lni , está dada por (Monteith y Unsworth, 1990; Campbell, 1996):

$$Lni = (0.026Ta - 9.2) \left[0.96 - \frac{1}{1 + 0.048 \exp(7.1Tr)} \right] \quad (\text{Ecuación 23})$$

El primer término de la *Ecuación 23* es la radiación neta isotérmica de onda larga emitida por cielo claro sugerida por Monteith y Unsworth (1990) y el último término es el efecto de la nubosidad. La temperatura media diaria del aire es Ta . La radiación neta isothermal, Lni , es calculada solamente durante las horas de luz por lo tanto debe ser corregida por la fracción del día.

La densidad de flujo de calor hacia el suelo (G) es calculado como el 10% de Rn (Clothier et al., 1986). Déficit de presión de vapor diario o déficit medio de presión VPD es estimado como $0.66Dx$. Dónde Dx es el déficit de presión de vapor máximo o el déficit de presión de vapor a la hora en que se da la máxima temperatura y es estimado como:

$$Dx = s(Tx - Tn) \quad (\text{Ecuación 24})$$

dónde Tx y Tn son las temperaturas máximas y mínimas respectivamente, y s es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor ($kPa/^\circ C$) en el punto de la temperatura promedio de las temperaturas máximas y mínimas.

La pendiente de la curva de saturación de presión de vapor, s , es aproximada como:

$$s = 0.001\{(0.00223Tave + 0.0549)Tave + 2.97\}Tave + 45.3 \quad (\text{Ecuación 25})$$

La predicción del VPD a partir de la diferencia de las presiones de vapor a saturación a las temperaturas máxima y mínima está basada en el supuesto que el aire se enfría hasta punto de rocío durante la noche y que la presión de vapor se mantiene relativamente constante durante el curso del día. Cuando se opera el modelo, datos observados diarios de clima son leídos de un archivo Excel. El mínimo set de datos diarios necesarios para la operación del modelo está compuesto por precipitación diaria en mm, temperatura máxima y mínima diaria en $^\circ C$ y velocidad media diaria del viento en m/s.

VIII.3. Balance de agua en el suelo

El modelo *SWBModel* simula infiltración, redistribución, evaporación y absorción de agua por la planta. El escurrimiento disminuye la cantidad de agua que ingresa al perfil de suelo y percolación profunda ocurre como resultado de gradientes gravitatorios. El transporte y almacenamiento de agua dentro del suelo están representados por una red de conductores y capacitores. La solución del problema de red es alcanzada mediante métodos numéricos para determinar como cambian el contenido hídrico y potencial agua en el tiempo y en cada nodo de la red.

El flujo de agua (J_w) ocurre tanto en forma líquida (J_l) como en forma de vapor (J_v). La densidad de flujo en forma líquida dentro de un elemento en el perfil de suelo está dada por la ley de Darcy y es función de la conductividad hidráulica y gradientes de potencial agua a través de un elemento:

$$J_l = -k \frac{\partial \psi}{\partial z} + gk \quad (\text{Ecuación 26})$$

dónde J_l es la densidad de flujo de agua ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$), k es la conductividad hidráulica ($\text{kg s}/\text{m}^3$), ψ es el potencial agua mátrico del suelo (J/kg), z es la profundidad (m) y g es la constante gravitatoria ($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$).

En cada nodo, el cambio en el almacenaje de agua está dado por la ecuación de Richards:

$$\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + g \frac{\partial k}{\partial z} - S \quad (\text{Ecuación 27})$$

dónde ρ_w es la densidad del agua ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), θ es el contenido hídrico volumétrico (m^3/m^3) y S es un término de fuente o destino de agua, que en el modelo representa la absorción de agua ($\text{kg}/\text{s m}^3$) por parte del sistema de raíces.

La conductividad hidráulica, k , está dada en término de potencial ψ (Campbell, 1985):

$$k = k_s \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^n \quad \text{si } \psi_m < \psi_e \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$k = k_s \quad \text{si } \psi_m \geq \psi_e \quad (\text{Ecuación 29})$$

dónde k_s es la conductividad hidráulica saturada ($\text{kg s}/\text{m}^3$), ψ_e es el potencial de entrada de aire (J/kg), y n dado por (Campbell, 1974):

$$n = 2 + \frac{3}{b} \quad (\text{Ecuación 30})$$

La constante b es un parámetro de suelo que depende de la estructura y textura del suelo. Este parámetro describe la pendiente de la curva característica de humedad.

El potencial agua y el contenido hídrico volumétrico se relacionan de la siguiente manera de acuerdo a Campbell (1974):

$$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (\text{Ecuación 31})$$

El potencial de entrada de aire se define según:

$$\psi_e = \psi_{fc} \left(\frac{\theta_{fc}}{\theta_s} \right)^b \quad (\text{Ecuación 32})$$

dónde θ_s es el contenido hídrico volumétrico a saturación, estimado a partir de información de densidad aparente (Mg/m^3).

Las fracciones de arcilla y limo y la densidad aparente son entradas al modelo. Con esa información, el modelo estima el parámetro b , el potencial de entrada de aire y la conductividad hidráulica saturada de acuerdo a relaciones sugeridas por Campbell (1998).

El factor de complicación es que, para flujo no saturado, la conductividad hidráulica es función de la variable dependiente (contenido hídrico o potencial agua del suelo). La ecuación de flujo es extremadamente no lineal, lo que hace que la solución numérica de la Ecuación 27 de flujo sea muy compleja. Gardner (1958) sugirió usar un método de transformación integral que usa el concepto de potencial de flujo mátrico (Φ , kg/m s) como la fuerza directriz para el flujo de agua. Este potencial de flujo mátrico toma la forma de:

$$\Phi = \frac{k\psi}{(1-n)} \quad \text{si } \psi < \psi_e \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$\Phi = k_s \left(\frac{\psi_e n}{(1-n)} + \psi \right) \quad \text{si } \psi \geq \psi_e \quad (\text{Ecuación 34})$$

La transformación resulta en una ecuación lineal para flujo estable:

$$J_l = \frac{-\partial\Phi}{\partial z} + k(\Phi)g \quad (\text{Ecuación 35})$$

Por lo tanto, reescribiendo la Ecuación 27 en su forma diferencial, el cambio en el contenido hídrico en cada nodo toma la forma de (Ferrer, 1996):

$$\rho_w \left(\frac{\partial\theta}{\partial t} \right) \Delta z_i = \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{\Delta z_i} - \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\Delta z_{i-1}} + g(k_i^* - k_{i-1}^*) - S \quad (\text{Ecuación 36})$$

dónde $\Delta z_i = z_i - z_{i-1}$ con z_i siendo la distancia desde la superficie del suelo hasta el nodo i .

La conductividad del elemento, k^* , está definida por:

$$k^* = \frac{(k_{i+1}\psi_{i+1} - k_i\psi_i)}{(\psi_{i+1} - \psi_i)(n-1)} \quad (\text{Ecuación 37})$$

Para un suelo que tiene diferentes propiedades hidráulicas entre las capas que componen el perfil del suelo, Φ , θ y k no son funciones continuas de ψ a través de los límites de las

capas. Por lo tanto, dos grupos de Φ , θ y k son definidos y asociados con cada nodo. Uno depende de las propiedades hidráulicas del elemento superior y el otro depende de las propiedades hidráulicas del elemento inferior. Una ecuación diferencial nueva para el cambio en contenido hídrico es definida en cada nodo i con la contribución de estos dos grupos de variables (Ferrer, 1996).

La densidad de flujo de vapor de agua (J_v) dentro del suelo bajo condiciones de flujo isotérmico se desprende de la ley de Fick para la difusión de gas y de la relación existente entre la humedad relativa y el potencial agua. La ecuación resultante para la densidad de flujo de vapor toma la forma de:

$$J_v = -k_v \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (\text{Ecuación 38})$$

dónde k_v es la conductividad de vapor de agua que toma la forma de:

$$k_v = 0.66 D_v V_d \phi_g \frac{\partial h_r}{\partial \psi} \quad (\text{Ecuación 39})$$

dónde D_v es el coeficiente de difusión del vapor, con un valor de $2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, V_d es la densidad de vapor con un valor de 0.017 g/m^3 a 20° C y ϕ_g es la porosidad con aire calculada a partir del contenido hídrico volumétrico.

Evaporación en la superficie del suelo es estimada en base a la fracción de la evapotranspiración potencial (ETP) que corresponde a la evaporación potencial (E_p). ETP es calculada con la *Ecuación 18* y la partición es hecha considerando cual fracción de la energía solar disponible es interceptada por la canopia del cultivo y cual es la fracción absorbida por la superficie del suelo. De acuerdo a esto, E_p está dada por:

$$E_p = (1 - f)ETP \quad (\text{Ecuación 40})$$

dónde f es la fracción de la radiación incidente que es interceptada por la canopia del cultivo. La intercepción es tomada del módulo de simulación de crecimiento del cultivo y está basada en el índice de área foliar (LAI).

La densidad de flujo de vapor (J_{v0} , $\text{kg/m}^2 \text{ s}$) en la superficie del suelo es estimada como:

$$J_{v0} = k_{v0}(\psi_1 - \psi_0) \quad (\text{Ecuación 41})$$

dónde ψ_0 es el potencial agua en el nodo inmediatamente por arriba de la superficie del suelo, ψ_1 es el potencial agua del suelo en el primer nodo, y k_{v0} está dado por:

$$k_{v0} = \frac{E_p}{\psi_0} \quad (\text{Ecuación 42})$$

A partir de la las ecuaciones de flujo, el cómputo del balance de agua en el suelo es representado por una red de nodos. Ecuaciones de balance son definidas en cada nodo. Para el nodo i la expresión de balance toma la forma de:

$$F_{(i)} = J_{l(i-1)} - J_{l(i)} + J_{v(i-1)} - J_{v(i)} + W_{storage(i)} + S_{(i)} \quad (\text{Ecuación 43})$$

dónde $W_{storage}$ es el término de almacenamiento y S es el término fuente-destino.

El término de fuente-destino comprende procesos tales como la absorción de agua por parte del sistema de raíces (transpiración). Escribiendo expresiones similares para cada uno de los N nodos en la red, resulta en N ecuaciones con $N+2$ incógnitas. Condiciones de límite son suministradas al sistema tanto en la parte superior como en la parte inferior de la red. En la parte superior las condiciones de límite son la densidad de flujo de evaporación y la precipitación, a la cual se le descuenta el escurrimiento por el método de la curva número. En la parte inferior de la red la condición de límite es un potencial de agua a saturación que simula el efecto de la capa freática. El potencial de agua de la última capa de suelo, en contacto con la capa freática, es fijado en un potencial entre capacidad de campo y entrada de aire (saturación). Es decir se fija un potencial de agua a un contenido de agua (W_C) de:

$$W_c = (\theta_s - \theta_{cc}) \times 0.2 + \theta_{cc} \quad (\text{Ecuación 44})$$

dónde θ_s es saturación, θ_c es capacidad de campo.

El grupo de ecuaciones no lineales para el balance de masa es resuelto mediante el método Newton-Rhapson y el algoritmo de Thomas para calcular los cambios en ψ que aproximen F a cero en cada intervalo de tiempo. En cada intervalo de tiempo el contenido hídrico de suelo es actualizado en todo el perfil.

La transpiración es agregada al balance de agua en la *Ecuación 43* como un término de destino de absorción de raíces (U_i). Para cada capa la absorción es estimada como (Campbell and Stockle, 1993):

$$U_i = F_i G_p (\psi_{si} - \psi_L^*) \quad (\text{Ecuación 45})$$

dónde F_i es la fracción de densidad de raíces, G_p es la conductancia de la planta ($\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ J}$ día), ψ_{si} es el potencial de agua del suelo de la capa i , y ψ_L^* es el potencial agua de la hoja (J/kg).

La tasa de transpiración máxima posible justo antes del cierre estomático cuando el suelo está completamente húmedo (E_{max}) puede ser formulada como:

$$E_{max} = G_{pmax}(-\psi_{Lsc}) \quad (\text{Ecuación 46})$$

dónde G_{pmax} es la conductancia de la planta de un cultivo completamente desarrollado y saludable que cubre completamente el suelo y ψ_{isc} es el mínimo potencial agua de la hoja al cierre estomático. La tasa máxima posible de transpiración E_{max} , y ψ_{isc} son dados al modelo como parámetros de cultivo y caracterizan un cultivo o variedad.

La transpiración máxima posible (E_{max}) disminuye casi linealmente desde un estado en que el suelo se encuentra húmedo y con un potencial de agua en el suelo igual a 0 hasta un punto mínimo dónde el potencial agua del suelo es equivalente al punto de marchitez permanente. Esta relación puede ser expresada como:

$$U_{max} = E_{max} f \left(1 - \frac{\psi_{save}}{\psi_{wilt}} \right) \quad (\text{Ecuación 47})$$

dónde U_{max} es la absorción máxima posible de agua, ψ_{save} es un potencial de agua del suelo medio ponderado, ψ_{wilt} es el potencial de marchitez de la planta, el cual, y tal como ψ_{isc} , es dado al modelo como un parámetro de cultivo y f es la fracción de la radiación incidente que es interceptada por la canopia. El último término es para disminuir proporcionalmente la magnitud de E_{max} de un cultivo que cubre parcialmente el suelo.

El potencial agua de suelo medio ponderado, ψ_{save} , es calculado como:

$$\psi_{save} = \sum F_i \psi_{si} \quad (\text{Ecuación 48})$$

dónde F_i es asumido que disminuye linealmente con la profundidad. La fracción de raíces F_i es estimada diariamente para cada capa en base a la profundidad diaria del sistema de raíces la cual es calculada por el módulo de desarrollo del cultivo. Por lo tanto, F_i depende solamente de la profundidad de raíces y el espesor de la capa i .

Asumiendo que la planta ajusta su conductancia de acuerdo a la demanda de agua en la canopia, un dado consumo de agua puede ser expresado como:

$$U = G_p(\psi_{save} - \psi_L^*) \quad (\text{Ecuación 49})$$

dónde $G_p = G_{pmax}f$.

La transpiración potencial T_p , es calculada según la partición de ETP en E_p y T_p de acuerdo a la fracción de intercepción de la canopia f a la radiación incidente como:

$$T_p = f ETP \quad (\text{Ecuación 50})$$

Usando *Ecuación 49*, es encontrado el ψ_L^* requerido para mantener un dado nivel de consumo de agua, y luego, ψ_L^* es usado en *Ecuación 45* para calcular la absorción de agua en cada capa. Antes de este cálculo, U es comparado con T_p para determinar si la transpiración es limitada por factores atmosféricos o factores de suelo. Las ecuaciones para estimar ψ_L^* son de la siguiente forma:

$$\psi_L^* = \psi_{save} \frac{T_p}{G_p} \quad \text{para } U_{max} > T_p \quad (\text{Ecuación 51})$$

$$\psi_L^* = \psi_{save} \frac{U_{max}}{G_p} \quad \text{para } T_p > U_{max} \quad (\text{Ecuación 52})$$

VIII.4. Crecimiento y desarrollo del cultivo

El crecimiento es la acumulación de materia seca e influye el balance de agua mediante cambios en el índice de área foliar y profundidad de raíces, los cuales cambian la intercepción, la transpiración y la evaporación (Campbell y Stockle, 1993).

La tasa de desarrollo de un cultivo está controlada, entre otros factores, por tiempo térmico. A su vez se asume que la tasa de desarrollo está linealmente relacionada con la temperatura. Las unidades de tiempo térmico son días grados. La acumulación de tiempo térmico para completar las etapas de desarrollo está expresada como:

$$\tau_i = \sum_i (T_i - T_b) \Delta t \quad (\text{Ecuación 53})$$

$$T_i = T_b \text{ cuando } T_a < T_b$$

$$T_i = T_c \text{ cuando } T_a > T_c$$

$$\text{Si no } T_i = T_a$$

dónde T_i es la temperatura del organismo al tiempo i . T_b es la temperatura base, por debajo de la cual, la tasa de desarrollo se detiene. T_a es la temperatura media del aire diaria y T_c es la temperatura límite para desarrollo.

Días Grados son acumulados desde la siembra a lo largo de la estación de crecimiento. El tiempo térmico acumulado requerido para completar cada etapa del cultivo, la temperatura base T_b y la temperatura límite T_c son suministrados al modelo como parámetros de cultivo.

El crecimiento de cultivo es calculado como el mínimo del crecimiento limitado por agua y el crecimiento limitado por luz. El crecimiento limitado por luz se basa en la relación lineal entre la acumulación de biomasa y la radiación solar interceptada (Monteith, 1977):

$$B = e f S_t \quad (\text{Ecuación 54})$$

dónde B es la producción diaria de biomasa (kg/m^2 día), e es la eficiencia de conversión de energía solar en biomasa o eficiencia en el uso de la radiación (kg/MJ), f es la fracción de la radiación incidente interceptada por la canopia, y S_t es la radiación global incidente diaria ($\text{Mj m}^2/\text{día}$).

La eficiencia de conversión de energía solar en biomasa e se suministra al modelo como un parámetro de cultivo y caracteriza la capacidad de producción de biomasa por unidad de radiación interceptada. La fracción de intercepción f , es una función exponencial del índice de área foliar (LAI , m^2/m^2) y se expresa como:

$$f = 1 - e^{-K LAI} \quad (\text{Ecuación 55})$$

dónde K es el coeficiente de extinción medio de la canopia para la radiación solar, el cual toma valores de alrededor de 0.5 para canopias que tienen distribución de los ángulos de las hojas de tipo esférico.

El índice de área foliar (LAI) es calculado diariamente como una función del incremento diario de biomasa de hojas ($ldmi$) y de un parámetro de cultivo, el área específica de la hoja (SLA , m^2/kg) como:

$$LAI = ldmi \times SLA \quad (\text{Ecuación 56})$$

dónde $ldmi$ es estimado en base a la fracción que es aportado a hojas ($fleaf$) del incremento diario total de biomasa ($tdmi$) y toma la forma de:

$$ldmi = fleaf \times tdm \quad (\text{Ecuación 57})$$

dónde *fleaf* se computa como:

$$fleaf = \frac{1}{(1 + lsp TDM)^2} \quad (\text{Ecuación 58})$$

dónde *lsp* es un coeficiente de partición hoja-tallo (kg/m^2), que controla la fracción de biomasa que se particiona a hojas (un valor de cero toda la biomasa se particiona a hojas), y *TDM* es la biomasa acumulada (kg/m^2). *Lsp* es otro parámetro de cultivo que está estrechamente relacionado a *SLA*.

Senescencia foliar se computa mediante el control diario de la edad de la hojas, la cual se expresa en unidades de tiempo térmico. Diariamente, el modelo remueve de la canopia y la *LAI* actual la porción de hojas que hayan llegado a cumplir su edad límite. Esa edad límite se llama duración de hojas, se expresa en días grados y se la debe ingresar al modelo como un parámetro de cultivo. Crecimiento de cultivo limitado por agua se computa con una ecuación propuesta por Tanner and Sinclair (1983):

$$B = \frac{kT}{VPD} \quad (\text{Ecuación 59})$$

dónde *k* es un parámetro de cultivo que se obtiene experimentalmente a partir de la relación existente entre producción de biomasa y uso del agua. *T* es la transpiración del cultivo y es tomada del módulo de balance de agua en el suelo y *VPD* es el déficit de presión de vapor diario.

Si el suministro de agua a las hojas se restringe, la pérdida de agua también se restringe y por lo tanto la tasa de asimilación de CO_2 y la producción de materia seca. El vínculo entre pérdida de agua y asimilación de carbono explica la evidencia experimental de que transpiración y producción de materia seca se encuentran íntimamente relacionadas. La ecuación sugiere que la materia seca producida es directamente proporcional a la transpiración e inversamente proporcional al déficit de presión de vapor. Cuando *B* toma unidades de kg/m^2 , transpiración de mm (o kg) de agua m^{-2} y *DPV* unidades de Pa, por lo tanto las unidades de *k* son Pa. Valores típicos de *k* para plantas de C3 están entre 4 y 6 Pa y para C4 de 7 a 9, en ambos casos dependiendo de la especie.

La materia seca cosechable se determina, para un cultivo de crecimiento determinado como maíz, distribuyendo a granos o producto cosechable todo el incremento diario de materia seca una vez alcanzada la etapa de floración. Además, puede redistribuirse una parte de la biomasa acumulada al producto cosechable. Para un cultivo de crecimiento indeterminado, la distribución de materia seca después de la etapa de floración, es

compartida entre crecimiento vegetativo y reproductivo. Esta etapa, en la cual ambos crecimientos reciben una fracción del crecimiento diario, culmina en punto en el ciclo del cultivo a partir del cual toda la biomasa es distribuida al crecimiento reproductivo. Este punto es llamado llenado de grano neto y se lo ingresa como entrada al modelo como un parámetro de cultivo. Sus unidades son de tiempo térmico en días grados. La profundidad diaria de raíces, la cual se necesita en el módulo que estima el balance de agua en el suelo, se computa de acuerdo a Borg y Grimes (1986), como:

$$D^* = \frac{1}{\left[1 + 44.2 \exp(-8.5t^*)\right]} \quad (\text{Ecuación 60})$$

dónde D^* es una variable adimensional y es una fracción de la profundidad máxima alcanzable por el cultivo, cuyo valor en metros se lo ingresa al modelo como un parámetro de cultivo. t^* es un tiempo adimensional que es una fracción del tiempo para alcanzar la profundidad máxima. Este tiempo adimensional se computa en base a tiempo térmico.

Un factor de estrés hídrico es calculado con el objeto de modificar el crecimiento diario de área foliar si existen condiciones de estrés hídrico. Este estrés toma la forma de (Stockle, 1983):

$$SI = 1 - \frac{T}{T_p} \quad (\text{Ecuación 61})$$

dónde T es la transpiración actual, la cual surge de la integración de la Ecuación 45 cubriendo las capas con raíces y T_p es la transpiración potencial de acuerdo a la Ecuación 50.

Además, un factor de estrés diario ponderado ($AveStress_d$) por condiciones anteriores al día en cuestión es computado con el objeto de modificar la redistribución de materia seca durante la etapa reproductiva:

$$AveStress_d = a \times AveStress_{d-1} + (1-a) SI \quad (\text{Ecuación 62})$$

dónde a es un coeficiente empírico de campo estimado en base a condiciones de estrés observados. Este factor de estrés suaviza la presencia de un estrés extremo, o condiciones hídricas óptimas repentinas, que se da en un día determinado de acuerdo a las condiciones de estrés de días anteriores.

VIII.5. Bibliografía

- BORG, H. Y D. W. GRIMES. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. *Trans. ASAE* 29:194-197.
- BRISTOW, R. R. Y G. S. CAMPBELL. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. Forest Meteorol.*, 31:159-166.
- CAMPBELL, G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117:311-314.
- CAMPBELL, G. S. 1985. *Soil Physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems*. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam. 150 p.
- CAMPBELL, G. S. 1996. *Lecture notes of the course: Systems in integrated crop management*. Department of Crop and Soils Sciences. Washington State University.
- CAMPBELL, G. S. 1998. *Soil Physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems*. Washington State University. Pullman. WA. USA.
- CAMPBELL, G. S. Y C. O. STOCKLE. 1993. *Prediction and simulation of water use in agricultural systems*. In: International Crop Science, Crop Science of America, Madison, p. 67-73.
- CLOTHIER, B. E., K. L. CLAWSON, P.J. PINTER, JR., M. S. MORAN, R. J. REGINATO, Y R. D. JACKSON. 1986. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. *Agric Forest Meteorol.*, 37:319-329.
- FERRER, A. F. 1996. *A model for assessing crop response and water management in saline conditions*. Masters Thesis. Department of Biological Systems Engineering. Washington State University, Pullman, Washington.
- GARDNER, W. R. 1958. Some steady state solutions to the unsaturated flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85:228-232.
- MARCOS, J. 1997. *Corn Production under dryland conditions in Eastern Washington*. Masters Thesis, Department of Crop and Soil Sciences. Washington State University, Pullman, Washington, USA.
- MARCOS, J. Y G. S. CAMPBELL. 2002. *SWBModel 11. Modelo de simulación de balance hídrico del suelo y crecimiento de cultivos*. Río Cuarto, Argentina.
- MONTEITH, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281:277-294.
- MONTEITH, J. L. Y M. H. UNSWORTH. 1990. *Principles of environmental Physics*, 2nd ed. Butterwoths, London.
- SMITH, M., R. G. ALLEN, J. L. MONTEITH, A. PERRIER, L. PEREIRA Y A. SEGEREN. 1991. *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization on the United Nations, Rome, Italy.

STOCKLE, C. O. 1983. ***Modeling water stress effects on corn growth***. Masters Thesis, Washington State University, Pullman, Washington, USA.

TANNER, C. B. Y T. R. SINCLAIR. 1983. ***Efficient water use in crop production: research or re-search?***. In: H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R. Sinclair (eds.), Limitations to efficient water use in crop production, ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, pp. 1-27.

IX. ANEXO III: EVALUACIÓN DE LA BONDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS

IX.1. Introducción

Los modelos de crecimiento de cultivo son representaciones simplificadas de la realidad basados en la simulación de procesos elementales. La comparación entre los resultados del modelo y los observados a campo es una actividad importante para probar la precisión y establecer un punto de referencia para futuras mejoras en el modelo.

Al analizar el ajuste de un modelo se podría proceder a la inspección gráfica de sus resultados, comparados con los observados, o calcular los errores que comete el modelo. La adopción de uno u otro método va a depender de la exactitud con que se quiera analizar el ajuste.

En este apéndice se desarrollarán dos métodos cuantitativos de análisis de la bondad de ajuste de los modelos.

IX.2. Métodos cuantitativos de evaluación de modelos

Como se comentó en los párrafos anteriores, hay que fijarse en los errores del modelo computado a través del cuadrado de los mismos. En este sentido, un modelo es tanto mejor cuanto menor sea la suma de los cuadrados de sus errores, y más concretamente la media de esa suma (Sánchez Fernández, 2004).

La mayor o menor bondad de ajuste dependerá de que las desviaciones de los valores observados con respecto a los que se obtienen mediante el modelo sean pequeñas o grandes. Si esas desviaciones son pequeñas la bondad será alta. Por el contrario, si las desviaciones son grandes la bondad será pequeña.

Existen varios indicadores para medir la bondad de ajuste, algunos de ellos son el *coeficiente de determinación*, la *desviación media cuadrática*, la *variancia residual*, el *coeficiente de correlación lineal* y, el *error estándar de ajuste*, entre otros.

Estos últimos dos indicadores serán empleados en el análisis de la bondad de ajuste de los modelos.

El coeficiente de correlación lineal es un indicador que permite cuantificar el grado de covariación lineal entre dos variables. Mediante este lo que se busca es un número que

indique, de forma objetiva, el grado de variación lineal conjunta entre las dos variables. El coeficiente de correlación lineal se define como:

$$r = \frac{\frac{\sum_i x_i y_i}{N}}{S_x S_y} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (\text{Ecuación 63})$$

donde S_{xy} es la covariancia, siendo S_x la desviación estándar de x y S_y la de y .

El error estándar de ajuste se define como la raíz cuadrada de la media cuadrática de las desviaciones de los valores observados (y) respecto a los valores estimados (x) (Willmott, 1982). Esta raíz de media cuadrática quedaría como:

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x - y)^2} \quad (\text{Ecuación 64})$$

donde n es el número de casos. El error estándar de ajuste, es equivalente a la desviación estándar. Como tal, da el tamaño medio de los errores del ajuste siendo las unidades de medida las de la variable en análisis.

IX.3. Bibliografía

SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, J. 2004. *Introducción a la estadística empresarial*. Edición electrónica en <http://www.eumed.net/coursecon/libreria/index.htm>.

WILLMOTT, C. J. 1982. Some comments on the evaluation model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63: 1309-1313.