

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Maestría en Ecohidrología

Tesis de Maestría en Ecohidrología

Para obtención del título de  
**Magister en Ecohidrología**

**Evaluación de la viabilidad del riego por goteo subterráneo en zonas húmedas y sus efectos en la estabilización de la producción de maíz para silaje.**

*Tesista:* Ing. Agr. Facundo Ramos Artuso

*Director:* Dr. Leopoldo Génova

*Co-directores:* Dra. María Gabriela Cano

Ing. Agr. Ricardo Andreau

**La Plata, julio 2021**

## **Dedicatoria**

Para Lucia, Joaquina y Jacinta, mis amores.

Para Marcela, una paciente y generosa maestra.

## **Agradecimientos**

A mi familia, que me acompañó en el largo proceso de aprendizaje que significó esta maestría.

A mis directores: Los profesores de Riego y Drenaje Dr. Leopoldo Génova e Ing. Agr. Ricardo Andreau y a la Dra. Maria Gabriela Cano. Por su acompañamiento, su tiempo y su apoyo.

A mis directoras de doctorado, Marcela y Andrea, quienes me permitieron cursar esta maestría en simultáneo con mis tareas de investigación y me acompañaron en el proceso.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales en general y a la Cátedra de Riego y Drenaje en particular; especialmente al Ing. Agr. Pablo Etchevers quien me acompañó en el desarrollo del trabajo experimental en la EEJH.

Al cuerpo docente y administrativo de la Maestría en Ecohidrología; en especial al Ing. Enrique Angheben quien me facilitó series de datos climáticos para la realización de la presente tesis, y al Profesor Mario Hernández, de quien tuve la suerte de ser alumno en el marco de esta maestría y a quien recuerdo con afecto y admiración.

A la Maestría en Ecohidrología por haberme otorgado media beca, lo que en su momento me permitió tomar la decisión de comenzar este proceso formativo.

A mis compañeras de cursada a lo largo de la Maestría: Marisol, Dariela y Gisela, con quienes compartí gratos momentos y aprendizajes.

A la Universidad Pública y Gratuita, y a todos lo que la hicieron y hacen posible.

## RESUMEN

Se utilizó el modelo matemático AquaCrop, desarrollado por la FAO, para modelar el rendimiento del maíz para silaje en condiciones de secano e irrigación subterránea en una zona húmeda como la cuenca lechera Abasto Sur.

Se desarrolló un ensayo experimental donde se cultivó maíz en condiciones de irrigación subterránea y de secano. A lo largo del ensayo se midieron diversos parámetros fisiológicos, morfológicos, ambientales y edáficos del cultivo y del lote que sirvieron para calibrar el modelo AquaCrop.

Una vez calibrado, el modelo se utilizó para estimar el rendimiento de maíz para silaje a lo largo de un periodo de 10 años (2005 al 2016) en función de la oferta hídrica. Este dato de rendimiento fue analizado desde una perspectiva económica, calculando el margen bruto y rendimiento de indiferencia del cultivo; siendo los resultados económicos levemente favorables a la implementación del sistema de riego.

En el trabajo se incluye un análisis FODA de elementos ambientales que deben ser tenidos en cuenta en relación a la implementación de la tecnología de riego por goteo para este sistema productivo, observando que el sistema de riego propuesto cuenta con numerosas ventajas ambientales en relación a otros sistemas de riego, y remarcando la importancia de contar con una visión holística del sistema, incluidas las variables ambientales, a la hora de analizar alternativas técnicas para la producción. Desde una perspectiva ecohidrológica, la aplicación de tecnologías de riego eficientes, como es el goteo enterrado, permite reducir el impacto negativo que el riego con aguas bicarbonatadas sódicas, como las presentes en el acuífero Puelches, puede generar tanto sobre la dinámica de sales de los suelos, como sobre el acuífero por extracción excesiva en relación a lo esperable para sistemas de riego tradicionales, como el riego gravitacional.

El objetivo general propuesto para la tesis fue alcanzado satisfactoriamente; ya que se consiguió evaluar el efecto del riego por goteo subterráneo sobre la estabilización de la producción de maíz para ensilaje utilizando el modelo AquaCrop. Y la hipótesis puede ser considerada válida, y así afirmar que el sistema de riego por goteo enterrado resulta una herramienta apropiada para estabilizar la producción forrajera de silaje en el marco de sistemas productivos de tambo en la cuenca lechera Abasto Sur.

El análisis económico en un plazo de 10 años no brinda un resultado concluyente en torno a la conveniencia económica de adoptar el sistema de riego propuesto. Para la toma de la decisión deberían contemplarse otros elementos en el marco de un análisis holístico.

## **ABSTRACT**

The mathematical model AquaCrop, developed by FAO, was used to model maize yield for silage under rainfed and irrigated conditions in a humid area such as the Abasto Sur dairy basin.

An experimental trial was developed where corn was grown under rainfed and underground drip irrigated conditions. Throughout the trial, various physiological, morphological, environmental and soil parameters of the crop were measured, which served to calibrate the AquaCrop model.

Once calibrated, the model was used to estimate the yield of corn for silage over a period of 10 years (2005 to 2016) based on the water supply. This yield data was analyzed from an economic perspective, calculating the gross margin and indifference yield of the crop; the economic results are slightly favourable to the implementation of the irrigation system.

This work includes a SWOT analysis of environmental elements that must be taken into account in relation to the implementation of drip irrigation technology for this production system. The proposed irrigation system has numerous environmental advantages in relation to other systems irrigation, and it can be highlighted the importance of having a holistic vision of the system, including environmental variables, when analysing technical alternatives for production. From an ecohydrological perspective, the application of efficient irrigation technologies, such as sub superficial drip irrigation, reduces negative impacts that irrigation with sodium bicarbonate waters, such as those present in the Puelches aquifer, can generate on the dynamics of salts of the soils, and on the aquifer due to excessive extraction in relation to what is expected for traditional irrigation systems, such as gravitational irrigation.

The general objective proposed for the thesis was satisfactorily achieved; was possible to evaluate the effect of sub superficial drip irrigation on the stabilization of corn production for silage using the AquaCrop model. The hypothesis can be considered valid, and thus affirm that the sub superficial drip irrigation system is an appropriate tool to stabilize silage forage production within the framework of dairy production systems in the Abasto Sur dairy basin.

The economic analysis within 10 years does not provide a conclusive result regarding the economic convenience of adopting the proposed irrigation system. For decision making, other elements should be considered within the framework of a holistic analysis.

## INDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	12
1.1. Antecedentes	13
1.1.1. Características de la zona de estudio	17
1.1.2. El modelo AquaCrop	19
1.2. Fundamentos de la elección del tema	20
1.2.1. Pertinencia de la temática a la Ecohidrología	20
1.2.2. Pertinencia de la temática en relación a la Maestría	21
1.3. Preguntas de investigación e hipótesis	21
1.4. Objetivos	21
1.4.1. Objetivos Generales	21
1.4.2. Objetivos Específicos	22
<b>2. MARCO TEORICO DEL MODELO AQUACROP</b>	23
2.1. Introducción	24
2.2. Parámetros del modelo	25
2.2.1. Factor de respuesta al rendimiento ( $K_y$ )	26
2.2.2. Rendimiento potencial $Y_x$	26
2.2.3. Evapotranspiración de referencia $ET_0$	27
2.2.4. Evapotranspiración Real del Cultivo $ET_c$	27
2.2.5. Rendimiento real ( $Y_a$ ) y reducción del rendimiento del cultivo	28
2.3. Estructura del modelo AquaCrop	29
2.3.1. Clima	29
2.3.2. Cultivo	30
2.3.3. Suelo	34
2.3.4. Manejo de los cultivos	34

<b>2.4. Respuesta al estrés</b>	35
<b>2.4.1. Funciones de respuesta al estrés</b>	36
<b>2.5. Parametrización, calibración y validación del modelo</b>	40
<b>2.5.1. Parámetros conservativos y no conservativos</b>	40
<b>2.5.2. Evaluación de los resultados y ajuste de los parámetros</b>	42
<b>2.6. Datos de entrada</b>	43
<b>2.6.1. Consideraciones sobre los datos de entrada</b>	44
<b>2.7. Datos de salida</b>	46
<b>2.8. Consideraciones finales sobre AquaCrop</b>	49
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	50
<b>3.1. Experimento a campo</b>	51
<b>3.1.1. Características del lote</b>	51
<b>3.1.2. Diseño experimental</b>	52
<b>3.1.3. Datos climáticos y meteorológicos</b>	53
<b>3.1.4. Suelo</b>	54
<b>3.1.5. Material vegetal y cultivo</b>	55
<b>3.1.6. Fertilización</b>	57
<b>3.2. Calibración, validación y simulación del modelo</b>	58
<b>3.2.1. Parámetros conservativos</b>	58
<b>3.2.2. Parámetros no conservativos</b>	59
<b>3.2.3. Análisis estadístico</b>	63
<b>3.3. Análisis de la factibilidad, económico y ambiental de la implementación del riego en la situación estudiada.</b>	63
<b>3.3.1. Precio del silaje de maíz</b>	63
<b>3.3.2. Análisis de los Costos</b>	64

<b>3.3.3. Análisis de Margen Bruto</b>	65
<b>3.3.4. Cálculo del Rendimiento de Indiferencia</b>	65
<b>3.3.5. Evaluación FODA de aspectos ambientales</b>	66
<b>4. AJUSTE DEL MODELO AQUACROP APLICANDO CONDICIONES EXPERIMENTALES: RESULTADOS</b>	67
<b>4.1. Propiedades suelo</b>	68
<b>4.1.1. Propiedades hidrológicas</b>	68
<b>4.1.2. Condiciones iniciales de la humedad en el suelo</b>	69
<b>4.1.3. Balance de agua en el suelo</b>	70
<b>4.1.4. Conductividad Eléctrica del suelo (CE)</b>	70
<b>4.2. Parámetros del cultivo</b>	71
<b>4.2.1. Fenología</b>	71
<b>4.2.2. Evaluación del desarrollo del canopeo</b>	71
<b>4.2.3. Rendimiento de biomasa al momento de picado</b>	75
<b>4.2.4. Rendimiento de granos</b>	76
<b>5. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA EVALUAR LA IMPLEMENTACIÓN DE RIEGO: RESULTADOS</b>	78
<b>5.1. Variables económicas</b>	79
<b>5.1.1. Costo de producción de silaje de maíz</b>	79
<b>5.1.2. El precio de mercado del kg de silaje de maíz</b>	80
<b>5.1.3. El costo del riego</b>	80
<b>5.1.4. Margen Bruto</b>	81
<b>5.1.5. Rendimiento de Indiferencia (RI)</b>	85
<b>6. ANALISIS FODA DE VARIABLES AMBIENTALES: RESULTADOS</b>	88
<b>6.1. FODA ambiental</b>	89

<b>6.1.1. Fortalezas</b>	90
<b>6.1.2. Oportunidades</b>	91
<b>6.1.3. Debilidades</b>	91
<b>6.1.4. Amenazas</b>	92
<b>7. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES</b>	93
<b>7.1. Consideraciones sobre el uso del modelo AquaCrop y el análisis económico de la implementación del riego por goteo</b>	94
<b>7.2. Conclusiones generales</b>	96
<b>7.3. Conclusión personal</b>	97
<b>8. Bibliografía</b>	98
<b>Anexos</b>	107

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Variación estacional del precio de la leche	15
<b>Figura 1.2.</b> Esquematización de la variación de la oferta forrajera anual	16
<b>Figura 1.3.</b> Cuencas lecheras argentinas	18
<b>Figura 2.1.</b> Funciones lineales de productividad del agua para el maíz,	27
<b>Figura 2.2.</b> Variación del coeficiente de cultivo $K_c$ en función del estado fenológico del cultivo.	28
<b>Figura 2.3.</b> Representación esquemática del principio de funcionamiento del modelo AquaCrop.	29
<b>Figura 2.4.</b> Representación del crecimiento de la cobertura del dosel	31
<b>Figura 2.5.</b> Superposición de datos de la simulación de cobertura de dosel generada por AquaCrop, y la observación empírica de la cobertura durante el ciclo del cultivo	31
<b>Figura 2.6.</b> Caracterización esquemática de la dinámica de profundización de las raíces en el suelo	32
<b>Figura 2.7.</b> Ejemplo de carga de eventos de riego en la interfaz del modelo AquaCrop	35
<b>Figura 2.8:</b> Factores principales del continuo suelo-planta-atmósfera y los parámetros que determinan la fenología, la cobertura del dosel, la transpiración, la producción de biomasa y el rendimiento final	36
<b>Figura 2.9.</b> Ejemplo de diferentes formas que puede tomar la función que caracteriza la variación del coeficiente estrés ( $K_s$ )	37
<b>Figura 2.10.</b> Estrés hídrico: representación esquemática de las interrelaciones que genera	39
<b>Figura 2.11.</b> Ejemplo de la salida de datos en forma gráfica para la solapa <i>climate-crop-soil</i> .	47
<b>Figura 2.12.</b> Ejemplo de la salida de datos para la solapa <i>rain</i>	47
<b>Figura 2.13.</b> Ejemplo de salida de datos para la solapa <i>production</i> .	48
<b>Figura 3.1.</b> Imagen satelital de la EEJH con detalle de la ubicación del lote	51
<b>Figura 3.2.</b> Jornada de reparación y puesta a punto del sistema de riego	52

<b>Figura 3.3.</b> Momento de armado del cabezal, colocando uno de los dos filtros de anillas	52
<b>Figura 3.4.</b> Croquis de la parcela, con la distribución de las zonas de muestreo	53
<b>Figura 3.5.</b> Detalle de la colocación del sensor de humedad en el suelo	54
<b>Figura 3.6.</b> Extracción de muestras de suelo a campo con el barreno durante el experimento y pesaje de muestras previamente secadas.	56
<b>Figura 3.7.</b> Vista del lote a sembrar con el cabezal de riego de fondo	55
<b>Figura 3.8.</b> Plantas de maíz cosechadas enteras para ser secadas y pesadas	57
<b>Figura 3.9.</b> Panel de ajuste del modelo Aquacrop para la simulación de la cinética de la senescencia	59
<b>Figura 3.10.</b> Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) media mensual del periodo 2006-2015 calculada a partir de la base de datos de Climwat para la estación meteorológica Aeródromo de La Plata.	60
<b>Figura 3.11.</b> Detalle de la interfaz del programa AquaCrop donde se observa el detalle de los periodos que caracterizan el desarrollo del canopeo, y el desarrollo reproductivo y del rendimiento.	61
<b>Figura 3.12.</b> Interfaz del programa Soil Water Characteristics	62
<b>Figura 4.1.</b> Interfaz del programa AquaCrop, indicando el contenido hídrico del suelo para cada uno de los horizontes	69
<b>Figura 4.2.</b> Simulación del balance hídrico del suelo	70
<b>Figura 4.3.</b> Evolución de los valores de la CE	71
<b>Figura 4.4.</b> Fotos testigo de la evolución del canopeo en el ensayo experimental.	72
<b>Figura 4.5.</b> Evolución de de la cobertura de canopeo (CC) modelada, indicada por el área gris oscura, y las mediciones de CC a campo, indicadas por los puntos negros.	73
<b>Figura 4.6.</b> Desarrollo del porcentaje de cobertura del canopeo (CC) en tratamientos irrigados y no irrigados.	74
<b>Figura 4.7.</b> Contenido hídrico en suelo medido con sensores y simulado	74
<b>Figura 4.8.</b> Grafico comparativo de los rendimientos en biomasa	75
<b>Figura 4.9.</b> Simulación de rendimiento para el periodo 2006-2015 en función de la variación de precipitaciones	76

<b>Figura 5.1.</b> Función de la variación del costo total del kg de MS de silaje de maíz, en función del rendimiento del cultivo expresado en Tn de MS/ha	79
<b>Figura 5.2.</b> Variación del MB para los sistemas productivos irrigado y seco, en conjunto con los valores de las precipitaciones totales para cada año	83
<b>Figura 5.3.</b> Transpiración, agua almacenada en el suelo y líneas de referencia de los distintos umbrales del estrés hídrico durante la campaña 2006-2007	84
<b>Figura 5.4.</b> Transpiración, agua almacenada en el suelo y líneas de referencia de los distintos umbrales del estrés hídrico durante la campaña 2008-2009.	85
<b>Figura 5.5.</b> Comparación de las diferencias de los rendimientos de indiferencia (RI) y rendimientos simulados entre los tratamientos de riego y seco. Las líneas horizontales expresan los promedios de ambas categorías.	86
<b>Figura 5.6.</b> Comparación durante 10 años, del costo del mm irrigado y los mm precipitados durante el periodo de cultivo.	86

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Características texturales y físicas del perfil, serie de suelos Estancia Chica	19
<b>Tabla 2.1.</b> Información requerida por AquaCrop para llevar adelante simulaciones	40
<b>Tabla 2.2.</b> Denominación y contenido de los archivos con datos de salida de la simulación realizada con AquaCrop.	48
<b>Tabla 3.1.</b> Cálculo de la fertilización realizada	57
<b>Tabla 4.1:</b> Datos del perfil del suelo, incluyendo parámetros hidrológicos calculados mediante el software SWC.	67
<b>Tabla 4.2.</b> Valores de agua útil expresados como lámina, para los diferentes horizontes y para la profundidad efectiva de raíces.	68
<b>Tabla 5.1.</b> Tabla de precios grasa butirosa reelaborada a partir de datos publicados por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca	79
<b>Tabla 5.2.</b> Datos y cálculos para establecer el costo del mm de agua de riego	80
<b>Tabla 5.3.</b> Datos y resultados del cálculo del Margen Bruto para la producción de silaje	81
<b>Tabla 5.4.</b> Datos y resultados del cálculo del Rendimiento de Indiferencia	86
<b>Tabla 6.1.</b> Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas a nivel ambiental de la implementación del sistema de riego por goteo enterrado	91

# 1. INTRODUCCIÓN



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La producción agropecuaria depende de la disponibilidad de agua en cantidad, calidad y oportunidad adecuadas. El hombre, mediante la implementación del riego, ha logrado incrementar la superficie productiva incorporando el riego integral a tierras de zonas áridas, donde la producción sólo es posible con aporte de agua. En las regiones húmedas y sub-húmedas el riego es complementario y las lluvias representan una parte de la oferta de agua en el sistema (Aparicio *et al.*, 2014). La principal característica del riego complementario es que las aplicaciones de agua al cultivo se realizan cuando la humedad del suelo se aleja del rango considerado óptimo, resultado de la dinámica hídrica generada principalmente por la recarga por lluvias y la descarga por consumo evapotranspirativo, durante las etapas fenológicas en que los cultivos presentan elevada sensibilidad al déficit hídrico. Esto permite alcanzar respuestas productivas máximas, cercanas al potencial genético de las plantas, aunque la cantidad total de agua regada no supere generalmente los 300 mm por campaña agrícola (Génova *et al.*, 1998).

Las tecnologías del riego también han ido ganando terreno en zonas húmedas (Schaible y Aillery, 2012) con el objeto de complementar la oferta de agua generada por precipitaciones y así aumentar y estabilizar la producción, evitando los efectos de sequías de corto plazo (Evans y Sadler, 2008). Actualmente, el riego complementario en zonas húmedas y sub-húmedas es una tendencia creciente; y se estima que el 53% de la producción de cereales se hará bajo este sistema para el año 2050 (Rosegrant *et al.*, 2009).

A medida que se incorporan nuevas tecnologías al riego, se avanza en la posibilidad de modular el momento, lugar y modo de aplicación del agua. Ello facilita el manejo, reduce los costos operativos e incluso de instalación (Cataldo y Cabrini, 2014) y permite el uso de aguas de menor calidad, que a priori, podrían evaluarse como no aptas si no son estudiadas en el marco de la dinámica del agroecosistema en cuestión (Génova, 2012). Esto requiere un mayor conocimiento de la fisiología del cultivo, la dinámica del agroecosistema, las variables económicas y sus respectivas interacciones para hacer una utilización apropiada del recurso.

El riego, de manera sinérgica con el surgimiento de germoplasmas con mayores potencialidades de rendimiento y mejores herramientas para la nutrición y sanidad vegetal, son protagonistas del incremento sostenido de la producción de alimentos desde la Revolución Verde iniciada en los años 60, hasta nuestros días. Según Cassman (1999), la combinación de estos factores, permitió evitar un gran déficit en el abastecimiento de alimentos durante las últimas décadas.

Existen numerosos estudios realizados en torno a la factibilidad de implementación de distintas tecnologías de riego para cultivos agrícolas en el país (Miles *et al.*, 2016) (Bongiovanni *et al.*, 2011) (Cataldo y Cabrini, 2014). Se analizaron además de las diferentes tecnologías de riego, distintas fuentes de energía (eléctrica y diésel) y distintas sucesiones de cultivos. Sin embargo, aún no hay disponibles análisis en torno a la adopción de riego en zonas húmedas con objetivos de producción forrajera en el marco de un sistema productivo de tambo.

Diseñadores e instaladores de equipos de riego consultados durante el desarrollo de esta tesis, han destacado que para la evaluación de la viabilidad económico-financiera de la implementación de riego en cultivos extensivos en zonas húmedas, se debe tener en cuenta que la inversión en infraestructura a realizar resulta similar a aquella destinada a una zona árida, y que el incremento de los rendimientos y el beneficio económico es menor cuanto más pequeño es el déficit hídrico cubierto, ya que es menor el diferencial de rendimiento al que se accede por la adopción de la tecnología. Por esta razón, si bien hay trabajos que afirman que el riego será indispensable para asegurar rendimientos comerciales aún en zonas con precipitación alta (Wanjura y Upchurch, 2000), es preciso justificar la inversión a partir del incremento directo del rendimiento (Boyer *et al.*, 2014). En esta ecuación, tampoco se puede dejar de considerar, el abanico de posibilidades técnicas y de ventajas ambientales que la instalación de sistemas de riego por goteo subterráneo genera:

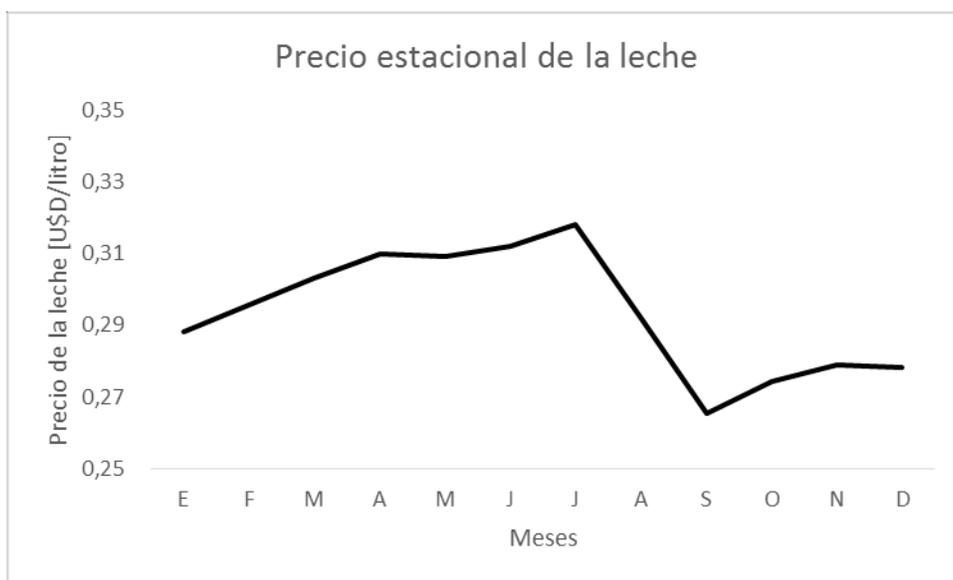
- Estabilización del rendimiento de los cultivos año a año, permitiendo obtener altos rendimientos en años secos.
- Mayor exactitud en la previsión de la oferta forrajera que permite aumentar la carga animal en establecimientos lecheros.
- Ampliación de las posibilidades de fechas de siembra y elección de variedades o híbridos (debido a la inexistencia de períodos críticos de déficit hídrico).
- Facilitación y mejora de la eficiencia en la fertilización (debido a que permite colocar los nutrientes directamente en la zona rizosférica, reduciendo el lavado y la volatilización de los mismos fuera del alcance de la planta).
- Facilitación en la aplicación de productos fitosanitarios sistémicos sin pulverizar y sin riesgos de deriva con el viento.
- Reducción del costo de producción debido al menor consumo de combustible y mano de obra (no se requiere el uso de maquinaria para llevar adelante tareas de fertilización o aplicación de algunos fitosanitarios).
- Reducción de la degradación del suelo por compactación gracias al menor tránsito de maquinarias destinadas a la aplicación de fitosanitarios y fertilizantes canalizados por el sistema de riego.
- Reducción de la incidencia de enfermedades fúngicas (debido a que la superficie foliar no es mojada durante la aplicación y no se genera un ambiente húmedo dentro del canopeo, propicio para la proliferación de hongos).

Un aspecto que no puede ser soslayado de la implementación de los sistemas de riego por goteo subsuperficial que evaluamos en este proyecto, es el conjunto de ventajas que presenta en relación a su impacto ambiental. El uso más eficiente del agua, el menor costo energético de su operatoria en relación a otros sistemas de riego y la posibilidad de aplicaciones más seguras de agroquímicos, son algunos ejemplos. La implementación del riego por goteo subterráneo en cultivos extensivos de zonas húmedas, permite integrar el manejo nutricional del cultivo y parte del manejo fitosanitario, abriendo las puertas de una nueva ecuación productiva con elevado potencial de rendimiento y menor impacto ambiental.

En el sistema productivo de tambo, seleccionado en esta tesis para evaluar la viabilidad de implementación de la técnica de riego, todo el ciclo productivo se basa en la producción de forraje, que depende a su vez de precipitaciones altamente variables. En los últimos 10 años las precipitaciones en la zona de estudio, oscilaron entre 700 y más de 1.500 mm anuales. Los tambos cuentan con una demanda forrajera interanual inelástica, ya que la cría y recría de una vaca hasta que entra en ordeño es un proceso que dura aproximadamente dos años, y que impide variar anualmente el tamaño del rodeo para adaptarlo a la oferta de forraje dependiente de las precipitaciones. Por esta razón, los tambos suelen verse obligados a trabajar con una carga animal menor a la potencial para años de adecuadas precipitaciones.

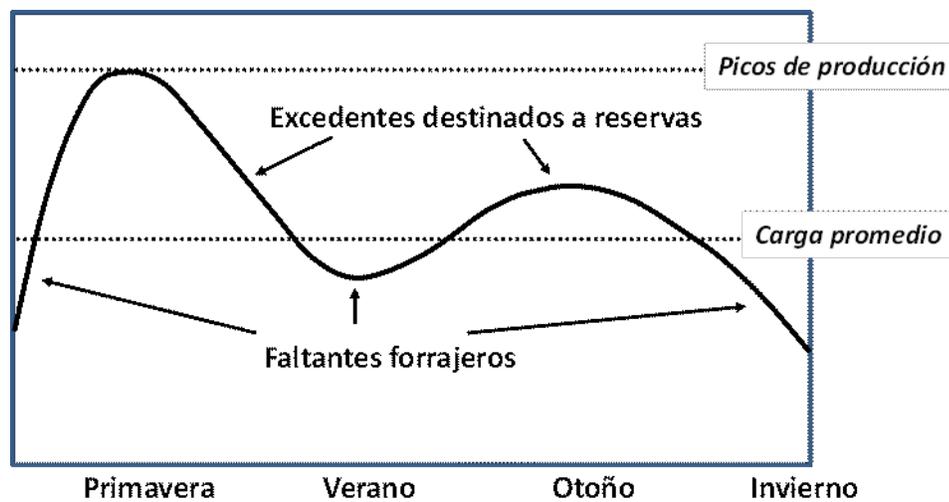
La actividad lechera, se encuentra entre las actividades agropecuarias de mayor complejidad en su manejo, puesto que resulta de la suma de las actividades ganaderas propias del manejo del rodeo, y de las actividades agrícolas, desarrolladas para abastecer el forraje, sea grano, silaje, heno, pastoreo directo u otra variante. En nuestro país, el manejo de los tambos se lleva adelante buscando que la producción de leche varíe poco entre estaciones. Para evitar que los tambos estacionen los servicios y generen mayor oferta de leche en los momentos de mayor oferta forrajera, las industrias lácteas emplean diversos recursos, entre los que se encuentra la variación estacional del precio, pagándole al tambero precios más elevados por la leche durante el invierno, cuando hay menos forraje, y precios menores durante la primavera/verano (Figura 1.1).

Para evitar que la producción de leche quede supeditada a las variaciones estacionales en la oferta forrajera (Figura 1.2), se recurre a la elaboración de forrajes conservados que permiten distribuir el consumo del forraje producido en momentos de abundancia (primavera/verano), durante momentos de escasez (invierno).



**Figura 1.1.** Variación estacional del precio de la leche pagado por industrias lácteas, generada a partir de los promedios nacionales mensuales expresados en dólares para los años 2017, 2018 y 2019. (Fuente de precios: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación: <https://datos.magyp.gob.ar/dataset/lacteos-precio-promedio-pagado-por-provincia>)

La utilización de silajes de maíz y sorgo viene incrementando su participación en la composición de la dieta de los tambos de manera permanente, pasando de un 25% en 2004 a un 30% en 2011 (Centeno, 2013). Esto se debe en parte a la doble ventaja que presentan los silajes, ya que permiten producir volúmenes de forraje elevados (alrededor de 20.000 kg de materia seca ha<sup>-1</sup>) a precios bajos en relación a otros forrajes conservados (Castignani y Suero, 2013). También, permite distribuir el consumo de forraje entre años, contando con reservas forrajeras generadas durante años buenos, para afrontar años adversos, evitando que el establecimiento se vea obligado a reducir el stock ganadero (Uset y Lazzaro, 2009).



**Figura 1.2.** Esquematación de la variación de la oferta forrajera anual (línea) y los momentos en los cuales se producen excedentes y faltantes de forraje (Modificado de Bragachini *et al.*, 2008).

La adecuación de la oferta hídrica mediante el riego, permite estabilizar el subsistema agrícola, que a su vez tiene un impacto positivo sobre la estabilidad del sistema agropecuario “tambo”, en el cual se asocia, como ya mencionamos, una actividad ganadera intensiva a la actividad agrícola que funciona como abastecedora de forrajes. A la hora de evaluar el funcionamiento de un sistema complejo, como es un tambo, es importante visualizar la interacción existente entre los diferentes subsistemas que componen al sistema productivo, para poder comprender la estrecha interacción que el agua tiene en numerosos procesos a lo largo de todo el esquema productivo.

Si bien el almacenamiento de forraje de un año para el otro permite estabilizar el sistema productivo frente a eventuales contingencias climáticas, es necesario considerar que conlleva un gran costo financiero, surgido de la inmovilización del recurso forrajero durante meses e incluso años; sumado al riesgo de pérdida del forraje durante su almacenamiento; principalmente en su calidad, por el paso del tiempo.

Asumiendo que sería deseable depender menos de las reservas interanuales de forraje por contar con mayor estabilidad de la producción anual, el sistema de riego por goteo subterráneo podría ser una buena alternativa, ya que la oferta hídrica es una de las principales fuentes de variación en la producción forrajera.

Tal como se ha explicado, la posibilidad de contar con una oferta hídrica garantizada

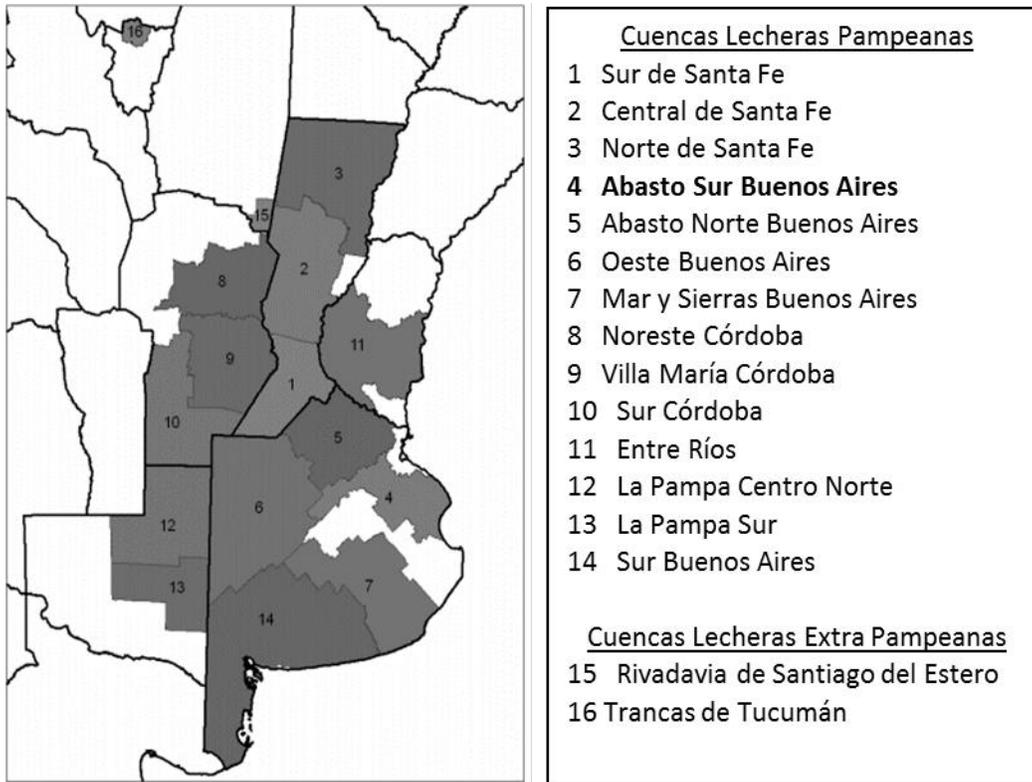
por un sistema de riego reduce las oscilaciones interanuales del rendimiento en los cultivos de maíz destinados a producción de silaje. Tener una disponibilidad suficiente de alimento suplementario a la dieta en el caso de un establecimiento lechero, podría permitir estabilizar la carga animal en valores óptimos y mantener una buena producción de leche incluso en épocas desfavorables.

En el caso de la cuenca lechera Abasto Sur, donde se desarrolla este trabajo de tesis, si bien tiene un régimen de precipitaciones favorable para lograr rendimientos aceptables de maíz, estos cultivos siguen expuestos a sufrir cortos períodos de déficit hídrico en épocas críticas de su desarrollo, con gran impacto en la producción. Es de esperar que la implementación del riego incremente y estabilice los rendimientos, quedando por dilucidar si lo hará en forma lo suficientemente significativa como para volverse una práctica viable desde el punto de vista económico.

Con el objeto de correlacionar la producción forrajera con la oferta hídrica, se utilizará el modelo matemático AquaCrop, desarrollado por la FAO, que una vez calibrado, y validado con datos climáticos y agronómicos, tanto generados en el actual ensayo como preexistentes, permitirá estimar rendimientos del maíz en función de la oferta hídrica, y evaluar económicamente la implementación de la tecnología del riego por goteo subterráneo. Hasta el momento y según mi conocimiento, el modelo AquaCrop no ha sido utilizado para modelar oferta forrajera para silajes en zonas húmedas.

### **1.1.1. Características de la zona de estudio**

La cuenca Abasto Sur (Fig. 1.3) es la segunda cuenca lechera más importante de la Provincia de Buenos Aires (Buelnik *et al.*, 1996), y al estar ubicada en una zona húmeda, no cuenta con la implementación de sistemas de riego como una práctica generalizada. Según Buelnik *et al.* (1996) en esta zona, 57% de los establecimientos administran la dieta del rodeo a base de pasturas (trébol rojo y blanco, sorgo, *Phalaris*, *Lotus*, avena, raygrass, entre otros) y lo suplementan con alimento concentrado o afrechillo de trigo. También utilizan reservas forrajeras comprendidas por silaje, y rollos de moha o “pradera”. Una de sus desventajas, es la presencia de suelos con baja infiltración, que si bien permiten su uso agrícola, se clasifican en categorías de capacidad de uso de suelo III y IV (suelos de tipo argiudol típico, ácuico, natracuoles o argialboles, con horizonte A poco profundo, horizonte B textural arcilloso). En esta cuenca se encuentran grandes plantas procesadoras de leche, como las de las marcas La Serenísima (Mastellone Hnos S.A.), Danone (Danone Argentina S.A.) y Vacalín (Lácteos Argentinos, E. Rodríguez e Hijos S.A.).



**Figura 1.3.** Cuencas lecheras argentinas. Modificado de Marino *et al.* (2011).

La parte experimental del presente trabajo se llevó adelante en la Estación Experimental Julio Hirschhorn (EEJH) de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, situada al noroeste de la cuenca lechera Abasto Sur, ya que se busca que los resultados esperados signifiquen un aporte al sistema productivo local.

El perfil de suelo descrito en la Tabla 1.1, pertenece a la serie de suelos Estancia Chica, (Hurtado, 2004) que se encuentra en la divisoria principal entre las cuencas del Río de la Plata y la del río Samborombón y que corresponden a la zona donde se encuentra la EEJH.

Son suelos de fuerte desarrollo, bien a moderadamente bien drenados, de permeabilidad lenta o muy lenta. El horizonte superficial es generalmente de textura franco limosa, con tenores de arcilla de 20-25% y 20 a 30 cm de espesor. Por debajo, suele aparecer un horizonte de transición con algunos sectores levemente decolorados designado como AB. En otros casos, el horizonte A apoya directamente sobre un horizonte Bt (el subíndice t indica carácter textural, asociado a grandes porcentajes de arcilla y baja permeabilidad), casi siempre dividido en tres subhorizontes. Tiene un espesor de 60 a 90 cm, llegando a una profundidad algo superior a 1 metro. De textura arcillosa, posee entre 45-55% de arcilla. La transición hacia el material originario es gradual, existiendo generalmente dos horizontes BC, a veces con acumulaciones de carbonato de calcio.

**Tabla 1.1.** Características texturales y físicas del perfil, serie de suelos Estancia Chica (Hurtado, 2004)

<b>Nomenclatura del horizonte</b>	<b>A</b>	<b>AB</b>	<b>Btss</b>	<b>BC1</b>
Tipo horizonte	Franco limoso	Franco limoso	Franco arcilloso	Franco arcillo limoso
Profundidad [Cm]	0-29	29-37	37-115	115-160
Arcilla [%]	23,69	23,85	50,28	36,25
Limo [%]	59,55	56,6	46,48	52,66
Arena [%]	16,31	19,54	9,33	11,09
MO [%]	5,83	4,12	0,98	0,11
CE [ds/m]	2,07	1,1	2,1	1,8

La pendiente de estos suelos es muy baja, siendo frecuente la presencia de limitaciones por anegamiento, y el agua subterránea disponible para riego desde el acuífero Puelches presenta una composición que permite caracterizarla como bicarbonatada sódica. El  $\text{CO}_3\text{H}^-$  equivale al 66% del total de aniones y el  $\text{Na}^+$  al 70% del total de cationes. El contenido salino total promedia 1.093 mg/L. Al bicarbonato le siguen el  $\text{Cl}^-$  con el 24%, el  $\text{NO}_3^-$  con el 8,5% y el  $\text{SO}_4^{2-}$  con el 1,5%. Respecto a los cationes, al sodio le siguen el  $\text{Ca}^{+2}$  y el  $\text{Mg}^{+2}$  con el 14% cada uno y el  $\text{K}^+$  con el 2% (Auge , 2005). En ese mismo trabajo, Auge desarrolló un balance hídrico a nivel edáfico para la zona, utilizando una serie de datos hidrometeorológicos de 93 años, obteniendo una Et potencial de 822 mm/año, muy próxima a la Et máxima, de 812 mm/año. Esta diferencia de tan solo el 1,2%, indica que la deficiencia de agua en el sistema es muy pequeña. Pero al segmentar temporalmente el balance, el autor notó que los únicos meses que presentan déficit hídrico, fueron diciembre, enero y febrero, momento en el cual se desarrolla el maíz, que por otra parte presenta un coeficiente K (Ver ecuación 2.4) de evapotranspiración para el cultivo superior a la cobertura vegetal típicamente predominante en la zona.

### 1.1.2. El modelo AquaCrop

El estudio de las dinámicas de generación de rendimiento en cultivos agrícolas y su respuesta a diversos factores ambientales, así como la producción de herramientas que permitan modelar y predecir estos comportamientos, ha sido motivo de numerosas investigaciones. El modelo AquaCrop es en definitiva, parte de este proceso de generación de datos, y su aplicación, a su vez, fuente de nuevos conocimientos, como los generados por Morla y Giayetto (2012) para cultivos de maíz la zona sur de la Provincia de Córdoba.

Se decidió trabajar con el modelo AquaCrop, porque hay gran disponibilidad de información referente al funcionamiento y aplicaciones del mismo y porque debido al auge que ha tenido durante los últimos años, dio lugar a numerosos trabajos científicos y técnicos donde se evalúa su funcionamiento, otorgándole confiabilidad. Por sobre todas las cosas, se optó por el uso de AquaCrop, por tratarse de un modelo desarrollado deliberadamente por la FAO para ser utilizado por técnicos y productores. El modelo cuenta con una interfaz

relativamente sencilla y requiere, una vez calibrado, datos fácilmente obtenibles para su operatoria. Estas características podrían permitir que los productores de la región considerada lo apliquen y puedan eventualmente utilizar esta tesis, a fin de evaluar la implementación de la tecnología de riego por goteo enterrado en sus propios establecimientos lecheros.

Para contar con una base apropiada para la comprensión de los factores fundamentales que hacen al funcionamiento y aplicación del modelo, se llevó adelante una revisión bibliográfica extensa sobre el Modelo AquaCrop, su calibración, posibles usos y cuestiones a considerar durante su operación; también sobre las particularidades del cultivo de maíz y sus características asociadas a la irrigación y la respuesta al estrés; y los factores climáticos y fisiológicos significativos para el modelo. En las tablas 1, 2 y 3 del Anexo se referencian los trabajos más importantes de cada uno de los tres campos mencionados y se reseña un breve resumen de su contenido.

## **1.2. Fundamentos de la elección del tema**

### **1.2.1. Pertinencia de la temática a la Ecohidrología**

La creciente demanda de alimentos a nivel mundial y el carácter finito de los recursos necesarios para la producción de los mismos, entre los que se encuentra el agua, abre las puertas a complejos debates que atraviesan los planos técnicos, políticos, económicos y sociales. Estos debates demandan información para argumentar su desarrollo, y soluciones técnicas para implementar los cambios que permitan adaptar el uso de los recursos naturales destinados a la producción de alimentos a los nuevos paradigmas.

Existe una preocupación por el cuidado de los recursos naturales que pareciera entrar en contradicción con la necesidad de incrementar la productividad. Palabras como sustentabilidad, agroecología, labranza cero, trazabilidad, entre otras, pueden ser consideradas neologismos en relación a la actividad agropecuaria. La posibilidad de compatibilizar estos conceptos, “produciendo más y dañando menos”, constituye en sí mismo, un desafío.

En este contexto, la consigna “*More crop per drop*”, adoptada como propia por la FAO en el año 2003, denominado Año Mundial del Agua, se sitúa en el centro de la discusión. Ella no consiste en regar más cultivos, sino en hacerlo de forma eficiente, optimizando el aprovechamiento del agua.

La misma FAO, indica en sus proyecciones, que para el año 2050 la producción de alimentos en zonas irrigadas se incrementará en un 50%, mientras el uso de agua para riego solo podrá hacerlo en un 10% (FAO, 2017), poniendo en el centro del debate la necesidad de mejorar la eficiencia del uso de agua (Evet y Tolk, 2009). Todo ello, en un contexto en el cual el costo del riego se incrementa progresivamente, de la mano del aumento del costo de la energía; y muchas de las tierras disponibles para incorporar tecnologías de riego ya no son óptimas, sea por estar en zonas húmedas o por presentar limitaciones productivas de otra índole.

En palabras de Jacques Diouf (2003), ex director general de la FAO, la agricultura está bajo presión para alcanzar un uso más eficiente del agua de lluvia y el agua de riego, volviéndose imperioso invertir en mejores tecnologías y más conocimiento para alcanzar

“*more crop per drop*”. Esta tesis pretende ser un aporte en ese sentido.

### **1.2.2. Pertinencia de la temática en relación a la Maestría en Ecohidrología**

Para hacer posible el desarrollo de esta tesis, fue necesario contar con los conceptos, herramientas y criterios adquiridos en el marco de la Maestría en Ecohidrología.

Para poder utilizar el modelo AquaCrop fueron centrales los contenidos de hidrometeorología, puesto que el funcionamiento del modelo se basa en el carácter conservativo de la relación transpiración-biomasa originalmente propuesto por Dorenboos (1979), profundizado por Rao *et al.*, (1988) e incorporado al modelo de simulación AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009) (Raes *et al.*, 2009) (Hsiao *et al.*, 2009) (Heng *et al.*, 2009). La transpiración del cultivo responde a la demanda atmosférica emergente de las condiciones hidrometeorológicas.

El funcionamiento del modelo incluye la interpretación de la dinámica del agua en el suelo cultivado. Fue necesario definir y utilizar los parámetros que caracterizan hidrológicamente al suelo utilizando el programa *Soil Water Characteristics*, así también como el comportamiento del agua en relación a su infiltración y escorrentía. Para el desarrollo de estos temas, fueron imprescindibles los contenidos que forman parte del plan curricular tanto en Hidrología Subterránea, como en Hidrología de superficie. Mientras que para generar una interpretación de los posibles cambios derivados de la implementación de las tecnologías evaluadas en el desarrollo de esta tesis a nivel ambiental, fue necesario contar con los conocimientos adquiridos en Ecología y en Gestión Ambiental.

Por estos motivos, considero que la temática seleccionada permitió que la tesis sea una instancia de integración y profundización de conocimientos, tanto de los contenidos propios de la maestría, como así también con los conocimientos directamente asociados a mi profesión de Ingeniero Agrónomo y a mi labor como docente en la cátedra de Riego y Drenaje de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP.

### **1.3. Preguntas de investigación e hipótesis**

¿El riego enterrado es una herramienta apropiada para estabilizar la producción forrajera en un establecimiento lechero de la cuenca Abasto Sur? ¿Sería justificada la inversión inicial de la implementación del riego con respecto a la rentabilidad que se obtendría a través de la estabilización del sistema en esta zona?

La implementación del riego por goteo subterráneo estabiliza el rendimiento del maíz en la zona de la cuenca lechera Abasto Sur, haciendo que el incremento del rendimiento durante los años de menores precipitaciones estacionales justifique económica y financieramente su utilización.

### **1.4. Objetivos**

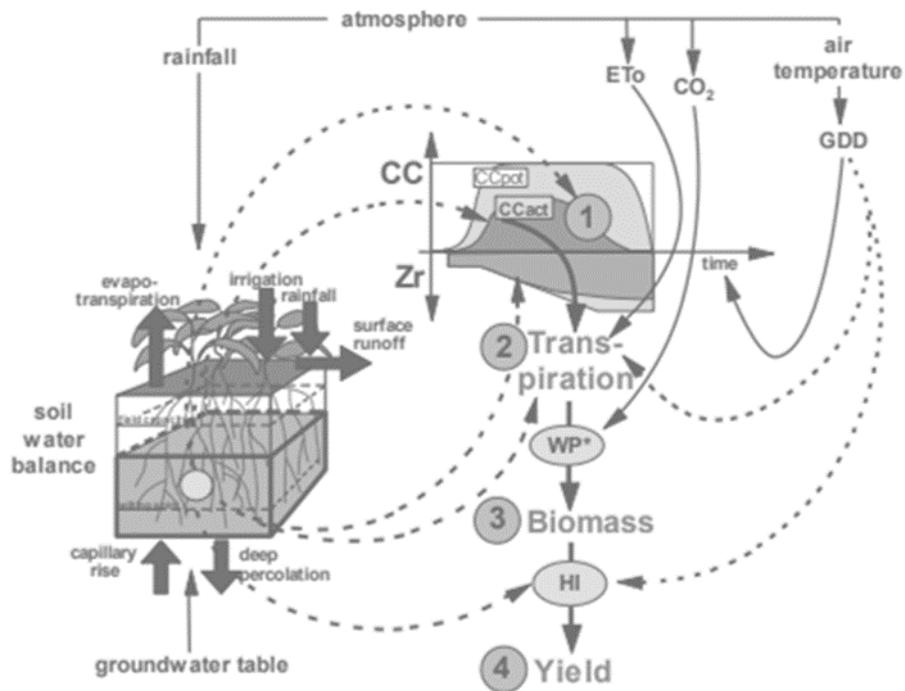
#### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar los efectos del riego por goteo subterráneo en zonas húmedas en la estabilización de la producción de los sistemas asociados: cultivos de maíz para ensilaje - establecimiento lechero y su viabilidad de aplicación en dicho ámbito productivo.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Analizar la dinámica hídrica, fisiológica y el rendimiento del cultivo de maíz en un experimento a campo con y sin irrigación subterránea, en una parcela localizada en la cuenca lechera Abasto Sur.
- b) Calibrar el modelo AQUACROP con datos obtenidos durante el experimento, validarlo y simular los rendimientos del maíz en función de las series históricas de datos climáticos para las últimas 10 campañas.
- c) Analizar la estabilización de los sistemas cultivos de maíz-establecimiento lechero, en función de los rendimientos simulados previamente.
- d) Analizar la viabilidad económica de la implementación de riego suplementario para el cultivo de maíz en establecimientos tamberos de la cuenca lechera Abasto sur, caracterizando y evaluando luego, a través de un análisis FODA, los aspectos ambientales que podrían surgir de la misma.

## 2. MARCO TEORICO DEL MODELO AQUACROP



## 2. MARCO TEORICO DEL MODELO AQUACROP

### 2.1 Introducción

A medida que se hace preciso incrementar la productividad de los cultivos, y avanzar con actividades agrícolas en zonas que presentan limitaciones naturales para dicha actividad, la optimización del uso del agua, tanto precipitada como irrigada, se torna fundamental. En este contexto, entender y poder modelar la manera en la cual la oferta hídrica incide en el rendimiento de los cultivos, se convierte en una herramienta sumamente valiosa.

Existen numerosos modelos que se han ido generando para simular el desarrollo del cultivo de maíz. Los más renombrados son CERES-Maize (Jones *et al.*, 1986), EPIC-phase (Cavero *et al.*, 2000), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), APSIM (Keating *et al.*, 2003) e Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004). Según Heng *et al.* (2009), estos modelos son sofisticados y demandan habilidades para su calibración y operación, además de requerir la incorporación de un gran número de variables y datos de entrada entre los que se cuentan datos específicos de la variedad. La dificultad que implica su manejo, restringe su uso a tareas de investigación, permaneciendo alejados de un uso directamente asociado a las actividades técnicas y productivas por parte de consultores, ingenieros, actores gubernamentales, ONGs y asociaciones agrarias. (Vanuytrecht *et al.*, 2014).

Ante esta situación, la FAO desarrolló el modelo Aquacrop, que permite simular con buen ajuste el rendimiento de los cultivos en función de la oferta hídrica, tanto en condiciones de riego como de secano, utilizando datos más accesibles en el ámbito productivo (Raes *et al.*, 2009). Es importante destacar, que el desarrollo de diferentes modelos a lo largo del tiempo, ha ido permitiendo mejorar la interpretación de cuáles son los factores ambientales y fisiológicos que mejor correlacionan con las distintas componentes del rendimiento, y de qué forma lo hacen. Estos avances permitieron mejorar sustancialmente el ajuste de los modelos en diferentes especies y condiciones de cultivo.

El fundamento central de la modelización matemática con el que se estima el rendimiento de los cultivos en relación a la oferta hídrica, se basa en la idea planteada originalmente por Doorenbos y Kassam (1979), acerca del carácter conservativo de la relación entre el rendimiento del cultivo y la evapotranspiración, que se expresa en la ecuación 2.1. De manera prácticamente contemporánea al surgimiento de este concepto, comenzaron a generarse herramientas de simulación del rendimiento (por ejemplo: Feddes *et al.*, 1982) que sentarían los precedentes para los actuales modelos computarizados.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \cdot \left(\frac{ET_a}{ET_x}\right)$$

(Ecuación 2.1)

Donde:

$Y_x$ = Rendimiento potencial en, [Tn/ha]

$Y_a$ = Rendimiento real, [Tn/ha]

$ET_x$ = Evapotranspiración máxima, [mm/dia]

$ET_a$ = Evapotranspiración real, [mm/dia]

$K_y$ = Factor de respuesta al rendimiento, adimensional

La interpretación realizada por Doorenbos y Kasam (1979) aún sigue vigente, y se refuerza con otros trabajos, por ejemplo, el análisis de sensibilidad de la función de productividad del agua de la ecuación 2.1, desarrollado por Kaboosi y Kaveh *et al.* (2012).

A partir de este concepto, la FAO publicó, en 2009, el modelo AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009), que simula la productividad de biomasa como función de la transpiración, y fue validado posteriormente para numerosas especies agrícolas, tanto en cultivos anuales, frutales e incluso leñosas (Steduto *et al.*, 2012).

Basado en la ecuación 2.1, pero separando la evaporación desde el suelo de la transpiración de la planta (i.e. separa el agua evaporada que no contribuye a la generación de biomasa, de la que sí lo hace), el modelo AquaCrop simula la producción de biomasa total (B), a partir de la transpiración (Tr) y la productividad del agua (WP), tal cual se observa en la ecuación 2.2.

$$B = WP \cdot \sum Tr$$

(Ecuación 2.2)

El rendimiento agrícola (Y) de granos o frutos, se modela afectando la biomasa producida por el índice de cosecha (HI). El HI es el porcentaje total de la biomasa compuesto por material cosechable, y se observa expresado en la ecuación 2.3. En el caso de este trabajo, el índice de cosecha no cobra mayor importancia, ya que al tratarse de un cultivo para la producción de silaje, se trabajó con el picado de la planta entera y no solo de las partes cosechables en forma de grano.

$$Y = B \cdot HI$$

(Ecuación 2.3)

## 2.2 Parámetros del modelo

Para entender el modelo en profundidad, es necesario conocer los parámetros y variables fisiológicas, ambientales y agronómicas y las funciones en las que se articulan. Algunos parámetros, como por ejemplo la tasa de crecimiento de una especie en condiciones de suficiencia hídrica y nutricional para un determinado rango de temperatura, son considerados como conservativos. Estos son prácticamente constantes para diferentes condiciones de cultivo y variedades o híbridos de una especie en una condición ambiental dada. En el caso del maíz, estos parámetros, fueron establecidos por Hsiao *et al.* (2009) en base a datos recopilados durante 6 campañas, en la Universidad de California, Davis, EEUU; (Acevedo Hinojosa, 1975) (Steduto, 1993) (Rojas-Lara, 1999) donde se utilizaron 4 variedades, bajo distintas densidades de siembra, diferentes demandas evapotranspirativas y fechas de siembra. La posterior validación de estos parámetros para una mayor variedad de sitios, condiciones ambientales y período de estrés hídrico, fue realizada por Heng *et al.* (2009), quienes utilizaron datos preexistentes provenientes de Bushland, Texas, USA (Howell *et al.*, 1996, 1998), Gainesville, Florida, USA (Bennett *et al.*, 1986) (Ma *et al.*, 1998) y Zaragoza, España (Cavero *et al.*, 2000).

Los parámetros no conservativos, a diferencia de los conservativos, necesitan ser calibrados para la aplicación en cada situación a nivel local, y en el caso del presente trabajo, fueron obtenidos a partir del experimento a campo realizado en la EEJH (FCAYF, UNLP).

Siguiendo a Steduto *et al.* (2012), se explica a continuación la serie de parámetros y variables que utiliza el modelo para realizar sus cálculos y simulaciones, junto con comentarios acerca de qué situaciones fueron contempladas para el caso del presente trabajo.

### 2.2.1 Factor de respuesta al rendimiento ( $K_y$ )

Volviendo a la ecuación 2.1, en AquaCrop, se define la sensibilidad del cultivo al déficit hídrico, a partir de la ponderación del impacto en el rendimiento que tienen las variaciones de la evapotranspiración directamente asociada a la oferta hídrica.

$K_{y > 1}$  : Cultivo sensible al déficit hídrico, en el cual la reducción del rendimiento es proporcionalmente mayor a la disminución de la evapotranspiración. (Por ejemplo en la Figura 2.1: etapas de Formación de rendimiento ( $K_y=2,3$ ). Los momentos del cultivo que presentan un  $K_y$  más elevado son denominados, en el ámbito de la agronomía y de la fisiología, como “periodos críticos”.

$K_{y=1}$  : Cultivo con una disminución del rendimiento directamente proporcional a la disminución de la evapotranspiración.

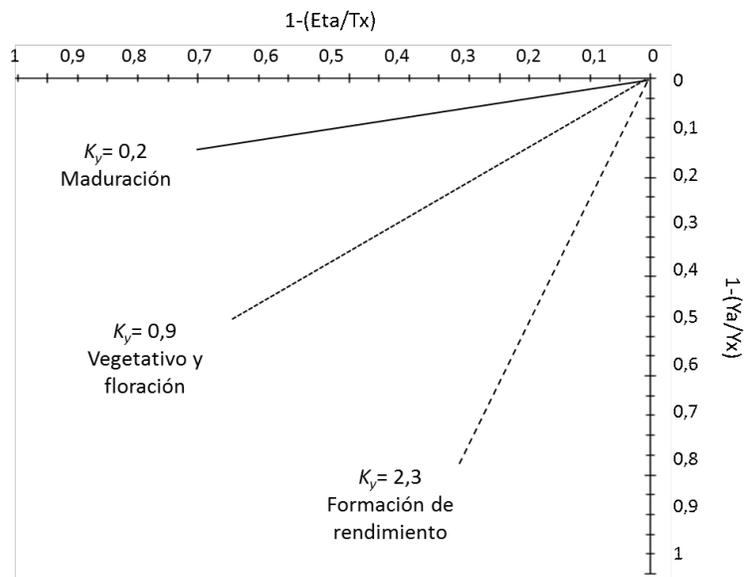
$K_{y < 1}$  : Cultivo con buena tolerancia al déficit hídrico, en el cual la reducción del rendimiento es proporcionalmente menor a la disminución en la evapotranspiración. (Por ejemplo en Figura 2.1: etapas de Maduración ( $K_y=0,2$ ).

Este factor  $K_y$  sintetiza la relación déficit hídrico y rendimiento de una manera muy simple, pero engloba los numerosos procesos fisiológicos que regulan en la planta la respuesta a las variaciones en la oferta hídrica (Kaboosi y Kaveh, 2012) y su correcta determinación resulta crucial para un buen ajuste del modelo.

Es importante considerar que la sensibilidad de la respuesta de la planta, en términos de rendimiento, a la caída de la tasa evapotranspirativa, no es constante a lo largo del ciclo del cultivo, existiendo momentos de mayor sensibilidad. En el caso del maíz este periodo crítico se presenta en torno al momento de floración (Steduto *et al.*, 2012) (Fig. 2.1).

### 2.2.2 Rendimiento potencial $Y_x$

El rendimiento potencial expresa el máximo rendimiento posible para un cultivo determinado, desarrollado bajo condiciones óptimas de ambiente y manejo. La FAO presentó, en su Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 33 (1979), recomendaciones sobre las técnicas para determinar este rendimiento potencial, a partir del cálculo directo del rendimiento máximo de los cultivos mediante el procedimiento de Wageningen (Slabbers *et al.*, 1979) o a través de la estimación de la biomasa y aplicación del índice de cosecha, utilizando el enfoque de la zona ecológica (Kassam, 1977).



**Figura 2.1.** Funciones lineales de productividad del agua para el maíz, modificado de Steduto *et al.* (2012)  $K_y$  es una constante y corresponde a la pendiente de las rectas.

### 2.2.3 Evapotranspiración de referencia $ET_0$

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina  $ET_0$  [mm/día]. La superficie de referencia corresponde a un cultivo de pasto, cultivado sobre un suelo bien provisto de humedad y bajo parámetros definidos (Allen *et al.*, 2006). La  $ET_0$  permite caracterizar la demanda de la atmosfera independientemente del tipo y desarrollo del cultivo y de las prácticas de manejo.

En este trabajo, para el cálculo de  $ET_0$ , se utilizó la metodología propuesta por Penman-Monteith modificado (Allen *et al.*, 1998) que se convirtió en el método estándar a nivel mundial para este procedimiento, empleada por la FAO para sus modelos y ampliamente utilizada en nuestro país en ámbitos técnicos y académicos. La ecuación de Penman-Monteith permite calcular la  $ET_0$  a partir de parámetros ambientales como las temperaturas máxima y mínima, la velocidad del viento y la irradiación (Ver capítulo 3, Ec.3.2). (Allen *et al.*, 2006).

### 2.2.4 Evapotranspiración real del cultivo $ET_c$

Al igual que la  $ET_0$ , la evapotranspiración del cultivo  $ET_c$  se estima mediante modelos que incluyen variables ambientales, tanto meteorológicas, como de estado hídrico del suelo y fisiológicas del cultivo, que definen el rango de la  $ET_c$  entre 0 (cero) cuando el cultivo se encuentra en punto de marchitez permanente (estado caracterizado por un potencial hídrico del suelo de -15 atm), y un valor equivalente a la evapotranspiración máxima ( $ET_x$ ) cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo (estado hídrico asociado a un potencial hídrico del suelo en torno a las -0,3 atm), (Allen *et al.*, 1998).

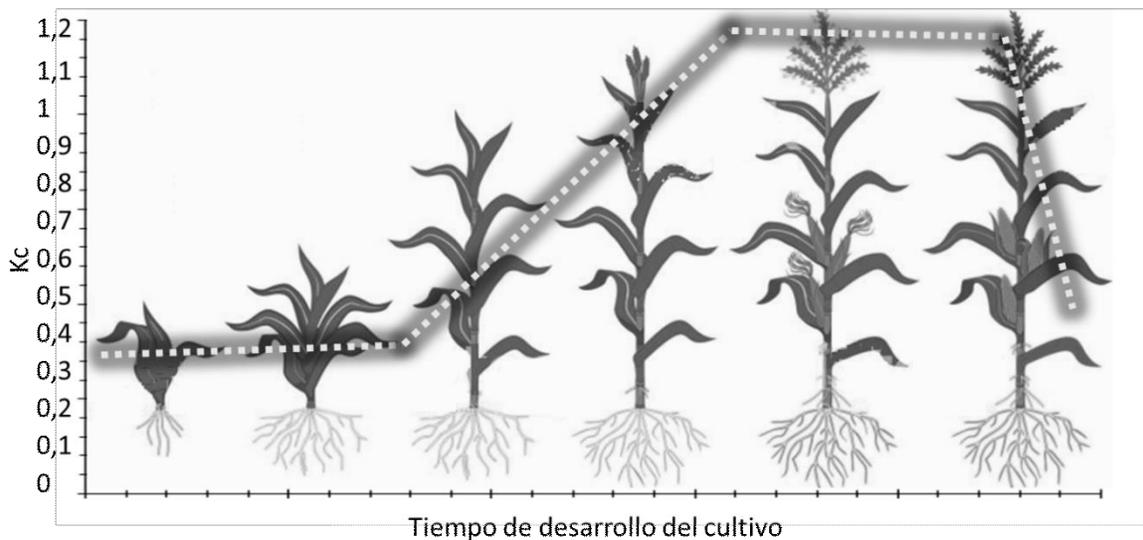
La forma de medir la  $ET_c$  y así poder calibrar los modelos, es mediante un lisímetro. Este es un equipo que consiste en una porción del suelo sin disturbar, ubicada dentro de

una batea cuyo peso es medido mediante una celda de carga o una balanza. Este dispositivo se dispone enteramente enterrado de tal manera que la superficie de la porción de suelo quede a la altura de la superficie del suelo del entorno. Mediante diferencias de pesada y control del agua ingresada y egresada del sistema, se puede medir la evapotranspiración del cultivo implantado en la batea del lisímetro.

La metodología empleada en esta tesis para estimar la  $Et_c$  consistió en afectar la  $Et_0$  por un coeficiente de cultivo  $K_c$ , que es característico de la especie y de cada estadio fenológico del cultivo (Figura 2.2), y que permite calcular el valor  $Et_c$ , como se observa en la ecuación 2.4 (Allen *et al.*, 2006). El coeficiente  $K_c$  es la expresión de la evaporación y la transpiración en forma conjunta en cuanto al cociente entre el cultivo estudiado y el cultivo de referencia (pastura). Según Allen *et al.* (1998), esta es la forma recomendada de calcular  $Et_c$  en el caso de un uso aplicado (planificación y diseño de sistemas de irrigación, programación de cronogramas de riego, entre otros).

$$Et_c = Et_x = Et_0 \cdot K_c$$

(Ecuación 2.4)



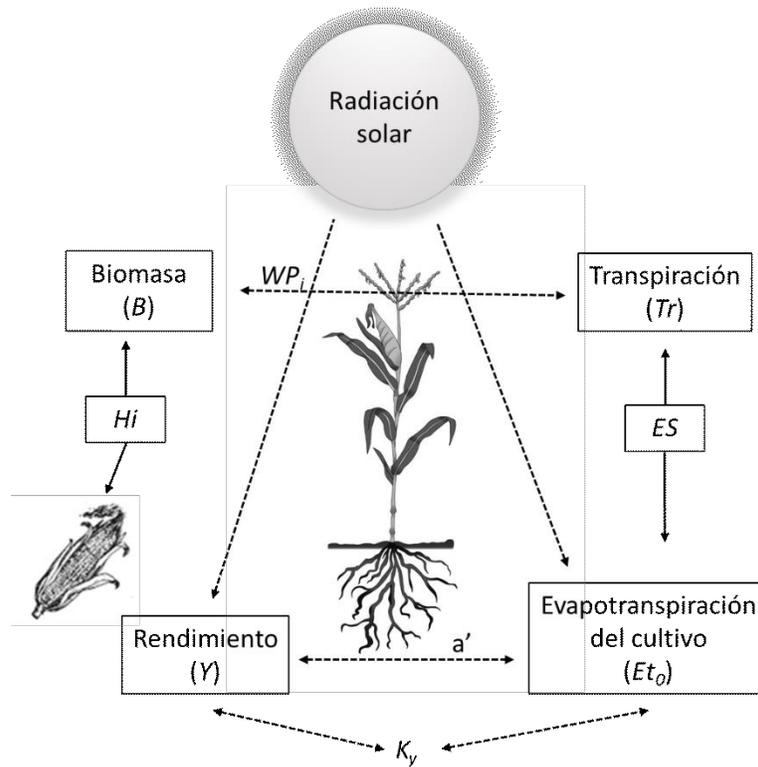
**Figura 2.2.** Variación del coeficiente de cultivo  $K_c$  en función del estado fenológico del cultivo.

### 2.2.5. Rendimiento real ( $Y_a$ ) y reducción del rendimiento del cultivo

El planteo central del modelo AquaCrop consiste en que establecidos el rendimiento máximo ( $Y_x$ ), la evapotranspiración de referencia ( $Et_0$ ) y evapotranspiración real del cultivo ( $Et_c$ ), se puede despejar de la ecuación 2.1 el rendimiento del cultivo ( $Y_a$ ). La reducción del rendimiento ( $Y_a$ ) en relación al rendimiento máximo ( $Y_x$ ) es expresada siempre como fracción o porcentaje del mismo (por ejemplo:  $1 - Y_a/Y_x$ ), más que en números absolutos de  $Y_a$  (Steduto *et al.*, 2012).

### 2.3. Estructura del modelo AquaCrop

Aquacrop modela el rendimiento de los cultivos a partir de la oferta hídrica y el consumo de agua (Figura 2.3), e incluye varios componentes adicionales agrupando estos parámetros en cuatro grupos principales: Clima, Cultivo, Suelo y Manejo.



**Figura 2.3.** Representación esquemática del principio de funcionamiento del modelo AquaCrop. La relación  $a'$ , no forma parte del modelo, pero es una relación usada en modelos ecofisiológicos.  $H_i$ : Índice de cosecha;  $ES$ : relación  $Tr/Et_0$ .

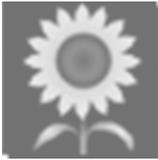
#### 2.3.1. Clima



El análisis del clima se hace a partir de la recopilación de información de parámetros atmosféricos con frecuencia variable, pudiendo ser entre diaria y mensual. Los parámetros son temperatura máxima ( $T_x$ ), temperatura mínima ( $T_n$ ), precipitación y demanda evaporativa del ambiente expresada como  $Et_x$  (Chaves de Oliveira *et al.*, 2016).

Además de estos datos, que en el caso de este trabajo fueron recabados con frecuencia diaria en una estación meteorológica Davis próxima al lote de cultivo en la misma EEJH; el modelo necesita la concentración media anual de  $CO_2$ . Por defecto, este dato ya viene cargado, siendo provisto por el Observatorio de Mauna Loa, Hawái, EEUU, que mantiene registros desde el año 1902 hasta la actualidad (Steduto *et al.*, 2009) de la concentración atmosférica del  $CO_2$ .

### 2.3.2. Cultivo



La caracterización del cultivo, se lleva adelante, según plantea Steduto *et al.* (2012) en el Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66, mediante una serie de 7 parámetros:

**A) Fenología:** El modelo AquaCrop, requiere que se precisen, para todos los cultivos herbáceos, a excepción de los forrajeros, cuáles son las etapas de desarrollo: emergencia, inicio de floración, inicio de senescencia y maduración, detallando la duración de cada una de las etapas.

**B) Desarrollo del dosel:** El dosel verde, constituye un elemento primordial dentro del modelo, ya que de su grado de expansión y de su conductancia estomática, depende la transpiración, parámetro que el modelo utiliza para cuantificar la generación de biomasa. El grado de senescencia y envejecimiento también son importantes a la hora de definir este factor.

El modelo AquaCrop utiliza el desarrollo del dosel y su expresión como fracción de la cobertura total del suelo (CC), a diferencia de otros modelos que utilizan el índice de área foliar (LAI) como parámetro. Esta característica, facilita la implementación del modelo, ya que la CC es fácilmente determinable, incluso a partir de observaciones visuales (Steduto *et al.*, 2012). A su vez, la CC tiene otra ventaja sobre el LAI, puesto que la superficie de hojas expuestas a la luz, en relación al LAI, varía según el marco de plantación, presentando mayor porcentaje de sombreado entre hojas para marcos de plantación menos estrechos (Adams *et al.*, 1976), y esta exposición diferencial a la radiación no es considerada en la medición del LAI.

Matemáticamente, el desarrollo del dosel se estima con dos ecuaciones exponenciales que caracterizan dos momentos diferentes del desarrollo. En la ecuación (2.5) se modela el crecimiento inicial del dosel. En esta etapa, la densidad de plantación actúa como factor determinante y la capacidad de captación de energía y de realización de fotosíntesis depende del grado de cobertura que se alcance. Una vez que el dosel cubre la mayor parte del suelo, el crecimiento del mismo pasa a explicarse por la ecuación (2.6), ya que el sombreado entre plantas y no el grado de cobertura del suelo, pasa a actuar como factor limitante.

$$CC = CC_0 \cdot e^{CGC \cdot t} \quad \text{(Ecuación 2.5)}$$

$$CC = CC_x - 0,25 \cdot (CC_x^2 / CC_0) \cdot e^{-CGC \cdot t} \quad \text{(Ecuación 2.6)}$$

Donde:

CC = Cobertura del dosel, [% ó fracción]

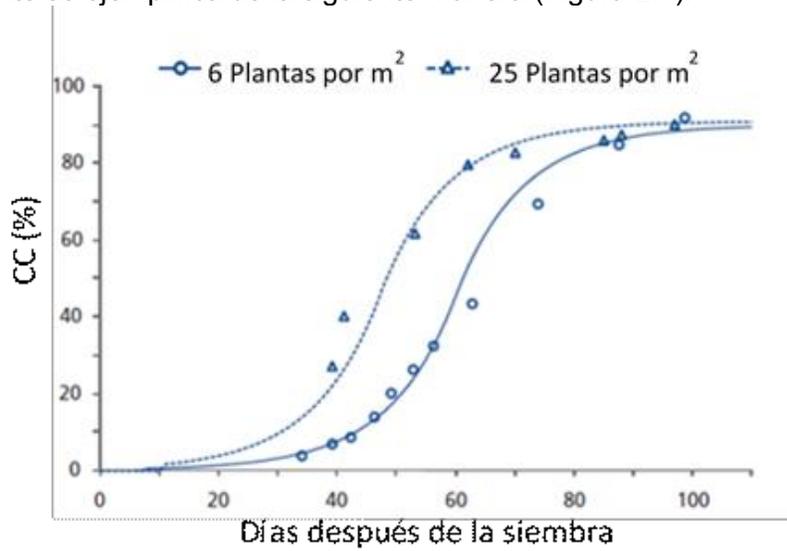
CC<sub>0</sub> = Cobertura del dosel cuando t = 0, [% ó fracción]

CGC = Coeficiente de crecimiento del dosel, [% ó fracción]

t = Tiempo, [días]

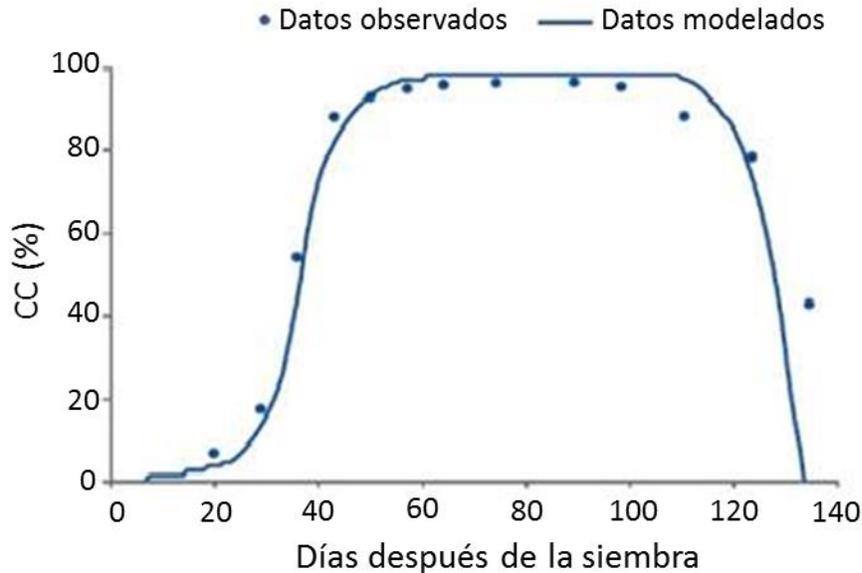
CC<sub>x</sub> = Cobertura máxima del dosel, [% ó fracción]

Ambas expresiones explican el desarrollo del dosel a lo largo del ciclo del cultivo, que gráficamente se ejemplifica de la siguiente manera (Figura 2.4):



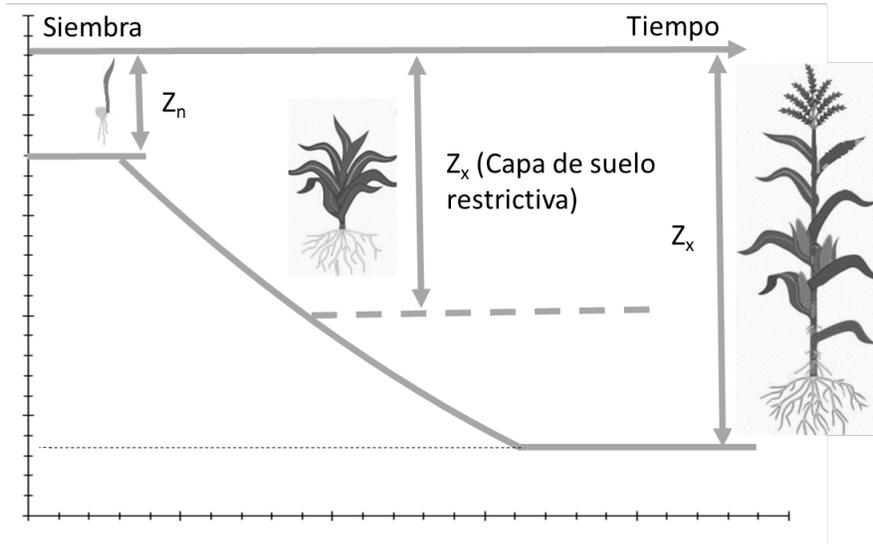
**Figura 2.4.** Representación del crecimiento de la cobertura del dosel (Canopy Cover o CC) para dos densidades de siembra de un cultivo con capacidad compensatoria como el algodón. Reelaborado a partir de (Steduto *et al.*, 2012)

El software de Aquacrop, permite comparar la curva simulada de desarrollo del dosel, con los valores medidos empíricamente durante el desarrollo del cultivo, tal cual se observa en la figura 2.5. Este recurso es una herramienta potente para la calibración del sistema, ya que evidencia de manera sencilla, el grado de ajuste que la simulación tiene en relación a la cobertura del dosel. Ésta a su vez, guarda a una relación directa con la producción de biomasa que fue el objetivo de las simulaciones en este trabajo.



**Figura 2.5.** Superposición de datos de la simulación de cobertura de dosel generada por AquaCrop, y la observación empírica de la cobertura durante el ciclo del cultivo, reelaborado a partir de (Steduto *et al.*, 2012).

**C) Profundización de raíces:** La profundidad efectiva de raíces ( $Z_e$ ) y el patrón de extracción del agua, permite simular la absorción de agua y nutrientes. Las raíces exploran el suelo en base a una dinámica de crecimiento del tipo exponencial (Figura 2.6). A la hora de simular la exploración del suelo por parte de las raíces, es importante tener en cuenta la existencia de impedancias mecánicas al desarrollo de las mismas que pueden determinar una capa restrictiva de suelo (líneas punteadas en Fig. 2.6), y describir apropiadamente las características texturales de cada uno de los horizontes.



**Figura 2.6.** Caracterización esquemática de la dinámica de profundización de las raíces en el suelo (eje y) en relación al tiempo (eje x).

**D) Transpiración del cultivo:** La transpiración ( $T_r$ ) puede considerarse como función de la cobertura del dosel (CC) y la micro-advención entre hileras puede considerarse constante (Adams *et al.*, 1976).

AquaCrop realiza el cálculo de transpiración en base a una ecuación empírica:

$$Tr = K_{c,Tr} \cdot ET_0 \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

$Tr$  = Transpiración del cultivo, en [mm]

$K_{c,Tr}$  = Coeficiente de transpiración del cultivo. Adimensional

$ET_0$  = Evapotranspiración del cultivo de referencia. [mm/día]

En base a la consideración de que  $T_r$  es proporcional a CC, para establecer el valor de  $K_{c,Tr}$  se procede con la siguiente ecuación:

$$K_{c,Tr} = CC^* \cdot K_{c,Trx} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Donde:

$K_{c,Trx}$  = Coeficiente de transpiración del cultivo cuando el dosel está casi completo. CC cercano a 1. Adimensional.

$CC^*$  = Cobertura del dosel verde. En porcentaje [%]

**E) Evaporación del agua del suelo:** El modelo separa la evapotranspiración en evaporación a partir del suelo desnudo (E), y transpiración de las plantas (Tr), para, a partir de ésta última y a través de la Productividad del agua (WP), definir la producción de biomasa. El modelo tiene en cuenta la fase I de la evaporación cuando éste se encuentra totalmente humedecido, y la fase II, cuando el suelo comienza a secarse y la presión de vapor del agua en superficie disminuye. También toma en cuenta cuando, por senescencia se pierde parte del dosel y éste ya no es tan efectivo en la reducción de la evaporación. En todos los casos, el modelo introduce una serie de factores que aumentan o disminuyen la E de acuerdo al canopeo y a la condición hídrica del suelo en ese momento.

**F) Producción de biomasa:** La relación entre la transpiración y la producción de biomasa, con la fotosíntesis como instancia intermedia y caracterizada mediante la productividad del agua (WP), viene siendo materia de estudio hace muchos años (de Wit, 1958).

La modelización llevada adelante a partir de la construcción de AquaCrop, permitió establecer que WP es prácticamente constante para cada especie, frente a condiciones de suficiencia nutricional e hídrica, aunque puede variar ampliamente al cambiar las condiciones ambientales (Zwart y Baastianssen., 2004). La ecuación que describe la productividad del agua implica que WP es dependiente de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y la concentración de  $CO_2$  (ecuación 2.10):

$$WP^* = \left[ \frac{B}{\sum \left( \frac{Tr}{ET_0} \right)} \right]_{[CO_2]} \quad \text{(Ecuación 2.10)}$$

Donde:

$WP^*$  = Productividad de biomasa normalizada [ $Tn/ha$ ]

B = Biomasa acumulada producida [ $Tn/ha$ ]

Tr = Transpiración del cultivo [ $mm$ ]

$ET_0$  = Evapotranspiración del cultivo de referencia [ $mm/día$ ]

$[CO_2]$  = Implica que la ecuación solo puede ser aplicada a una concentración determinada de este gas.

**G) Rendimiento cosechable:** El rendimiento del cultivo (Y), se expresa como función de la biomasa a partir del índice de cosecha (HI). El HI para cultivos donde se cosecha el grano, es cero en el momento de la floración y asciende en forma casi lineal hasta la madurez fisiológica (Moot *et al.*, 1996).

### 2.3.3 Suelo



Sabiendo que la producción de biomasa guarda estrecha relación con la transpiración, y que esta última lo hace con el balance hídrico del suelo, éste es un elemento esencial en el modelado (Vanuytretch *et al.*, 2014). En AquaCrop, la porción de suelo explorado por las raíces se puede subdividir hasta en 5 capas u horizontes de profundidad variable. En cada capa se consideran los siguientes parámetros: a) el contenido de humedad en el suelo en el punto de saturación; b) el contenido de agua no gravitacional máximo, conocido como capacidad de campo (FC), y cuyo valor convenido es la cantidad de agua retenida a  $-0,3$  mPa de potencial agua; c) el punto inferior de contenido de agua en el cual se alcanza el punto de marchitez permanente (PWP), cuyo valor convenido es la cantidad de agua retenida a  $-15$  mPa; y d) la conductividad hidráulica en condiciones de saturación ( $K_{sat}$ ). A partir de las características texturales y estos parámetros, el modelo estima la evaporación que se genera en el suelo, la percolación profunda, el ascenso capilar, el drenaje interno y la escorrentía superficial. El modelo también considera la profundidad y salinidad de la capa freática.

El conocimiento de los flujos de entrada (precipitaciones, riego y ascenso capilar) y de salida (escorrentía, evaporación, transpiración y percolación profunda), permite calcular para cualquier momento del ciclo del cultivo, la disponibilidad de agua en la zona radical, este cálculo es la piedra angular sobre la cual se sustenta el modelo. El almacenamiento de agua en la zona radical o de raíces puede expresarse como una lámina equivalente de agua ( $W_r$ ) o como agotamiento en zona radical ( $D_r$ ). El total de agua comprendida entre el punto de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, equivale al agua total disponible en el suelo (*Total Available Water* o TAW), también llamada "agua útil". El valor de  $D_r$  es 0 (cero) cuando el suelo está a capacidad de campo (FC), e igual a TAW cuando el suelo está en el punto de marchitez permanente (PWP).

El modelo subdivide a su vez, los 5 horizontes del suelo en 12 compartimentos que abarcan la profundidad que alcanzan las raíces, y adapta el radio que ocupan en función de dicha profundidad. Cada compartimento cobra las características hidráulicas del horizonte en el que se encuentra. El modelado del balance hídrico y salino que genera AquaCrop de forma diaria, en cada uno de los 12 compartimentos, se calcula a partir de una estimación previa del movimiento horizontal y vertical del agua y las sales dentro del perfil.

### 2.3.4. Manejo de los cultivos

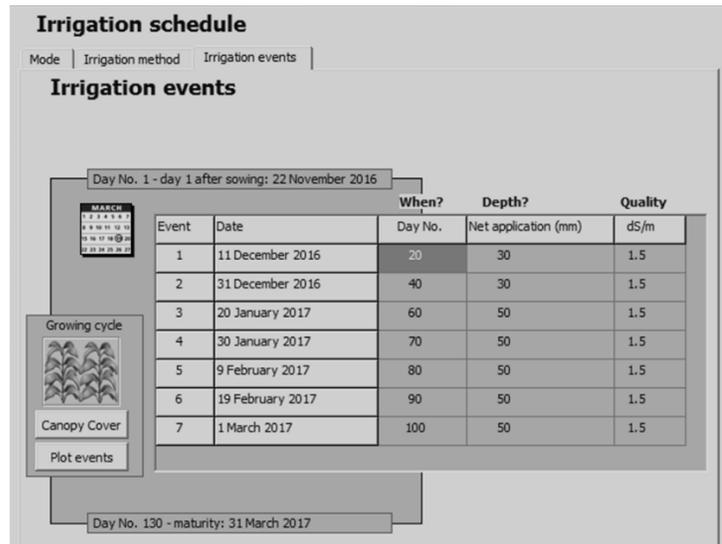


Se entiende manejo de un cultivo a la sumatoria de labores culturales y decisiones técnicas que definen el marco físico en el cual el mismo se desarrolla.

El modelo AquaCrop divide el manejo en dos grupos, el manejo del riego (A), que incluye numerosas variables que lo caracterizan, y el manejo de campo (B), que incluye aspectos más generales, como fertilización y laboreo.

**A) Manejo del riego:** El modelo se adapta a condiciones de secano y bajo riego. En caso de utilizar riego, es necesario definir el método de aplicación de agua (aspersión, gravitacional, goteo), calidad de agua y calendario de aplicación con tiempos y

profundidades de riego (Figura 2.7). El modelo es capaz de generar su propio calendario y estimar las demandas hídricas del cultivo si así se desea.



**Figura 2.7.** Ejemplo de carga de eventos de riego en la interfaz del modelo AquaCrop.

**B) Manejo de campo:** Incluye tres aspectos principales:

*Fertilidad:* Interpreta los cambios de la generación de biomasa atribuibles a variaciones en la disponibilidad de nutrientes para el cultivo. Se incluye en el modelo como un factor que afecta la tasa de crecimiento del canopeo (CGC), la cobertura máxima del dosel (CCx), la cobertura del dosel en un momento dado (CC) y la productividad del agua (WP). Es recomendable realizar una calibración local para diferentes niveles de fertilidad. En nuestro experimento trabajamos con un único nivel de fertilización, sin limitaciones y por lo tanto durante la calibración del modelo se seleccionó "non limiting" como fertilidad del suelo.

*Acolchado o mulching:* Se lo considera para incluirlo en el modelado por el impacto que la cobertura de la superficie genera en la evaporación desde el suelo y el balance hídrico. En nuestro experimento solo contamos con la biomasa vegetal remanente del rastrojo del cultivo previo.

*Caballones:* Se considera la construcción de obras que frenen la escorrentía superficial para garantizar la infiltración del agua en el lugar. En nuestro experimento no hubo sistematizaciones de terreno.

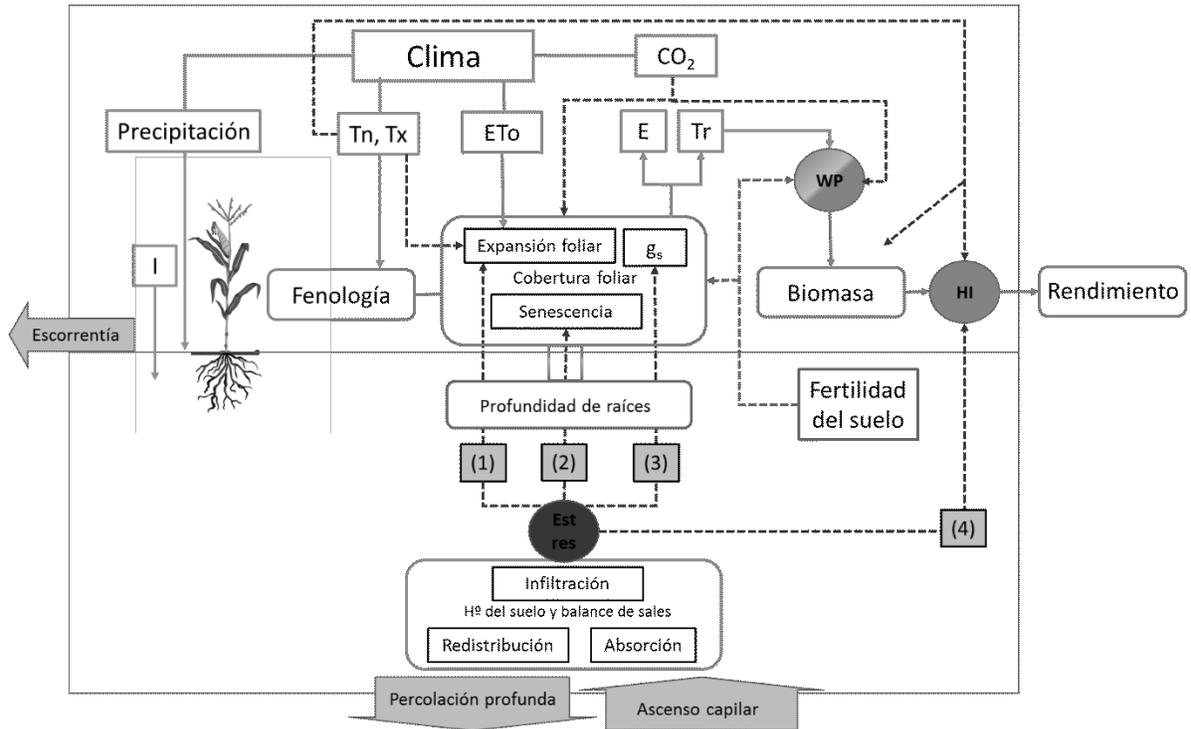
**2.4 Respuesta al estrés**

El modelo AquaCrop basa su simulación en la generación de biomasa a partir de la oferta hídrica, incluyendo también a la temperatura y otros factores en el cálculo. Los estreses abióticos condicionan fuertemente la generación de biomasa y el rendimiento de los cultivos, por este motivo más allá de los estreses hídricos y térmicos, ya considerados; es necesario incluir también los estreses por salinidad del suelo y por déficit nutricionales. Éstos son incorporados indirectamente al AquaCrop, sin entrar en la modelación de la

dinámica de sales ni de ciclado de nutrientes, como proponen otros modelos, evitando una complejidad conceptual y metodológica mayor. En el modelo se establecen umbrales y grados de sensibilidad frente al estrés que se expresan en la modificación de la expansión foliar, la senescencia anticipada y el índice de cosecha para cada uno de los estreses.

La modelización del impacto de los diferentes estreses sobre las distintas variables es compleja, puesto que no siempre las respuestas del cultivo se dan en un mismo sentido. Por ejemplo, el estrés puede redundar en incrementos o reducciones del índice de cosecha (HI). Un estrés leve que reduce la expansión foliar pero no la apertura estomática, durante el periodo de llenado de granos, puede definir qué parte de los fotoasimilados destinados a expansión foliar terminen en el grano, mejorando el índice. Por otro lado, un estrés mayor, que reduce la expansión foliar y la apertura estomática, impactará marcadamente en el llenado de granos, reduciendo el HI.

En la figura 2.8 se pueden observar, de forma integrada, cómo se considera dentro del modelo que los diferentes factores o funciones forzantes, afectan al canopeo y la biomasa, incluidos los estreses hídrico, térmico, salino, y de nutrientes.



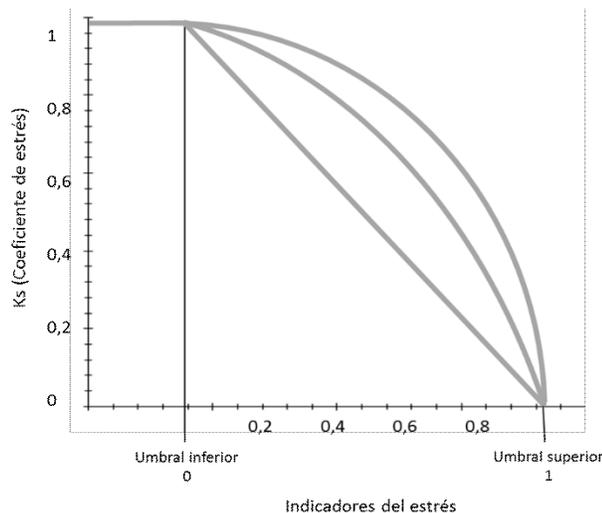
**Figura 2.8.** Interacciones principales del continuo suelo-planta-atmósfera y los parámetros que determinan la fenología, la cobertura del dosel, la transpiración, la producción de biomasa y el rendimiento final. Las líneas continuas son vínculos directos entre variables y procesos. Las líneas punteadas indican retroalimentación. Los símbolos son: I, riego; T<sub>n</sub>, temperatura mínima del aire; T<sub>x</sub>, temperatura máxima del aire; ET<sub>0</sub>, evapotranspiración de referencia; E, evaporación del suelo; Tr, transpiración del dosel; g<sub>s</sub>, conductancia estomática; WP, productividad del agua; HI, índice de cosecha; CO<sub>2</sub>, concentración de dióxido de carbono en la atmósfera; (1), (2), (3), (4), funciones de respuesta al estrés hídrico para la expansión foliar, senescencia, conductancia estomática e índice de cosecha, respectivamente. Reelaborado y modificado en base a de Steduto *et al.* (2012)

#### 2.4.1. Funciones de respuesta al estrés

La influencia de los diferentes factores de estrés en los resultados del modelo queda incluida en los coeficientes de estrés ( $K_s$ ), que expresan el impacto relativo de un factor particular en un estadio determinado sobre el rendimiento. Los coeficientes varían entre 1 (sin estrés) y 0 (estrés máximo).

Para caracterizar la acción de cada uno de los distintos factores estresantes se escoge una variable indicadora (Ej: agotamiento del agua en el suelo para el estrés hídrico, o temperatura máxima del día para estrés térmico) y se utiliza un modelo que consta de un valor umbral superior de la misma, a partir del cual  $K_s=1$ , y un valor umbral inferior a partir del cual  $K_s=0$ . Cada uno de estos puntos umbrales, indica donde el proceso de crecimiento no es afectado por el estrés y donde es completamente inhibido por el estrés, respectivamente (Figura 2.9).

Un punto importante a la hora de pensar en la calibración del modelo, es la forma que toma la curva que une los umbrales superior e inferior de cada  $K_s$  correspondiente a cada estrés. Ésta puede ser lineal o tener diferentes grados de convexidad. Cuanto más convexa es la curva, más resistente es la especie a un estrés en particular o mayor inercia al cambio tiene la variable indicadora.



**Figura 2.9.** Ejemplo de diferentes formas que puede tomar la función que caracteriza la variación del coeficiente estrés ( $K_s$ ) en función de la intensidad observada para el indicador del estrés. Reelaborado a partir de datos obtenidos en Steduto *et al.*, 2012.

Se explican a continuación, los 5 factores de estrés, las variables indicadoras consideradas en el modelo, así como también su relación con los  $K_s$  respectivos.

**A) Estrés hídrico:** El agotamiento del agua disponible en la zona de la raíz ( $D_r$ ), se expresa como una proporción de TAW (punto 2.3.3). El modelo simula estrés por déficit o por exceso (que en el modelo en realidad se expresa como déficit de aireación; ver punto B).

Los efectos del estrés hídrico, son interpretados por el modelo mediante la afectación de tres parámetros: ( $K_{s_{exp}}$ ) desarrollo del canopeo; ( $K_{s_{sto}}$ ) apertura estomática y ( $K_{s_{sen}}$ ) senescencia acelerada (Figura 2.10). Por sobre el valor umbral de contenido hídrico del agua en el suelo para cada uno de los  $K_s$ , el estrés hídrico no se considera, y  $K_s$  toma

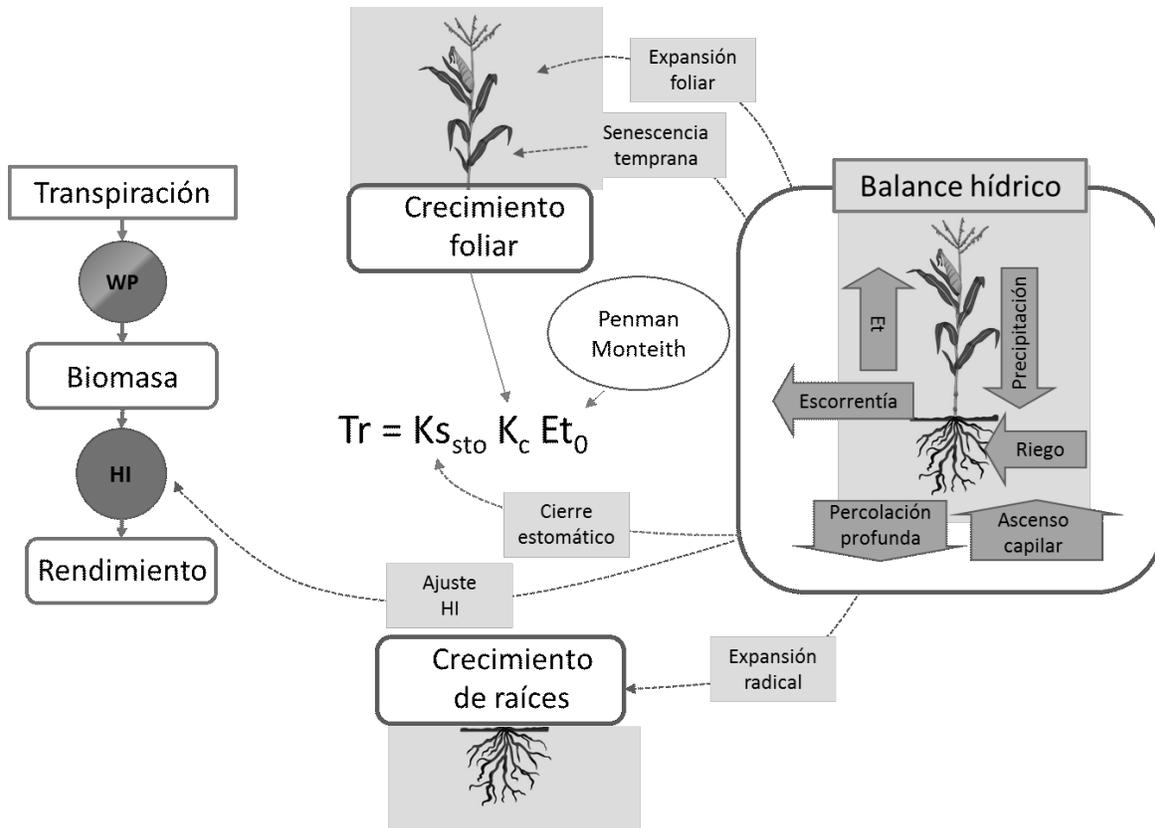
un valor de 1. Por debajo del umbral inferior, el estrés es considerado máximo, y  $K_s$  toma un valor de 0, entre 0 y 1 los valores que toma  $K_s$  en función del contenido hídrico quedan definidos por la forma de la curva de la figura 2.9.

Los umbrales se expresan como una fracción del agua disponible total (TAW). Cada uno de los parámetros del estrés tiene sus propios umbrales, porque presentan diferente grado de sensibilidad en la respuesta. Las líneas roja, verde y amarilla, en la parte inferior de la figura 2.11, indican los umbrales superiores de contenido hídrico a partir de los cuales el modelo afecta la expansión foliar, la apertura estomática y la senescencia anticipada respectivamente.

Los valores de  $K_s$  para el factor estrés hídrico, son modulados por el modelo en función de la oferta hídrica y la demanda transpirativa de la atmósfera. Por convención se considera el  $K_s$  seleccionado para una  $ET_0 = 5$  mm/día, pero demandas atmosféricas extremas pueden modificar el nivel del estrés para una misma condición hídrica del suelo, y viceversa.

La información existente hasta el momento, hace pensar que tanto los umbrales de estrés, como la forma de la curva que relaciona contenido hídrico con la magnitud de  $K_s$ , son parámetros conservativos de los cultivos (Heng y col., 2009, Hsiao y col., 2009).

El déficit hídrico, es modulador del índice de cosecha (HI), pero su inclusión en el modelo se realiza de forma indirecta, mediante la afectación de los  $K_{s_{exp}}$  y  $K_{s_{sto}}$  propios de cada cultivo, a los que se suma un  $K_{s_{pol}}$ , o de polinización, para los casos de déficit extremo en los que la polinización se ve afectada. La particularidad de la respuesta del HI al déficit hídrico, radica en que el HI para estreses leves se incrementa, y para estreses agudos disminuye nuevamente.



**Figura 2.10.** Estrés hídrico: representación esquemática de las interrelaciones que genera este estrés dentro del modelo y su impacto en los procesos y estructuras vegetales del cultivo.

**B) Estrés de aireación:** Cuando el suelo se encharca, todos los poros del mismo están ocupados con agua y la presencia de aire (y de oxígeno) cae por debajo de los necesarios para un apropiado desarrollo de la planta. La variable utilizada por el modelo para parametrizar este estrés es el porcentaje del volumen de poros en el suelo ocupado por aire en la zona radical. Si el volumen ocupado por aire es elevado, entonces  $K_{s_{aer}}$  tiende a 1, de lo contrario, tiende a 0. El coeficiente  $K_{s_{aer}}$  modifica la transpiración ( $T_r$ ), y por ende la producción de biomasa (B), y la evaporación desde el suelo (E).

**C) Estrés térmico:** Las variables indicadoras son la acumulación de grados día (GDD) y las temperaturas máximas (estrés por calor) y mínimas del aire (estrés por frío) para determinar los valores umbrales y los  $K_s$  correspondientes.

Los GDD son una medida integrada de la temperatura diaria. Las curvas de  $K_s$  con respecto a las temperaturas mínimas o máximas o a la GDD tienen una forma logística. La temperatura afecta a la fenología, la expansión del dosel, la biomasa y la transpiración. El efecto sobre esta última ( $T_r$ ) se ajusta por la  $Et_0$ , pero las dos primeras y la biomasa incluyen la influencia térmica a través de las  $K_s$ .

**D) Estrés por salinidad:** Para asignar un  $K_s$  para salinidad, se mide la conductividad eléctrica de la solución del suelo saturado ( $EC_e$ ) en la zona radical. Los umbrales inferior y superior,  $EC_{en}$  y  $EC_{ex}$  son tomados de la bibliografía de Ayers y Westcot (1985) y marcan los límites en que  $K_s$  se vuelve 1 y 0 respectivamente. Por ejemplo el maíz, se considera una especie con un nivel medio de sensibilidad a la salinidad, siendo su límite inferior de

ECs=1,7 dS/m para un rendimiento potencial del 100% y su límite superior de ECs=10 dS/m para un rendimiento del 0% (Ayers y Wescot, 1985, Tabla 4: 2.4.3 Crop tolerance salinity). Las condiciones iniciales del lote, en nuestro caso, indicaban una conductividad del suelo de 2 dS/m.

**E) Estrés nutricional:** En cuanto a los nutrientes, AquaCrop no incluye los procesos de los ciclos de nutrientes, pero permite la simulación de la falta de nutrientes a través del cálculo de un  $K_s$  que influye sobre la cobertura del dosel (CC), la velocidad de crecimiento del dosel (CGC), la velocidad de senescencia (CDC) y la productividad del agua (WP). Esto último se debe a que las plantas que crecen en suelos con bajos niveles de N, P y/o K, crecen más despacio, fotosintetizan a una tasa más baja, sus hojas basales senescen más rápido pero conservan por más tiempo las hojas distales y la relación fotosíntesis/transpiración es menor. Afectando WP, entonces, queda afectada la biomasa producida y por lo tanto el HI, explicado por la ecuación 2.3.

Para calcular la  $K_s$ , AquaCrop realiza ajustes según los niveles de los nutrientes esenciales desde 0%, cuando la fertilidad del suelo no es limitante, a 100% cuando las restricciones de fertilidad impiden el desarrollo del cultivo ( $K_s=1$  y  $K_s=0$ , respectivamente). En el caso de nuestro experimento, se desarrolló en un suelo que poseía buena fertilidad al inicio del experimento, y fue debidamente fertilizado para evitar la ocurrencia de estrés por déficit nutricional.

## **2.5. Parametrización, calibración y validación del modelo**

### **2.5.1. Parámetros conservativos y no conservativos**

AquaCrop es un modelo pensado para poder ser utilizado en un amplio rango de climas y geografías sin necesitar una calibración local, una vez que ha sido correctamente parametrizado para un cultivo determinado.

Los parámetros del modelo pueden clasificarse en dos grupos: conservativos, que son aquellos que permanecen estables bajo diferentes condiciones de cultivo; y no conservativos, que son aquellos que dependen de las prácticas de manejo, ubicación y variedad del cultivo.

Es importante considerar que los parámetros conservativos suelen ser calibrados a partir de ensayos realizados bajo condiciones controladas, con variedades de alto rendimiento y en ausencia de limitantes al crecimiento y desarrollo. Por esta razón, puede ser necesario ajustar los parámetros en caso de notar un ajuste insatisfactorio del modelo durante las simulaciones.

Debido a que para un mismo cultivo las distintas variedades pueden presentar parámetros conservativos levemente diferentes, el modelo contempla la posibilidad de seleccionar parámetros conservativos para diferentes clases varietales.

Los datos requeridos a fin de simular la producción y el uso del agua se detallan en la tabla 2.1. Para poder llevar adelante una simulación estimativa, el modelo requiere, en principio, de los datos básicos, que constan en la primera columna de la tabla. En el

caso de necesitar mejorar el ajuste de los resultados, se requieren también, los datos adicionales de la segunda columna.

**Tabla 2.1.** Información requerida por AquaCrop para llevar adelante simulaciones.

	<b>Requerimientos mínimos</b>	<b>Datos adicionales para incrementar la confianza</b>
<b>Cultivo</b>	<p>Rendimiento del grano y peso del grano en relación a la biomasa aérea (estimación del HI).</p> <p>Fechas de siembra y cosecha y duración estimada del ciclo biológico del cultivo.</p> <p>Densidad de siembra y porcentaje de germinación.</p>	<p>Biomasa aérea al momento de la cosecha.</p> <p>Fecha de emergencia y madurez fisiológica del grano.</p> <p>Profundidad máxima estimada de raíces.</p> <p>Máximo del índice de área foliar o de la cobertura de canopeo alcanzada.</p>
<b>Clima y ET</b>	<p>Valores medios de 10 días o mensuales de temperaturas máximas y mínimas, porcentaje de días soleados, regímenes de viento y humedad, latitud y elevación.</p> <p>Datos de referencia de evaporación por método de tanque (estimación de <math>ET_0</math>)</p> <p>Datos preferentemente diarios de precipitaciones.</p>	<p>Valores promedio semanales o de 10 días de radiación solar global diaria, temperaturas máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima y velocidad de viento. También pueden ser diarios.</p> <p>Precipitaciones diarias.</p> <p>Evapotranspiración estimada por el balance hídrico a largo plazo.</p>
<b>Suelo y fertilidad</b>	<p>Clase textural de suelo.</p> <p>Pendiente y capacidad de retención de agua del suelo.</p> <p>Fertilidad general del suelo.</p> <p>Práctica de fertilización del suelo.</p>	<p>Textura para cada horizonte del suelo y existencia de limitaciones al crecimiento de raíces.</p> <p>Tipo, tasa y tiempo de fertilización.</p>

<b>Riego y agua del suelo</b>	<p>Método de aplicación de agua y calendario de riego aproximado.</p> <p>Idea aproximada de contenido de agua en el suelo a la siembra.</p>	<p>Fechas exactas y cantidades estimadas de riego.</p> <p>Medición concreta del contenido de humedad de suelo a la siembra.</p>
-------------------------------	---	---

Si lo que se pretende es llevar adelante una validación y parametrización del modelo, los datos incluidos deben ser lo más rigurosos y detallados posibles (Heng *et al.*, 2009). Para caracterizar los parámetros conservativos fue necesario recopilar gran cantidad de datos, garantizando que los mismos provengan de diferentes condiciones ambientales, para darle robustez al parámetro.

La incorporación de mediciones y observaciones periódicas de la CC, la humedad del suelo, la biomasa aérea, signos de estrés, etc. durante el ciclo del cultivo, se procesa mediante la función "*Field data*" que permite comparar la evolución simulada y la evolución en la medición de estos parámetros a lo largo del ciclo del cultivo, permitiendo evidenciar posibles desviaciones en la modelación, ganar confianza en el resultado y mejorar la calibración.

### 2.5.2. Evaluación de los resultados y ajuste de los parámetros

Las primeras simulaciones que se operaron con el modelo, se realizaron a partir de datos estimados, cuyo resultado se contrasta con los datos obtenidos de mediciones experimentales, a fin de observar el grado de ajuste y corregir los parámetros.

El uso de iteraciones de prueba y error para calibrar el proceso se llevó adelante, siguiendo las reglas generales propuestas por Steduto *et al.* (2012) para optimizar el uso del tiempo y el trabajo durante la calibración.

Regla 1: Comprender bien los principios subyacentes al modelo, el diagrama de flujo y la secuencia de pasos seguida para efectuar los cálculos.

Regla 2: Prestar atención a la simulación gráfica que se observa en la pestaña *Clima-Cultivo-Agua* del suelo en la página de ejecución de la simulación, así como los valores de las pestañas *Producción y Clima*, y *Balance de Agua*. Observar que los valores generados son razonables, es un primer indicio del ajuste.

Regla 3: Tener en claro el grado de exactitud y fiabilidad de los datos utilizados y generados durante la simulación, para iniciar los ajustes en aquellos datos menos confiables antes de comenzar a modificar otros parámetros.

Regla 4: Si los datos simulados y los medidos no concuerdan, verificar primero la exactitud de las mediciones de los datos de campo, antes que modificar alguno de los parámetros conservativos del modelo.

## 2.6. Datos de entrada



Los datos que AquaCrop requiere para proceder a la simulación, son relativamente sencillos de obtener. La información requerida hace referencia al clima, las características del cultivo, del suelo, y las prácticas de manejo que definen el desarrollo del cultivo. El modelo permite acceder, a partir de la base de datos a todos los valores, tanto cargados como generados, y realizar modificaciones.

Una vez que los datos se han cargado para cada uno de los factores, el programa los mantiene compilados en archivos independientes para cada uno de ellos.

- Archivos .CLI: Contienen la información climática, que reúne la temperatura, las precipitaciones, la evapotranspiración y el nivel de CO<sub>2</sub> para el lugar y momento donde se lleva adelante la aplicación del modelo.
- Archivos .CRO: Contienen la información cronológica del cultivo, expresada en grados día (GDD) o días calendario (CD), del calendario del cultivo, el desarrollo del cultivo, la productividad, los factores de estrés y los coeficientes que permiten tratar la evapotranspiración desde la particularidad del cultivo a modelar.
- Archivos .IRR: Forman parte de los datos englobados en la sección *Management* y contiene información sobre la técnica de irrigación, su eficiencia, la calidad de agua, el calendario de riego y las láminas aplicadas.
- Archivos .MAN: Contienen la información del “*Field management*” que incluye la existencia de cobertura superficial o mulch, la presencia de prácticas de superficie que modifiquen la escorrentía, la fertilidad y la presencia de malezas.
- Archivos .SOL: Contienen la información sobre el tipo de suelo, la cantidad de horizontes, su profundidad y textura.
- Archivos .GWT: Contienen la información sobre el agua subsuperficial, la profundidad de la capa freática, la conductividad eléctrica y la variación temporal de los mencionados factores.
- Archivos .SW0: Contienen la información de las condiciones iniciales de la simulación. Incluyen la humedad del suelo y su salinidad a lo largo del perfil, y la cobertura del canopeo, la biomasa y la profundidad de las raíces (si estuviera medida).
- Archivos .OBS: Contienen la información obtenida a campo durante el ciclo del cultivo, recogida experimentalmente, mediante mediciones y no mediante simulación. Pueden contener datos de humedad del suelo, cobertura de canopeo y biomasa aérea.
- Archivos .PRO: Se denominan “archivos de proyecto”, y son archivos de segundo orden, es decir, que contienen un conjunto de los archivos enumerados previamente; reuniendo todos los datos necesarios para llevar adelante una simulación y facilitando el proceso de selección de archivos.

## 2.6.1. Consideraciones sobre los datos de entrada

### A) Clima y $E_{t_0}$

*Temperatura y  $E_{t_0}$* : El modelo opera simulaciones en base diaria, debido a que las variaciones en el estado hídrico y la respuesta fisiológica del cultivo son dinámicas, y expresarlas en relación a plazos de tiempo más prolongados haría perder información valiosa. No obstante, el modelo permite trabajar con valores de temperatura y  $E_{t_0}$  cada 10 días o mensuales, realizando interpolaciones si no se dispusiera de valores diarios.

Los efectos de la temperatura son considerados de manera directa e indirecta en el desarrollo del cultivo. Los grados día se incluyen en el desarrollo, siendo importante establecer los umbrales superior e inferior. En la  $E_{t_0}$  se involucra indirectamente el factor temperatura, y también forma parte del modelo el efecto inhibitorio de las bajas temperaturas sobre la transpiración y de las altas temperaturas sobre la polinización, incluidas en los respectivos coeficientes de estrés.

*Humedad del suelo*: En el modelo la disponibilidad y consecuente limitación hídrica se expresa como una fracción del agua disponible total (TWA). El TWA se considera como la totalidad del agua contenida entre los puntos de marchitez permanente (PWP) y capacidad de campo (FC). Es importante que en caso de que el suelo cuente con varios horizontes, y los mencionados parámetros sean diferenciados para cada uno de ellos. Estos valores cobran mayor importancia en tanto y en cuanto el déficit hídrico sea mayor.

*Conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ )*: Es un parámetro importante en relación a la humedad del suelo, ya que la conductividad hidráulica saturada del estrato superficial determina la percolación profunda y la escorrentía superficial, y en consecuencia la dinámica de almacenamiento de agua en la zona radical.

### B) Contenido inicial de agua en el perfil

Para llevar adelante la simulación, el modelo se basa en el balance hídrico del suelo, y el punto de partida del mismo es el contenido inicial del agua en el suelo. Por este motivo es recomendable medir el contenido hídrico en cada uno de los estratos, si bien el mismo se puede estimar en base al cálculo de las pérdidas por evaporación a partir de la última precipitación que puso el suelo a capacidad de campo.

En general, para concretar evaluaciones comparativas de la respuesta del cultivo a diferentes ofertas hídricas, se realiza un riego de asiento que establezca como punto de partida del experimento un suelo a capacidad de campo en el momento del inicio del cultivo. En el trabajo experimental de esta tesis, no se realizó el riego de asiento, ya que se busca replicar la condición de secano para uno de los tratamientos, por lo que se extrajeron con barreno muestras de suelo de cada horizonte en el momento de la siembra y se evaluó su contenido hídrico mediante gravimetría, para caracterizar la situación inicial.

### C) Fenología del cultivo

Los primeros datos a considerar en relación a la fenología del cultivo, son los momentos que definen los estadios del cultivo. En el caso de AquaCrop, estos momentos son: a) fecha de siembra, b) el 90% de la emergencia de las plántulas y CC inicial del cultivo,

c) inicio de la floración, d) CC máximo y días a los que se alcanza, e) inicio de la senescencia del dosel, f) duración de la floración, g) madurez fisiológica e índice de cosecha. Por tratarse de parámetros determinados en gran medida por la genética del híbrido utilizado, para el desarrollo experimental de la tesis utilizamos el híbrido KM 3800 del semillero KWS, bien caracterizado fenológicamente.

#### D) Productividad normalizada del agua (WP')

La productividad del agua (WP) es la relación entre la biomasa producida y el agua transpirada. Esta relación se normaliza por la demanda evaporativa y la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera. La ecuación (2.11) permite generar, para un rango de tiempo, un valor de transpiración normalizado por la evapotranspiración (Steduto *et al.*, 2007), mientras que la ecuación (2.12), permite ponderar la productividad del agua considerando las variaciones en la concentración de  $CO_2$  atmosférico.

$$ET \text{ normalizada} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Tr}{ET_0} \right)_i \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Donde:

$ET \text{ normalizada}$  = Evapotranspiración, [mm/día]

$i$  = Intervalo de tiempo entre muestreos de biomasa

$n$  = número de muestras de biomasa

$Tr$  = transpiración acumulada en el intervalo, [mm] o [ $m^3/m^2$ ]

$ET_0$  = Evapotranspiración del cultivo de referencia promedio, [mm] o [ $m^3/m^2$ ]

$$f_{CO_2} = \frac{\left( \frac{C_a}{C_{a,0}} \right)}{1 + 0,000138 \cdot (C_a - C_{a,0})}$$

(Ecuación 2.12)

Donde:

$f_{CO_2}$  = Factor de  $CO_2$  para normalización de  $CO_2$  atmosférico

$C_a$  = Concentración atmosférica media anual de  $CO_2$ , [ppm]

$C_{a,0}$  = Concentración atmosférica media anual de  $CO_2$  para el año 2000, [ppm]

#### E) Índice de cosecha de referencia ( $HI_0$ )

Se debe considerar un valor medio de HI para el cultivo, y evitar modificarlo, ya que esto implica una recalibración de los parámetros asociados al impacto del estrés en el

rendimiento. Los valores de  $HI_0$  son estables y se recomienda revisar la información en caso de obtener valores alejados de los de referencia, que rondan el 0,5 para cultivos de granos almidonosos, valores 20 a 30 % menores para granos oleaginosos y 29 a 30% mayores para raíces y tubérculos. En esta tesis, como ya se mencionó, el HI no cobra mayor importancia debido a que el ciclo cultivo, por tratarse de un maíz para silaje, no se extendió hasta la cosecha del grano.

## F) Funciones de respuesta al estrés hídrico ( $K_s$ )

El estrés hídrico es incluido en el modelo mediante su impacto en el crecimiento foliar, la conductancia estomática y la senescencia del cultivo, que son los factores utilizados para la construcción del  $K_s$  (Figuras 2.8., 2.9. y 2.10.).

Cada uno de estos factores tiene, en función de su sensibilidad, un umbral superior e inferior definido dentro del rango del agua potencialmente disponible en la zona de raíces (TAW).

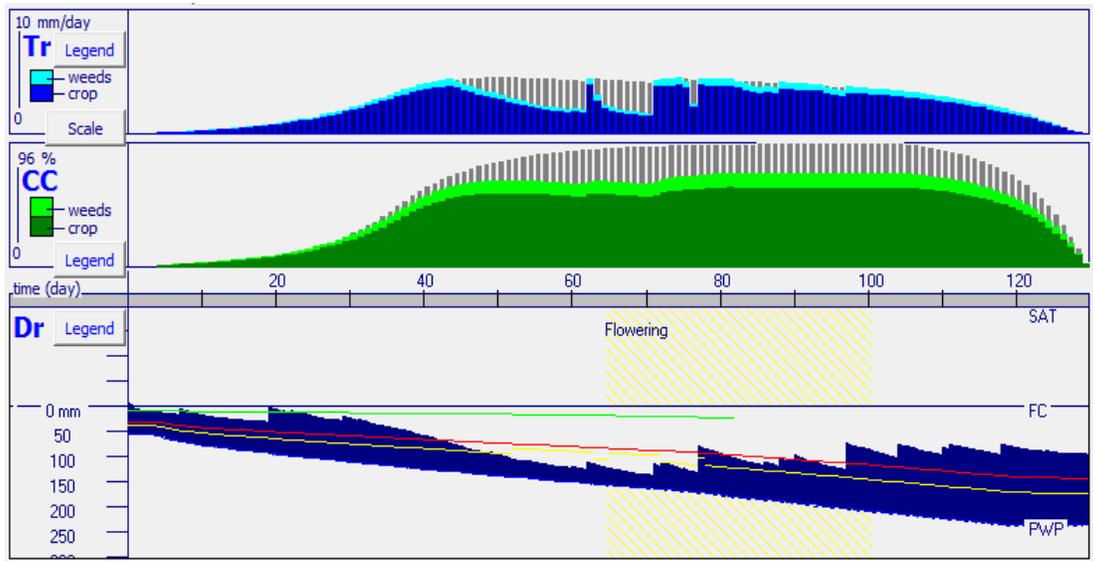
### 2.7. Datos de salida

Una vez cargados todos los datos, se ejecuta el programa mediante la función *Simulation Run*. Al llevar adelante la simulación, se genera toda una nueva serie de datos que describen la variación de la humedad del suelo, la transpiración, el crecimiento del dosel y el rendimiento del cultivo, entre otros.

Los datos se presentan tanto en forma gráfica (por ejemplo, Figura 2.11) como tabulada, a escala diaria, permitiendo observar la dinámica que asumen los distintos factores de estrés (hídrico, térmico, de fertilidad y salino) en el crecimiento del cultivo, la productividad y uso del agua (Raes *et al.*, 2009).

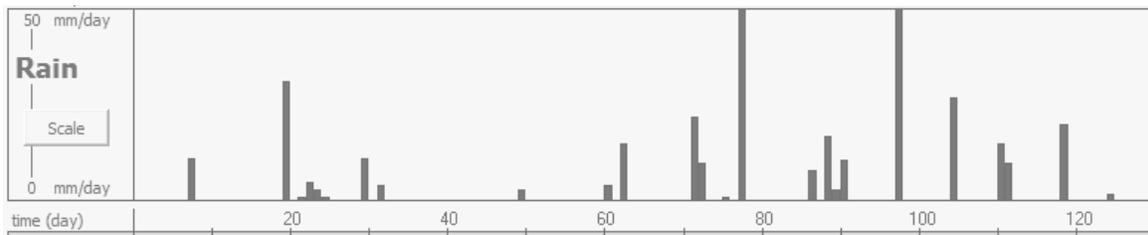
En la pestaña *Climate-Crop-Soil* de la simulación, se puede observar la variación de los tres siguientes parámetros, altamente significativos en el modelo a través del tiempo (Figura 2.11).

- La transpiración ( $T_r$ ) tanto del dosel (área azul=cultivo y área celeste=malezas), como la transpiración potencial para el desarrollo del dosel actual (barras grises finas).
- La cobertura del dosel (CC) generada tanto por el cultivo (área verde oscuro) como por las malezas (área verde claro), y la CC máxima en caso de haberse desarrollado en condiciones óptimas como referencia (barras grises finas).
- El agotamiento de la humedad del suelo en la zona radical ( $D_r$ ) con las referencias del punto de marchitez permanente (PWP) y capacidad de campo (FC) como límites inferior y superior, y los umbrales para el estrés hídrico en relación a su efecto sobre la expansión foliar (línea verde), el índice de cosecha (línea roja) y la senescencia anticipada (línea amarilla).



**Figura 2.11.** Ejemplo de salida de datos en forma gráfica para la solapa *climate-crop-soil*.

En la pestaña *Rain*, pueden observarse los eventos de precipitaciones, que guardan estrecha relación con el balance de agua en el suelo, la evapotranspiración y el rendimiento del cultivo (Figura 2.12).



**Figura 2.12.** Ejemplo de la salida de datos para la solapa *rain*. En el eje vertical se observan los mm/día de cada evento de precipitación y en el eje horizontal los días de desarrollo de cultivo.

De la misma forma, existen solapas que detallan la distribución de agua en el perfil, la salinidad en el perfil, la producción de biomasa y el balance hídrico. Pero no lo hacen de forma gráfica para el ciclo completo, sino que muestran la salida a tiempo fijo para el día seleccionado, como se observa en la figura 2.13 para la pestaña de *Producción*.

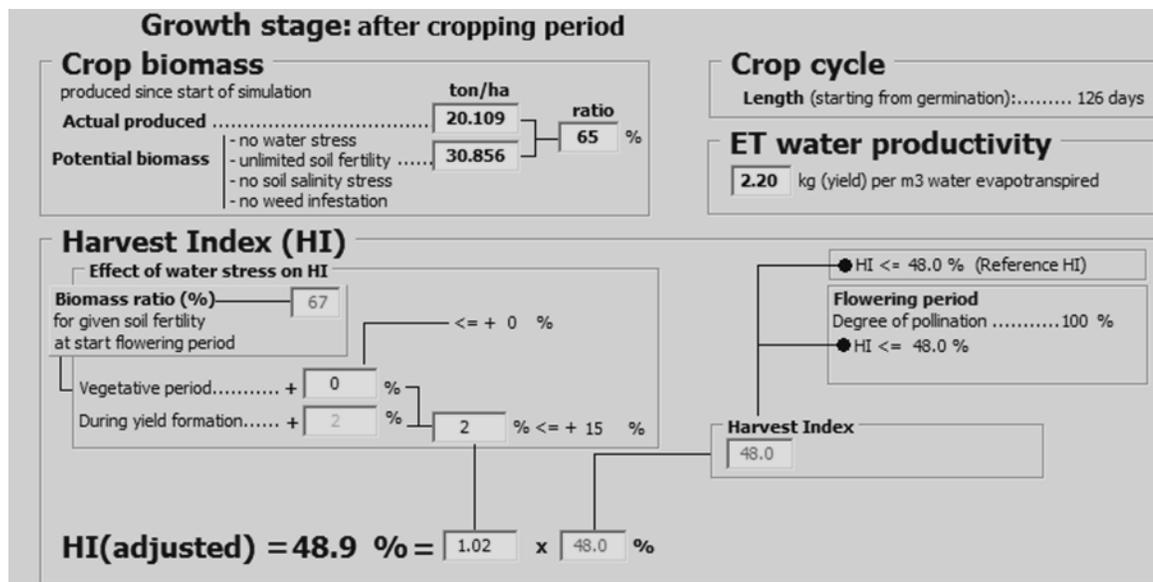


Figura 2.13. Ejemplo de salida de datos para la solapa *Production*.

La salida de datos de la simulación no debe observarse como un resultado estático, sino que también tiene importantes funcionalidades en la planificación, como puede ser elaborar un calendario de riego con déficits planificados en función de optimizar la eficiencia del uso del agua (Raes *et al.*, 2009).

Los resultados no solo son presentados en forma gráfica, también se pueden guardar en forma de tablas, que el programa genera automáticamente utilizando la extensión .OUT como se detalla en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Denominación y contenido de los archivos con datos de salida de la simulación realizada con AquaCrop.

Nombre del archivo	Descripción de los datos de salida del archivo
ProjectCrop.OUT	Procesos de cultivo, producción y datos relacionados.
ProjectWabal.OUT	Balance del agua del suelo y datos relacionados.
ProjectProf.OUT	Contenido de agua en el perfil de la zona de raíces.
ProjectSalt.OUT	Salinidad del suelo en el perfil de la zona de raíces.
ProjectCompWC.OUT	Contenido de humedad del suelo de los horizontes del modelo.
ProjectCompEC.OUT	Salinidad del suelo de los horizontes del modelo.
ProjectInet.OUT	Requerimientos de riego (en caso de ser simulados).

## **2.8. Consideraciones finales sobre AquaCrop**

Los avances en el conocimiento de distintas áreas, como la hidrología y la interpretación de la dinámica del agua en el suelo y en la atmósfera; la fisiología vegetal y la interpretación de los procesos de crecimiento y desarrollo y su relación con los factores ambientales; permiten modelar la dinámica de un cultivo a partir de la parametrización del entorno en el que se desarrolla y ganar racionalidad en la gestión del recurso hídrico para riego.

Aquacrop es un desarrollo de la FAO que intenta acercar la tecnología del modelado matemático del desarrollo del cultivo, tradicionalmente restringida a ámbitos académicos y científicos, para usos técnicos y productivos. Si bien es un modelo que presenta una interfaz amigable y explicaciones claras para su uso; es necesario desarrollar un marco teórico, que permita comprender profundamente la mecánica de cada uno de sus componentes para hacer un uso correcto del mismo.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS



### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Experimento a campo

##### 3.1.1. Características del lote

El lote donde se llevó adelante el ensayo, es parte de las instalaciones de la Estación Experimental J. Hirschhörn (EEJH), ubicada en la localidad de Los Hornos, Partido de La Plata y perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAYF) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina. La EEJH se ubica en la intersección de las calles 66 y 167. La ubicación cuenta con una precipitación anual promedio de alrededor de 950 mm, siendo el mes menos lluvioso agosto, con un promedio de 52 mm y el más lluvioso marzo, con valores de 111 mm. La temperatura promedio ronda los 16 °C, siendo el mes más cálido enero, con temperaturas promedio de 23,1 °C y el mes más frío agosto, con temperaturas promedio de 10,2 °C.



**Figura 3.1.** Imagen satelital de la EEJH con detalle de la ubicación del lote donde se desarrolló el experimento de cultivo y la ubicación de la estación meteorológica.

El lote, cuyas coordenadas son -34.984071, -57.997626 (Figura 3.1); abarca una superficie de 2.000 m<sup>2</sup> y cuenta con un sistema de riego por goteo subterráneo, que permite desarrollar ensayos con ofertas hídricas diferenciales para el cultivo. La instalación del sistema de riego fue llevada a cabo por el equipo docente de la Cátedra de Riego y Drenaje de la FCAYF, quienes dispusieron tuberías de goteo para riego subterráneo, con un distanciamiento entre ellas de 1 m y una profundidad de 0,3 m. Previo al inicio del experimento, se llevó adelante una jornada de mantenimiento del sistema de riego (Figura 3.2), reparando filtraciones y obstrucciones y verificando su correcto funcionamiento.



**Figura 3.2.** Jornada de reparación y puesta a punto del sistema de riego, previo a la implantación del cultivo.

El sistema es alimentado por una bomba sumergible Rotorpump de 7,5 Hp de potencia, situada en una perforación adyacente al lote que toma agua del Acuífero Puelches. El cabezal de riego cuenta con dos filtros de anillas, un caudalímetro totalizador, y un manómetro (Figura 3.3).



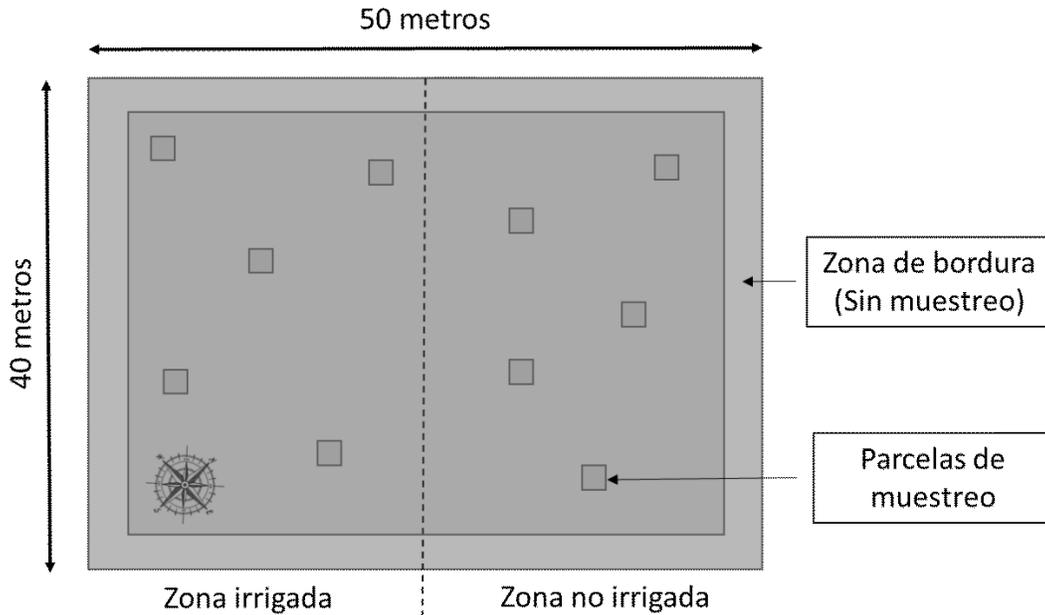
**Figura 3.3.** Momento de armado del cabezal, colocando uno de los dos filtros de anillas.

### **3.1.2. Diseño experimental**

En el lote donde se desarrolló el experimento, se generaron dos parcelas de 1.000 m<sup>2</sup> cada una, una irrigada y otra sin irrigar (Figura 3.4). Como la totalidad del lote se encuentra equipada con el sistema de riego por goteo, se anuló el sistema de riego en la mitad de la superficie, donde se realizó el tratamiento de secano.

A partir de estas dos grandes parcelas, el diseño consistió en la elección de

bloques al azar: dentro del área asignada para riego y para secano, se delimitaron 5 parcelas de 4 m<sup>2</sup> cada una, distribuidas aleatoriamente pero considerando siempre, que las mismas no estuvieran a menos de 5 m del borde del cultivo para evitar el denominado “efecto bordura”. En cada una de ellas, se realizaron las determinaciones y toma de datos iniciales y durante los muestreos.



**Figura 3.4.** Croquis de la parcela, con la distribución de las zonas de muestreo, la delimitación de la zona de bordura donde no se realizó muestreo y las dimensiones del lote.

### 3.1.3. Datos climáticos y meteorológicos

Los datos de precipitaciones, temperatura y radiación fueron obtenidos a partir de la estación meteorológica Davis Perception II, perteneciente a la Facultad de Cs. Agrícolas y Forestales de la UNLP, cuya ubicación es Latitud 34 59 S - Longitud 57 59 W de G. La altura sobre el nivel del mar es de 45 MSNM, y se encuentra a escasos metros del lote donde se desarrolló el ensayo, tal cual puede observarse en la Figura 3.1.

Las mediciones de precipitaciones, se llevan adelante mediante un pluviómetro digital automático de cangilones, la temperatura se registró mediante un termómetro digital, la velocidad de viento mediante un anemómetro, los datos fueron recopilados en el datalogger de la estación meteorológica, y el acceso a los mismos fue gentilmente facilitado por el Ing. Agr. Pablo Etchevers, responsable técnico de la estación experimental.

A su vez, el personal de la estación meteorológica facilitó los datos del balance hídrico del suelo, que en conjunto con la determinación del contenido de humedad por gravimetría, permitió caracterizar el estado hídrico del suelo al inicio del experimento, necesario para poder correr el modelo AquaCrop. Estos datos fueron utilizados para calibrar el programa.

### 3.1.4. Suelo

#### a) Conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica ( $CE_s$ ) del suelo fue medida con un conductímetro manual, marca Hanna, modelo HI 98331 de penetración directa que arroja el valor de la CE del suelo, de forma instantánea en mS/cm. Se llevaron adelante mediciones periódicas en cada una de las 5 ubicaciones definidas dentro de cada tratamiento. La  $CE_s$  es un dato utilizado por el modelo para definir el impacto del estrés por salinidad en la fisiología del cultivo.

#### b) Humedad del suelo

A lo largo del experimento se midió periódicamente el contenido de humedad del suelo mediante un sensor de humedad marca ProChem colocado a 25 cm de profundidad (Figura 3.5.) en cada uno de los lotes.

El seguimiento de la humedad del suelo se llevó adelante para contrastar con los datos de humedad del suelo simulada por el programa y evidenciar posibles faltas de ajuste en la calibración del mismo. Las mediciones con estos sensores electrónicos fueron realizadas en el punto central de ambos lotes, con y sin irrigación. Se colocó un solo sensor por lote porque solo se pudo tener acceso a dos sensores para la realización del experimento.



**Figura 3.5.** Detalle de la colocación del sensor de humedad en el suelo.

Simultáneamente, y de manera periódica, se extrajeron muestras de suelo con barreno (Figura 3.6 a), a diferentes profundidades, que se utilizaron para determinar el contenido de humedad mediante el método gravimétrico. Las muestras fueron pesadas en el momento de la recolección, para obtener el valor de peso húmedo, y una vez secadas en estufa a 105 °C hasta peso constante, se obtuvo el valor del peso seco (Figura 3.6. b).

La humedad se expresó en % P/P, utilizando la misma ecuación que la usada para determinar % MS en biomasa (Ecuación 3.3).



**Figura 3.6.** Extracción de muestras de suelo a campo con el barreno durante el experimento (a: izquierda) y pesaje de muestras previamente secadas (b: derecha).

### 3.1.5. Material vegetal y cultivo

#### a) Características del híbrido KM 3800

Como semilla se utilizó el híbrido KM 3800 del semillero KWS. Es un híbrido de cruzamiento simple, su ciclo es intermedio, alcanzando la madurez relativa a los 118 días, presenta un intervalo de siembra/floración de entre 67 y 82 días, equivalente a 882 Grados día con base 8°C (GDU), y un intervalo siembra/picado de aproximadamente 125 días o 1.485 GDU.

Presenta tolerancia a herbicidas como el glifosato y el glufosinato de amonio y resistencia a lepidópteros, tolerancia media a la roya común (*Puccinia maydis*) y media alta al tizón (*Exserohilum turcicum*), y buena tolerancia al vuelco y al quebrado de plantas.

Morfológicamente su altura promedio es de 310 cm y llega al momento del picado con 14 hojas. Presenta buenas características *Stay Green* o de senescencia retardada y una buena composición del picado de silaje con 58% de espiga, 20% de tallo, 17% de hoja y 5% de chala.

Por tratarse de un híbrido bien caracterizado, la duración de las distintas etapas de la fenología del cultivo, son conocidas y resultan de mucha ayuda para la operación del modelo AquaCrop.

#### b) Siembra

Previo a la siembra se realizaron las siguientes tareas:

- Septiembre 2016: reparación de pinchaduras y obstrucciones en el sistema de riego. Para ello se puso en marcha el sistema de riego y se inspeccionó la presencia de zonas encharcadas y zonas secas, que indicaban roturas u obstrucciones. Posteriormente se procedió a reparar las mismas.

- 1 de noviembre 2016: barbecho químico con aplicación de 2,5 l/ha de glifosato, y 1,2 l/ha de 2-4D (Figura 3.7).
- 8 de noviembre 2016: se pasaron dos rastras de disco para ayudar al control de malezas y preparar el lote para el trabajo de la sembradora, ya que no se contaba con equipo de siembra directa.
- 21 de noviembre 2016: se pasó una rastra de dientes para mejorar las condiciones de la cama de siembra. La siembra se llevó a cabo con una sembradora para granos gruesos, con dosificador a chorrillo, y una densidad de plantas calculada en 80.000 plantas ha<sup>-1</sup> en la superficie de 2.000 m<sup>2</sup>.



**Figura 3.7.** Vista del lote a sembrar con el cabezal de riego de fondo.

### **c) Toma de imágenes para determinar cobertura de canopy**

Para registrar el desarrollo del canopy y poder llevar adelante ajustes en la dinámica de crecimiento del mismo, se tomaron periódicamente imágenes fotográficas de cada una de las sub parcelas dentro de las zonas de secano e irrigada. Para hacerlo, se utilizó un extensor de 5 m de longitud, que permitió obtener imágenes de vista en planta del cultivo.

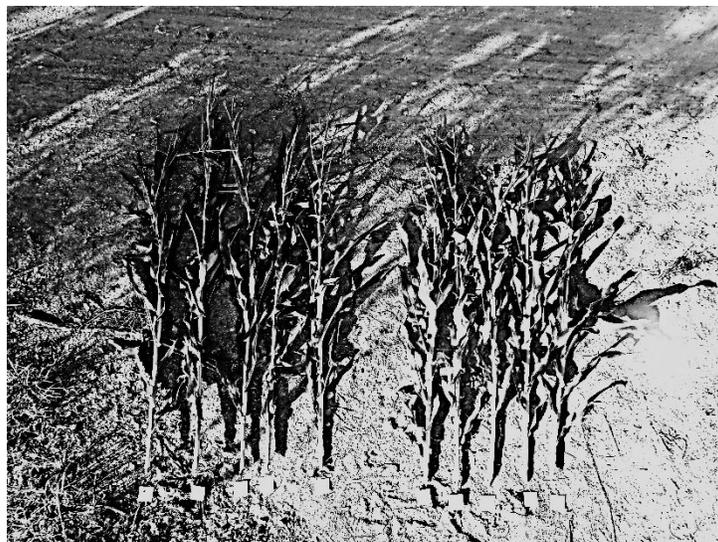
### **d) Determinación de producción de biomasa y materia seca**

Se definieron 5 parcelas para llevar adelante una extracción de 5 plantas completas (Figura 3.8) de cada una a los 114 días desde la siembra, el día 15 de marzo, indicado como el momento óptimo para la cosecha para silaje.

Las plantas fueron pesadas inmediatamente luego de cosechadas, para obtener el peso fresco y posteriormente secadas en una estufa facilitada por el Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE, CONICET-UNLP) a 60 °C hasta peso constante, obteniendo así el peso seco. Una vez alcanzado el peso seco, se volvió a pesar el material para obtener el peso seco de biomasa y el contenido de humedad del material usando la ecuación 3.1.

$$\text{Materia Seca (MS)}[\%] = \frac{\text{Peso seco} \cdot 100}{\text{Peso fresco}}$$

(Ecuación 3.1)



**Figura 3.8.** Plantas de maíz cosechadas enteras para ser secadas y pesadas, a fin de registrar la biomasa generada en el lote.

#### **e) Determinación de rendimiento de grano**

Una vez cosechadas las muestras para biomasa el día 15 de marzo, se dejó continuar el cultivo, hasta que el grano alcanzó su madurez comercial y un 14% de humedad. En ese momento, se cosecharon las espigas de 5 plantas al azar dentro de cada una de las 5 parcelas previamente definidas en cada tratamiento. Se separaron los granos y se pesaron. Posteriormente, se llevaron a estufa a 60 °C hasta peso constante y se volvió a pesar para obtener el valor de materia seca. Si bien la cosecha y modelado de rendimientos utilizada para el análisis económico se realizó con datos de biomasa total al día 15 de marzo, la continuidad del experimento permitió contar con el dato a campo de rendimiento del grano, para contrastarlo con el rendimiento de granos generado mediante simulación y verificar el ajuste del modelo.

#### **3.1.6. Fertilización**

La fertilización se llevó adelante en el momento de la siembra, a partir del estudio de la fertilidad química del suelo en una muestra compuesta de la capa de 0-20 cm de suelo que se remitió al Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP. Por tratarse de un lote utilizado con fines experimentales, la fertilización llevada adelante en campañas previas siempre fue óptima. Los valores arrojados por los análisis

de suelo realizados según los métodos de Bray y Kurtz (1945) para determinar P disponible y de Kjeldhal (1883) para determinar N total, indicaron disponibilidad óptima de estos nutrientes, considerando la máxima potencialidad de rendimiento con P y N como elementos limitantes. Por este motivo, para calcular la fertilización se utilizó el criterio de reposición de nutrientes. Se incorporaron 110 kg de N elemental y 60 kg de P elemental. Para conseguir esas dosis de N y P se utilizaron urea (37,62 kg en 0,2 ha) y fosfato diamónico (DAP; 26,09 kg en 0,2 ha), respectivamente.

**Tabla 3.1.** Cálculo de la fertilización realizada.

Nutriente	Riqueza en % de los fertilizantes		Demanda nutrientes para un maíz que produce 30.000 Kg de biomasa /ha		kg de nutriente aportado en 0,2 ha		kg de fertilizante aplicado en 0,2 ha	
	DAP	urea	kg nutriente/ha	kg para 0,2 ha	DAP	Urea	DAP	Urea
N	18	46	110	22	4,70	17,30	26,09	37,62
P	46		60	12	12,00			

### 3.2. Calibración, validación y simulación del modelo

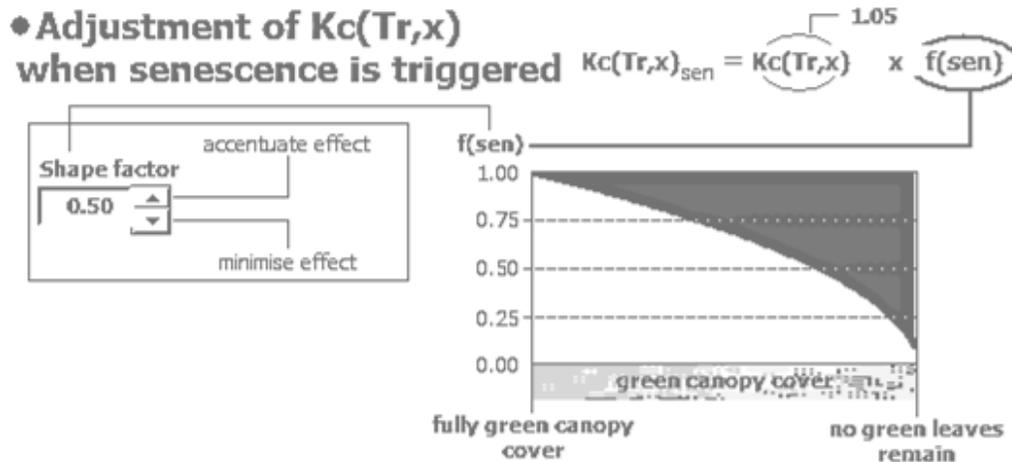
Los datos generados a partir del modelo para ser utilizados en esta tesis, se construyeron corriendo el modelo en la modalidad “días calendario”, en base a la información sobre AquaCrop referida previamente en el capítulo 2. La opción de simular en función de “grados día”, también es brindada por el modelo, fue utilizada en forma alternativa para corroborar el ajuste apropiado entre la simulación de la duración de los periodos siembra-floración y floración-picado y los datos brindados por el semillero KWS. La información del híbrido KM 3800 es brindada en grados día, con temperatura base 8°C. La validación del modelo calibrado pudo realizarse mediante la observación de la correlación entre los valores simulados y observados de cobertura de canopeo para todo el ciclo del modelo.

#### 3.2.1. Parámetros conservativos

Para simular el rendimiento, el modelo AquaCrop requiere que se carguen un set de parámetros conservativos. En el caso del maíz (*Zea mays* L.), estos parámetros vienen siendo validados y calibrados en trabajos anteriores (Hsiao *et al.*, 2009), y se considera que debido a su carácter conservativo resultan aplicables a un amplio rango de condiciones ambientales, no siendo específicos para una variedad o híbrido en particular. Tal es el caso de la *dinámica de profundización de raíces* y *profundidad efectiva alcanzada por el 70%* las mismas, que para el caso del maíz en este tipo de suelos, es de 1 metro. La FAO ofrece una calibración validada para estos parámetros en el cultivo de maíz que fueron utilizados y corroborados en esta tesis, llevando adelante algunas modificaciones que permitieron mejorar el ajuste, como por ejemplo, la modificación de la cinética de senescencia del cultivo.

Las simulaciones realizadas, utilizando la calibración de los parámetros conservativos proporcionados por la FAO, se contrastaron con las mediciones de algunos parámetros clave. Por ejemplo, en el caso de la cobertura de canopeo, se observó una falta de ajuste del modelo sobre el final del ciclo del cultivo. Así, utilizando los datos obtenidos en campo, y utilizando la opción *field data* para compararlos con los datos simulados, se

observó una falta de ajuste en la simulación de la cobertura de canopeo y se modificó el coeficiente de forma de la curva (*shape factor*), característica de la dinámica de senescencia para obtener un mejor ajuste (Figura 3.9).



**Figura 3.9.** Panel de ajuste del modelo Aquacrop para la simulación de la cinética de la senescencia.

### 3.2.2. Parámetros no conservativos

Los parámetros no conservativos, son los propios de las condiciones de cultivo. Algunos se tomaron directamente a campo (detallados previamente) y otros debieron calcularse o pautarse antes de la simulación y se comentan a continuación.

#### a) Variables de Clima:

Se incluyen aquí los datos climáticos: *lluvias*, *temperaturas máximas* y *mínimas* tomadas a campo pero también la *evapotranspiración de referencia*, y la *concentración de CO<sub>2</sub>* que deben ser calculadas o son provistas por el programa, respectivamente. La simulación se llevó adelante con datos relevados con frecuencia diaria.

La serie de datos de precipitaciones 2006-2015 que permitió simular 10 años de rendimiento de cultivos a fin de realizar un análisis económico estimativo de la implementación de la tecnología de riego propuesta para la producción de silaje, fueron provistos por el Profesor Ing. Enrique Angheben (Facultad de Ingeniería, UNLP), y provienen de la estación meteorológica del Aeródromo de La Plata.

Para la simulación mediante AquaCrop, del rendimiento del maíz para silaje en la serie de años 2006-2015 se utilizaron, a su vez, los datos meteorológicos provistos por la FAO mediante su base de datos ClimWat 2.0 (Griesen, 2006), para la estación meteorológica del Aeródromo de La Plata. Estos datos fueron procesados utilizando el programa CropWat 8.0 (Swennenhuis, 2009) (Figura 3.10), a fin de calcular la evapotranspiración de referencia según el método de Penmann-Montheit modificado por la FAO (Allen *et al.*, 1998), requerida para la realización de los cálculos (Ecuación 3.2).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)}$$

Donde:

- $ET_0$  es la Evapotranspiración de referencia [mm/día]
- $R_n$  es la radiación neta en la superficie del canopeo [ $MJ/m^2 \cdot día$ ]
- $G$  es la densidad del flujo de calor en el suelo [ $MJ/m^2 \cdot día$ ]
- $T$  es la temperatura media diaria a 2 metros del suelo [ $^{\circ}C$ ]
- $U_2$  es la velocidad del viento a 2 metros del suelo [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
- $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor [ $KPa \cdot ^{\circ}C$ ]
- $\gamma$  es una constante psicrométrica [ $KPa \cdot ^{\circ}C$ ].

Country	Location 53		Station	LA-PLATA-AERO				
Altitude	19	m.	Latitude	34.96	'S	Longitude	57.90	'W
Month	Min Temp	Max Temp	Humidity	Wind	Sun	Rad	ETo	
	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	%	km/day	hours	$MJ/m^2/day$	mm/day	
January	17.2	28.8	72	432	8.1	23.2	5.61	
February	16.6	27.8	75	415	8.2	21.8	4.96	
March	14.7	25.4	79	372	6.8	17.1	3.69	
April	11.1	21.9	83	328	6.2	13.1	2.48	
May	8.1	18.1	85	337	5.0	9.2	1.63	
June	5.6	14.7	86	354	4.0	7.2	1.21	
July	5.5	14.3	89	372	4.1	7.8	1.11	
August	5.9	15.8	83	406	5.2	10.9	1.73	
September	7.5	17.8	80	467	5.7	14.4	2.49	
October	10.3	20.7	81	458	6.7	18.7	3.23	
November	12.8	23.7	75	458	7.5	21.8	4.36	
December	15.5	27.1	71	449	7.7	23.0	5.38	
Average	10.9	21.3	80	404	6.3	15.7	3.16	

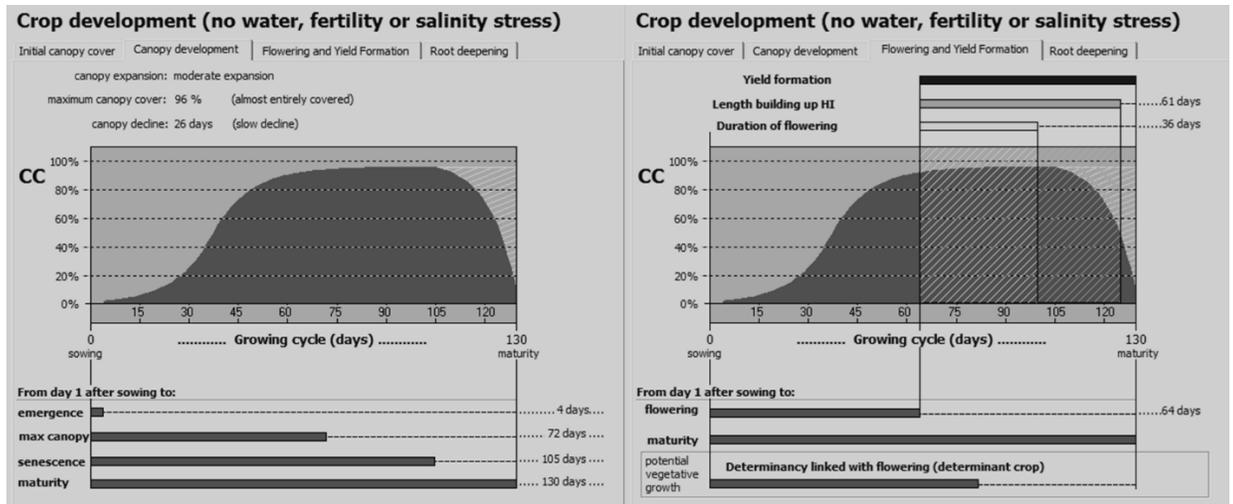
**Figura 3.10.** Evapotranspiración de referencia (ETo) media mensual del periodo 2006-2015 calculada a partir de la base de datos de Climwat para la estación meteorológica Aeródromo de La Plata.

#### b) Variables de Cultivo:

- **Etapas fenológicas**

Por tratarse de un experimento para determinar la producción de biomasa para picado y ensilaje, se llevó adelante la simulación hasta el punto óptimo de madurez para el picado. El mismo, fue determinado simulando bajo la modalidad grados día hasta los 1.485 GD, valor establecido por el semillero KWS como momento óptimo de picado, ubicado el día 15 de marzo.

Para llevar adelante la simulación se definió la duración y características de cada una de las etapas fenológicas del cultivo, como puede observarse en la figura 3.11.



**Figura 3.11.** Detalle de la interfaz del programa AquaCrop donde se observa el detalle de los periodos que caracterizan el desarrollo del canopeo (Izquierda), y el desarrollo reproductivo y del rendimiento del cultivo (Derecha).

- **Análisis de imágenes para determinar cobertura de canopeo**

Las imágenes fueron analizadas utilizando el programa Image-J 1-x (Rasband, 1997), delimitando manualmente, para cada foto, el área ocupada por el canopeo, ya que los ajustes automáticos probados no eran capaces de diferenciar con suficiente claridad el maíz y las malezas presentes en las fotos, dando lugar a posibles errores. Una vez analizadas las imágenes, se calculó el porcentaje del área total de la misma ocupada por hojas de maíz, y se expresó en porcentaje de cobertura de canopeo (%CC).

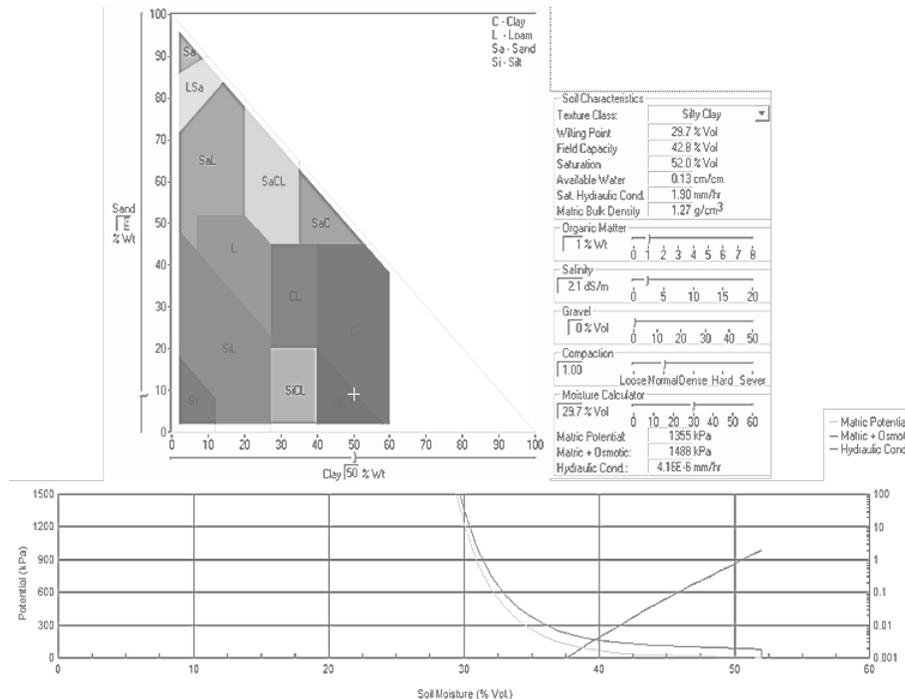
### c) Variables del Suelo

- **Propiedades hidrológicas del suelo**

Para llevar adelante el cálculo de las propiedades hidrológicas del suelo, se utilizó el módulo Soil Water Characteristics incluido en el software SPAW 6.02.75 (Saxton y DBSE, 2009) disponible en la página del Agricultural Research Service del USDA de Estados Unidos (Figura 3.12.).

Este programa permite estimar la tensión de agua, la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo a partir de su composición textural, el contenido de materia orgánica, la salinidad, la compactación y otros parámetros como la presencia de grava, que son cargados como datos.

Los resultados de esta estimación fueron contrastados con datos preexistentes de los contenidos hídricos de referencia del perfil obtenidos en el Laboratorio de Edafología de la FCAyF, observando una estrecha correlación entre las estimaciones y estos valores.



**Figura 3.12.** Interfaz del programa Soil Water Characteristics. Se observa a la izquierda la tabla que permite definir la clase de suelo en base a su composición textural, a la derecha se observan los datos cargados por el usuario y la salida con la información de las propiedades hidrológicas del suelo, también graficadas en la parte inferior.

- **Lámina de agua almacenada**

Para calcular la lámina de agua almacenada en el suelo a partir de los contenidos hídricos de referencia, se utilizó el método edafológico, en base a la ecuación 3.3 (Génova *et al.*, 2015).

$$I_n = (W_c - W_m) \cdot \delta_{ap} \cdot U_r \cdot D \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Donde

$I_n$  = lámina neta [mm]

$W_c$  = contenido hídrico a capacidad de campo [% gravimétrico]

$W_m$  = contenido hídrico de marchitez permanente [% gravimétrico]

$U_r$  = umbral de riego [fracción decimal 0-1]

$\delta_{ap}$  = densidad relativa

$D$  = profundidad del estrato de suelo ocupado con el 70% de raíces activas, [dm]

Es importante considerar que el umbral de riego, no es necesario incluirlo para el cálculo cuando el mismo se realiza para conocer el agua útil total abarcada entre los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente. Por otro lado, si en vez de expresar los contenidos hídricos referenciales en % gravimétrico, se expresan en % volumétrico, no debe incluirse el término densidad aparente en la ecuación.

#### **d) Variables de Manejo**

- **Riego**

El ensayo estuvo constituido por 2 bloques, con los tratamientos: con y sin riego suplementario (o control). Una parte del lote se regó semanalmente, calculándose la lámina en base a la estimación de la evapotranspiración según el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y la medición de las precipitaciones, obtenidas a partir de las lecturas de la estación meteorológica cercana.

El agua de riego utilizada fue de origen subterránea del acuífero Puelches, y se alumbró desde una perforación de 80 metros de profundidad, utilizando una electrobomba sumergible. Presentando un pH de 7,4; una CE de 0,794 ds/m y un RAS de 12,38.

El sistema de riego está constituido por tuberías de goteo marca Drip S.A. con goteros espaciados cada 40 cm, enterradas a 30 cm y distanciadas 1 m. Cada gotero eroga individualmente un caudal de 2 litros por hora, trabajando a una presión de 1 bar. Las cintas de riego se encuentran unidas entre sí por un ramal principal en la cabecera del lote por donde ingresa el agua y un ramal principal de similares características en el pie del lote para favorecer la compensación de presiones. El lote cuenta en su cabecera con un cabezal de riego equipado con dos filtros de anillas, una válvula de aire, un manómetro y un caudalímetro totalizador que permite regular el sistema y conocer la lámina aplicada. Durante el transcurso del ensayo se aplicaron 378 mm de lámina de riego.

#### **3.2.3. Análisis estadístico**

Los datos de los experimentos fueron analizados mediante un análisis ANOVA de una vía, o test t de Student, según corresponda al diseño del experimento. Los valores fueron testeados previamente para cumplir los requisitos de normalidad y homogeneidad de varianzas para poder utilizar estos test paramétricos. Todos los análisis se llevaron adelante utilizando el programa STATISTICA (StatSoft) de uso libre en internet.

### **3.3. Análisis de la factibilidad económico y ambiental de la implementación del riego en la situación estudiada.**

#### **3.3.1. Precio del silaje de maíz**

Para desarrollar los cálculos económicos, fue necesario establecer el precio del kg de silaje. Para hacerlo se utilizó la relación entre kg de silaje y producción de grasa butirosa (GB), un parámetro universal para la caracterización de la producción lechera. El silaje de maíz presenta un contenido calórico de 2,66 Mcal de energía metabolizable (EM) por kg de materia seca (Mcal/kgMS). La conversión de energía metabolizable para una vaca de 500 kg de peso vivo produciendo 18 litros de leche/día en promedio es de 66,56 Mcal EM por kg de GB (INTA PROPEFO, 2016). Conociendo el factor de conversión de silaje en GB y el precio de la GB, se estimó el precio del silaje a ser utilizado a fin de desarrollar el análisis económico.

### 3.3.2. Análisis de los Costos

#### a) Costo del riego

A fin de incluir el riego en la estructura de costos, se decidió implementar la metodología del precio del riego expresado en dólares estadounidenses U\$/mm.ha. Para llegar al costo, se partió de la suma entre los costos operativos, las amortizaciones y los intereses según la metodología planteada por Marengo *et al.* (2018).

*Costos operativos:* incluyen el costo de la mano de obra, el costo de la energía y un porcentaje estipulado para reparaciones.

El precio de la mano de obra, en \$/mes, se tomó de la escala salarial para trabajadores rurales, categoría peones generales, según la Resolución de la Comisión Nacional de Trabajo Agrario (CNTA) 188/2019 del Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social, considerando un 10% de un salario como equivalente para operatoria del riego.

El costo de la energía se calculó mediante la ecuación 3.4, en la cual P es la potencia de la bomba eléctrica; 0,746 un coeficiente dado que permite transformar las unidades de potencia expresada en CV en kW; y Q el caudal de la bomba expresado en [m<sup>3</sup>/h]. En relación al precio de la energía eléctrica, se consideró la tarifa rural para usuarios finales a aplicar por EDELAP desde el 1 de noviembre de 2019, para suministros con consumos iguales o mayores a 2.000 kWh por mes, para la totalidad del consumo, y se realizó la conversión de pesos a dólares con el valor del dólar de referencia del Banco de la Nación Argentina para la fecha correspondiente.

$$\text{Consumo energético} \left[ \frac{\text{Kw}}{\text{mm.h}} \right] = \left( \frac{P \cdot 0,746}{Q} \right) \cdot 10$$

(Ecuación 3.4)

*Amortizaciones:* se calcularon con el método de depreciación constante o lineal, según la ecuación 3.5. Los criterios de valor residual y los años de vida útil de cada componente de los equipos fueron tomados de la publicación Márgenes Agropecuarios (Miles E., 2016).

$$\text{Amortización} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] = \frac{\left( \frac{\text{Valor nuevo}}{\text{valor residual}} \right)}{\text{Vida útil}}$$

(Ecuación 3.5)

*Intereses:* el costo asociado al pago de intereses, se calculó en base a una tasa de 2,5% anual en dólares.

Esta metodología facilita la incorporación del costo del riego según la ecuación 3.6 en el análisis del margen bruto de una producción cuya demanda de agua varía anualmente en el periodo de estudio desarrollado, y el costo operativo del riego debe contemplar esas variaciones para poder hacer los cálculos para cada campaña, incorporando en el costo los mm de lámina de riego correspondientes.

$$\text{Costo riego} \left[ \frac{\text{U\$D}}{\text{mm. ha. año}} \right] = \text{Amortización} + \text{Interes} + \text{Costos Operativos}$$

(Ecuación 3.6)

### **b) Costo de producción del silaje**

A la hora de evaluar el resultado económico de un silaje, es importante no trabajar con costos fijos expresados por hectárea, sino que se hace necesario expresar los valores por kg producido, considerando el rendimiento por hectárea del cultivo. A mayores rendimientos, se licúan los costos fijos, que para el cultivo del maíz son particularmente elevados, y se reduce el costo por kg de silaje obtenido, cambiando el resultado económico.

Se utilizaron los datos para el año 2019 de la Cámara Argentina de Contratistas Forrajeros (CACF, 2019), que reúne gran cantidad de datos provenientes de las empresas dedicadas a producir silaje. La CACF establece una escala de costo de confección en función del rendimiento por hectárea del silaje embolsado.

Los costos relevados por la CACF contemplan la sumatoria de los costos de cultivo, tierra y confección del silaje. En este caso, considerando que la mayoría de los establecimientos lecheros desarrollan sus actividades sobre tierras propias, al elaborar el margen bruto, se dedujo del costo el precio de la tierra, equivalente en los valores obtenidos de la CACF a 16 qq de soja por ha.

#### **3.3.3. Análisis de Margen Bruto**

El margen bruto MB es una medida de resultado económico que permite estimar el beneficio en el corto plazo de una actividad (Ghida Daza, 2009). Se calcula como la diferencia entre los ingresos, (obtenidos a partir del precio calculado para el silaje en función de su conversión en GB); y los costos directos obtenidos de la suma de los costos de producir el silaje, incluyendo también los costos del riego en el caso del tratamiento irrigado. El MB se expresa en U\$D/ha.

No fueron contemplados en el cálculo, los costos asociados a la producción lechera, ya que los mismos se consideran iguales para ambos sistemas de producción, y el objetivo de este análisis es únicamente comparativo entre dos tratamientos.

#### **3.3.4. Cálculo del rendimiento de indiferencia**

Para desarrollar el cálculo del rendimiento de indiferencia fue necesario determinar los costos de implantación y protección para aplicarlos a la ecuación 3.7. Para obtener el costo de implantación del cultivo, se cuantificó el costo total del silaje a partir de los datos publicados por la CACF 2019 y reelaborados en la figura 5.1., y se descontó al costo total de producción del silaje, obteniendo así el costo de implantación del cultivo, que incluye labranza, semillas, fertilización y agroquímicos.

El rendimiento de indiferencia, que permitió conocer el mínimo rinde que cubrió los costos de implantación, se calculó según el método utilizado por Ghida Daza (2009) como resultado de la ecuación 3.7.

$$\text{Rendimiento de indiferencia (RI)} \left[ \frac{Tn}{ha} \right] = \frac{\text{Gastos de implantación y protección} \left[ \frac{USD}{ha} \right]}{\text{Precio producto en finca}}$$

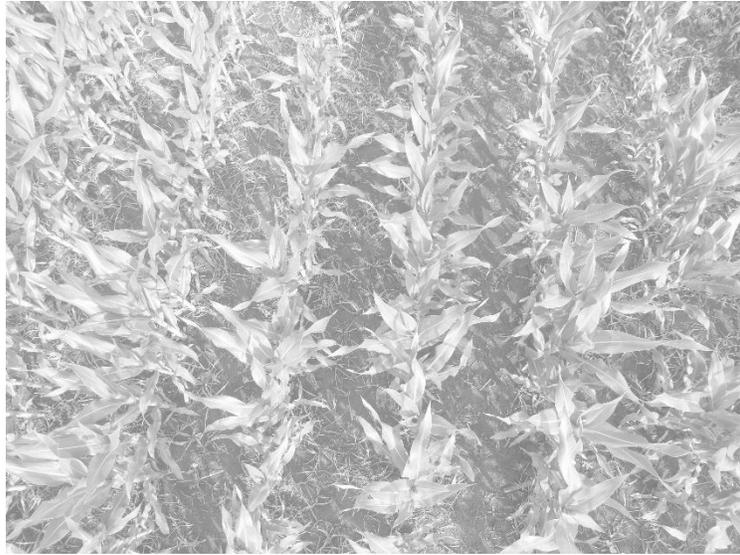
(Ecuación 3.7)

Los gastos de implantación son diferentes si la producción se logra en campo propio, en seco o bajo riego. En estos gastos se incluye el costo de la semilla, de la fertilización, de los agroquímicos y de la labranza; en el caso del tratamiento irrigado también se incluye el costo del riego. El precio en finca, hace referencia al precio de mercado para el producto, en este caso el precio del silaje calculado en función de su conversión en GB, descontados los gastos de cosecha y confección. Todos los datos de costos fueron obtenidos de la Cámara Argentina de Contratistas Forrajeros (CACF, 2019).

### 3.3.5. Evaluación FODA de aspectos ambientales

Se realizó un análisis en base a una matriz de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA), la misma sirve de apoyo para la formulación, implementación, seguimiento y ajuste de los planes de un proyecto. La matriz FODA, puede proveer buenas bases para la programación estratégica, si bien la matriz no cuenta con una metodología para establecer el peso relativo de cada factor, organiza los factores en internos (fortalezas y debilidades) y externos (oportunidades y amenazas) en relación a una decisión dada, facilitando la toma de decisiones (Mainali *et al.*, 2011).

La matriz fue completada en base a bibliografía referida al tema (Lamm, 2002)(Lamm, 2003) (Ajwa, *et al.*, 2002) (Camp, 1998) (O'Brien, *et al.*, 1998) (Grattan, *et al.*, 1988) (Jensen, *et al.*, 2007) y tomando en cuenta la información obtenida en el desarrollo del presente trabajo. El mismo tendrá como objetivo integrar el conocimiento preexistente en el área ambiental con la información surgida de la aplicación del modelo en el contexto estudiado, aportando información a la interpretación ambiental de la aplicación de la tecnología.



## **4. AJUSTE DEL MODELO AQUACROP APLICANDO CONDICIONES EXPERIMENTALES: RESULTADOS**



## 4. AJUSTE DEL MODELO AQUACROP APLICANDO CONDICIONES EXPERIMENTALES: RESULTADOS

### 4.1. Propiedades suelo

#### 4.1.1 Propiedades hidrológicas

Para poder llevar adelante la simulación de rendimientos con AquaCrop, fue necesario conocer ciertos parámetros que caracterizan el suelo desde un punto de vista hidrológico. El programa Soil Water Characteristics (SWC) fue utilizado para estimar los mismos.

En la tabla 4.1, se puede observar en las filas con fondo gris, los valores obtenidos mediante la aplicación de SWC para los datos de contenido hídrico al Punto de Marchitez Permanente (PMP), contenido hídrico a capacidad de campo (CC), contenido hídrico a saturación, conductividad hidráulica en condiciones de saturación y densidad aparente de cada uno de los horizontes del suelo. Los valores fueron generados a partir de los datos de la composición textural, contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica y principales características fisicoquímicas del suelo.

**Tabla 4.1.** Datos del perfil del suelo, incluyendo parámetros hidrológicos calculados mediante el software SWC.

Denominación del horizonte	A	AB	Btss	BC1
Tipo horizonte	Silty Loam	Silty Loam	Silty Clay	Silty Clay Loam
<b>Profundidad [cm]</b>	0-29	29-37	37-115	115-160
<b>Arcilla [%]</b>	23,7	23,8	50,3	36,2
<b>Limo [%]</b>	59,6	56,6	46,5	52,7
<b>Arena [%]</b>	16,3	19,5	9,3	11,1
<b>MO [%]</b>	5,83	4,12	0,98	0,11
<b>CE [ds/m]</b>	2,1	1,1	2,1	1,8
<b>PMP [%vol]</b>	17,8	16,8	29,7	22,1
<b>CC [%vol]</b>	36,9	34,7	42,8	37,9
<b>Saturación [%vol]</b>	58,6	53	52	48,1
<b>Cond. hidráulica saturada [mm/d]</b>	647,3	393,4	45,6	68,6
<b>Densidad [gr/cm<sup>3</sup>]</b>	1,1	1,25	1,27	1,38

A partir de estos datos, se calculó el agua útil, es decir el agua comprendida entre los contenidos hídricos a capacidad de campo y marchitez permanente. Este contenido

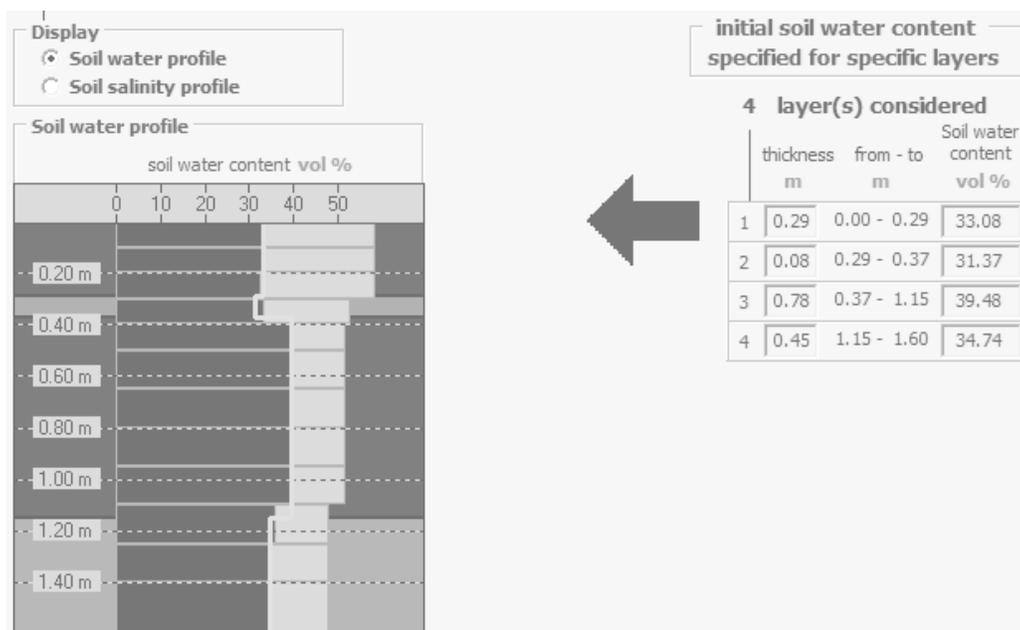
hídrico fue expresado en lámina [mm], utilizando el método edafológico (Ecuación 3.3). Para cada horizonte, y para la profundidad efectiva de raíces (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2.** Valores de agua útil expresados como lámina, para los diferentes horizontes y para la profundidad efectiva de raíces.

Horizonte	A	AB	Btss	BC1
Tipo horizonte	Silty Loam	Silty Loam	Silty Clay	Silty Clay Loam
Profundidad [dm]	2,9	0,8	7,8	4,5
PMP [%vol]	17,8	16,8	29,7	22,1
CC [%vol]	36,9	34,7	42,8	37,9
Lámina agua útil [mm]	55,4	14,3	99,6	71,1
<b>Lámina agua útil hasta 1 m de profundidad= 149,6 mm</b>				

#### 4.1.2. Condiciones iniciales de la humedad en el suelo

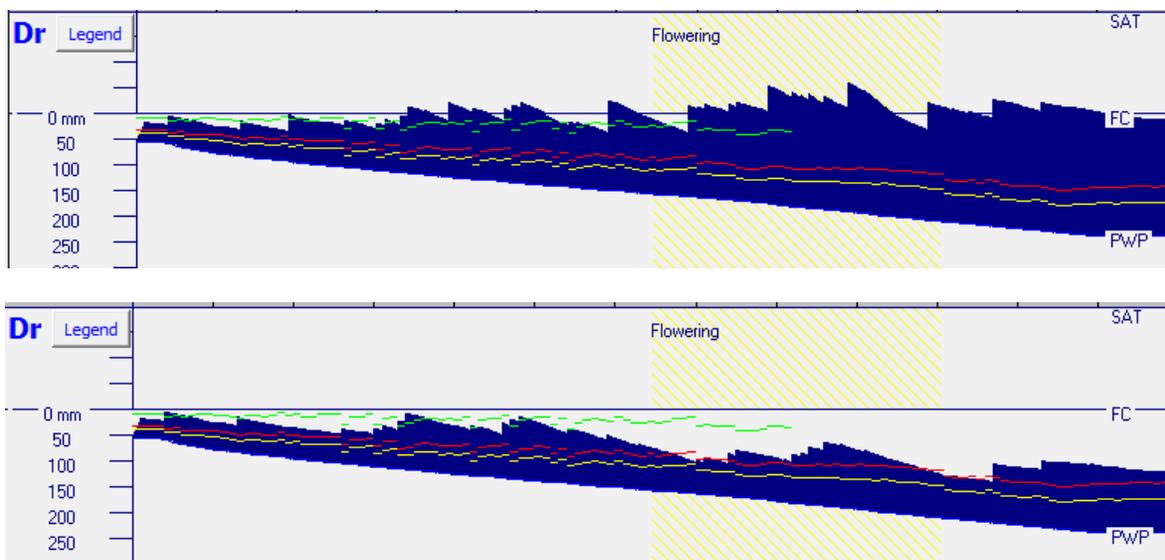
En el suelo se determinó el contenido de humedad por técnicas gravimétricas (Figura 3.6) previo a la siembra, a fin de conocer las condiciones de humedad de partida del ensayo para cada uno de sus horizontes. El modelo utiliza estos datos (Figura 4.1) como punto de partida de la simulación del balance hidrológico del suelo. Como puede observarse en la figura, todo el perfil del suelo se encontraba en condiciones muy cercanas a la capacidad de campo en el momento del inicio del ensayo experimental.



**Figura 4.1.** Interfaz del programa AquaCrop, indicando de forma gráfica (izquierda) y numérica (derecha), el contenido hídrico del suelo para cada uno de los horizontes en el momento del inicio del ensayo experimental.

### 4.1.3. Balance de agua en el suelo

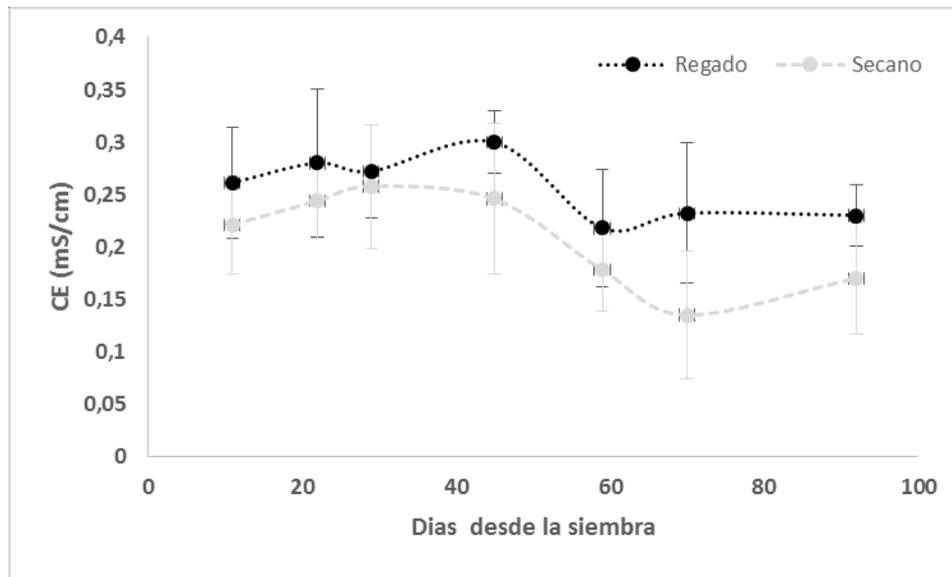
A lo largo del desarrollo del cultivo, la simulación de AquaCrop para el balance hídrico del suelo mostró que en el tratamiento irrigado, la humedad del suelo se mantuvo por sobre el umbral de estrés para la reducción de la tasa de crecimiento del canopeo ( $K_{se}$ ) (Figura 4.2). Este es, de los tres parámetros de respuesta al estrés hídrico ( $K_s$ ) utilizados por AquaCrop, el más sensible. En contraste, en el tratamiento de secano, durante gran parte del ciclo el estrés hídrico habría impactado en la tasa de crecimiento del canopeo ( $K_{s_{exp}}$ ), y por momentos el contenido hídrico del suelo cayó por debajo del umbral establecido por el modelo para la reducción de la conductancia estomática ( $K_{s_{sto}}$ ). Para ninguno de los dos tratamientos se observó en ningún momento una caída del contenido hídrico del suelo por debajo del umbral definido para la senescencia anticipada del canopeo ( $K_{s_{sen}}$ ).



**Figura 4.2.** Simulación del balance hídrico del suelo para el tratamiento irrigado (panel superior) y no irrigado (panel inferior). De las tres líneas oscilantes que atraviesan el gráfico, la línea verde superior indica el umbral de estrés a partir del cual se reduce la expansión del canopeo; la línea central roja indica el umbral de estrés a partir del cual se reduce la conductancia estomática, y la línea amarilla inferior indica el umbral de estrés a partir del cual se inicia la senescencia acelerada.

### 4.1.4. Conductividad eléctrica del suelo (CE)

Determinaciones de CE en el suelo fueron llevadas adelante periódicamente con el medidor portátil de conductividad Hanna. Se observa una tendencia a presentar valores más elevados de conductividad en el lote irrigado respecto al lote de secano (Figura 4.3). Los valores se encuentran en un rango normal para la región y la mencionada tendencia tiene sentido técnico, ya que un mayor contenido hídrico en el suelo se correlaciona positivamente con una mayor conductividad en el mismo (Brevik *et al.*, 2006). El análisis estadístico se llevó adelante comparando entre sí las mediciones de ambos tratamientos en cada uno de los momentos de muestreo mediante un test t-Student. Las diferencias entre las medias no fueron estadísticamente significativas ( $p=0,05$ ) en ninguno de los casos.



**Figura 4.3.** Evolución de los valores de la CE en los tratamientos irrigado y seco, expresados como el promedio de 5 mediciones dentro de cada tratamiento, las barras de error expresan el desvío estándar de las muestras.

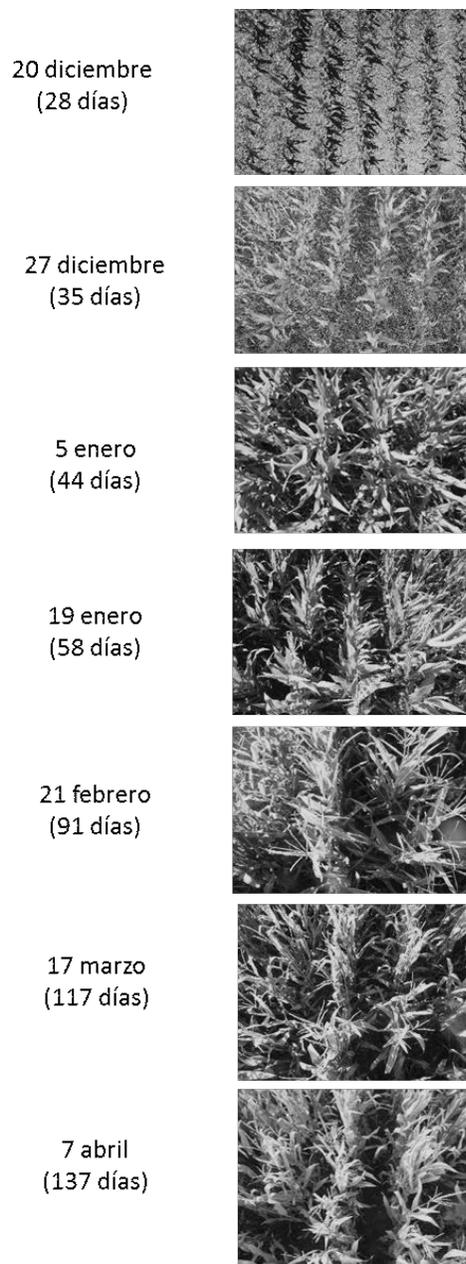
## 4.2. Parámetros del cultivo

### 4.2.1. Fenología

El desarrollo fenológico del cultivo fue similar para ambos tratamientos (secano e irrigado), no observándose desfasajes. La emergencia fue pareja, entre los 4 y 7 días. El tiempo a floración fue de 65 días, y la misma tuvo una duración aproximada de 35 días en ambos tratamientos. A los 105 días después de la siembra, se observó el inicio de la senescencia en ambos tratamientos.

### 4.2.2. Evaluación del desarrollo del canopeo

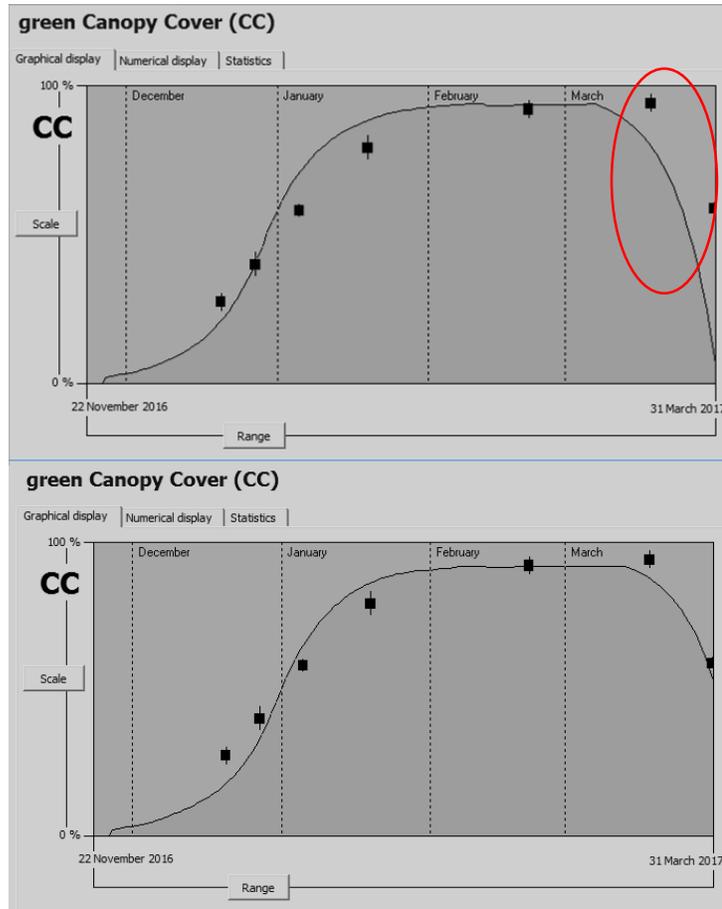
En la figura 4.4 se observa la vista aérea de las imágenes tomadas para llevar adelante la determinación de la cobertura de canopeo.



**Figura 4.4.** Fotos testigo de la evolución del canopeo en el ensayo experimental.

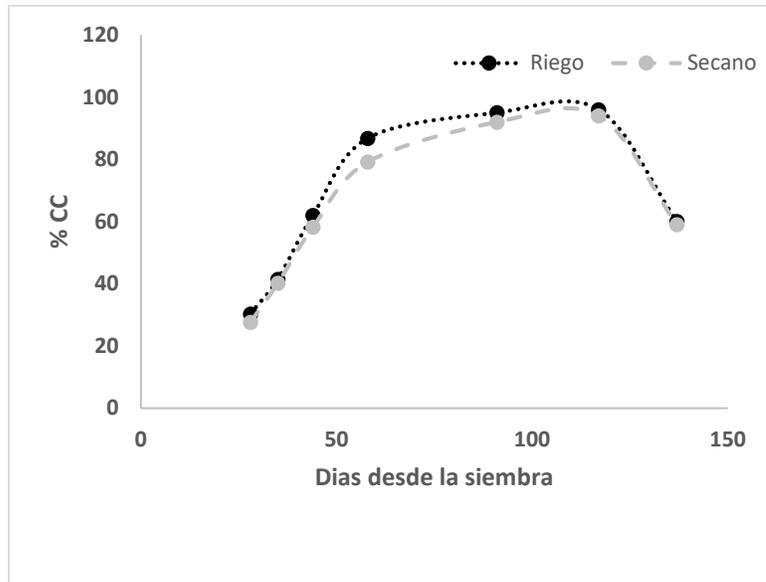
A partir de las imágenes aéreas (Figura 4.4), tomadas a distintos momentos, en cada uno de los tratamientos, se cuantificó el porcentaje de cobertura del canopeo utilizando el programa de análisis de imágenes ImageJ. Los datos obtenidos se utilizaron para compararlos con la simulación del desarrollo del canopeo del maíz, un parámetro considerado como conservativo. Utilizando la función *field data*, que permite comparar el desarrollo simulado en AquaCrop con el desarrollo real medido, en este caso mediante el análisis de la cobertura observada en las fotos, fue posible detectar una falta de ajuste en el desarrollo del canopeo sobre el final del ciclo del cultivo (Figura 4.5). En base a esta evidencia, se realizó un ajuste sobre los parámetros conservativos de la calibración para la CC que por defecto el modelo trae incorporados. Para lograr un mejor ajuste, se modificó, *shape factor*, que es el factor que define la cinética de la senescencia y tiene un valor por

defecto de 1 que se modificó a 0,5 que fue el valor que interpreté como punto de mejor ajuste. Tal como puede observarse en la imagen (Figura 4.5), se mejoró de esta manera el ajuste del modelo en relación a la acumulación de biomasa durante el final del ciclo.



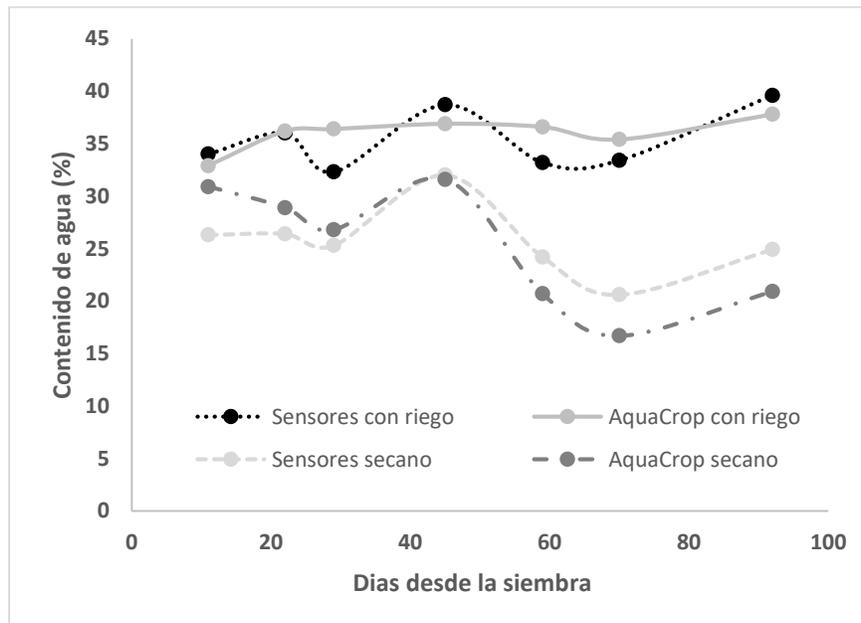
**Figura 4.5.** Evolución de de la cobertura de canopeo (CC) modelada, indicada por el área gris oscura, y las mediciones de CC a campo, indicadas por los puntos negros. Simulaciones realizadas con los parámetros conservativos de Maiz – FAO (imagen superior) y con los parámetros ajustados del ensayo (imagen inferior).

Al graficar la evolución de la CC obtenida a partir del análisis de las imágenes (Figura 4.6), se observa que aparentemente el tratamiento irrigado alcanza de forma más prematura valores elevados de cobertura, aunque las diferencias no resultaron estadísticamente significativas para un  $p=0,05$  en ninguno de los puntos evaluados.



**Figura 4.6.** Desarrollo del porcentaje de cobertura del canopeo (CC) en tratamientos irrigados y no irrigados.

A fin de evaluar el ajuste con el cual el modelo fue capaz de simular el contenido hídrico del suelo, a lo largo del ensayo, en los primeros 25 cm de suelo, se llevaron adelante mediciones del contenido de humedad del suelo utilizando sensores. Como puede observarse en la figura 4.7; existe coincidencia entre los valores medidos y simulados del contenido hídrico del suelo. Por tal motivo, no fue necesario hacer ajustes en los parámetros o mecanismos de simulación del programa para el balance hídrico del suelo, como sí se tuvieron que realizar para el canopeo.



**Figura 4.7.** Contenido hídrico en suelo medido con sensores y simulado con AquaCrop

### 4.2.3 Rendimiento de biomasa al momento de picado

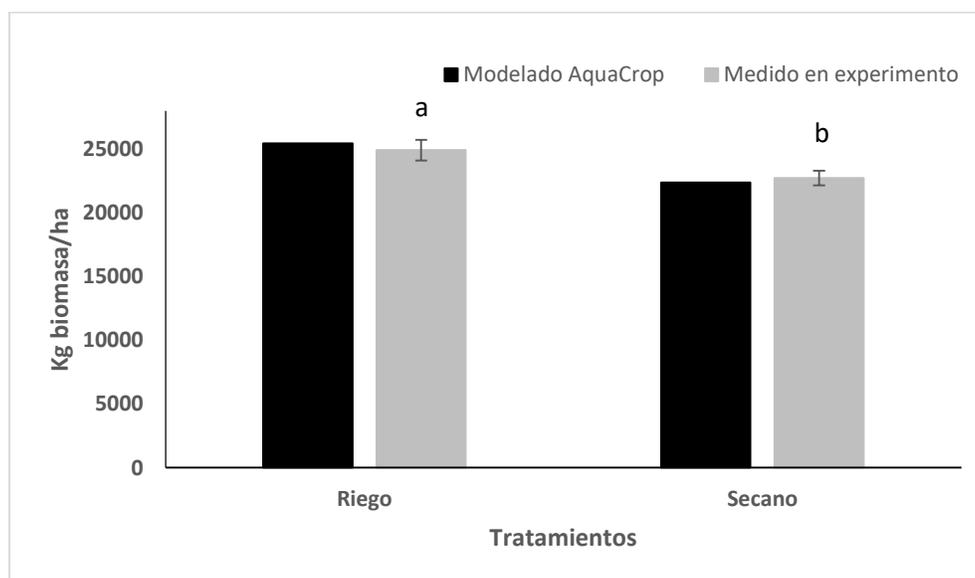
El momento ideal de corte y picado para ensilado del maíz, fue determinado en base a la simulación en grados día, definiendo el tiempo requerido para alcanzar los 1.485 GD establecidos por el semillero KWS, proveedor de las semillas, como momento óptimo de corte, para este híbrido. El momento óptimo resultó ser el 15 de marzo.

Como se trata de un maíz para silaje, se considera la producción de biomasa total, ya que el picado que se realiza es de la planta entera.

En el momento de la cosecha para realizar el picado, el cultivo alcanzaba, según la simulación realizada en AquaCrop, un rendimiento potencial, bajo condiciones ambientales ideales, es decir sin estrés hídrico, nivel óptimo de fertilidad, sin estrés salino y ausencia de malezas, de 27.833 kg de biomasa/ha. El rendimiento simulado para la condición de secano fue de 22.718 kg de biomasa/ha, mientras que en condiciones de irrigación el volumen de biomasa simulado fue de 24.913 kg, arrojando un incremento de rendimiento del 8,8% en relación a la condición de secano.

Las mediciones, llevadas adelante experimentalmente a partir del peso promedio de 5 plantas extraídas al azar de las 5 parcelas previamente definidas dentro de cada tratamiento, arrojaron un rendimiento de 22.360 kg de biomasa/ha para el tratamiento de secano, y de 25.541 kg/ha en condiciones irrigadas (Figuras 4.8 y 4.9).

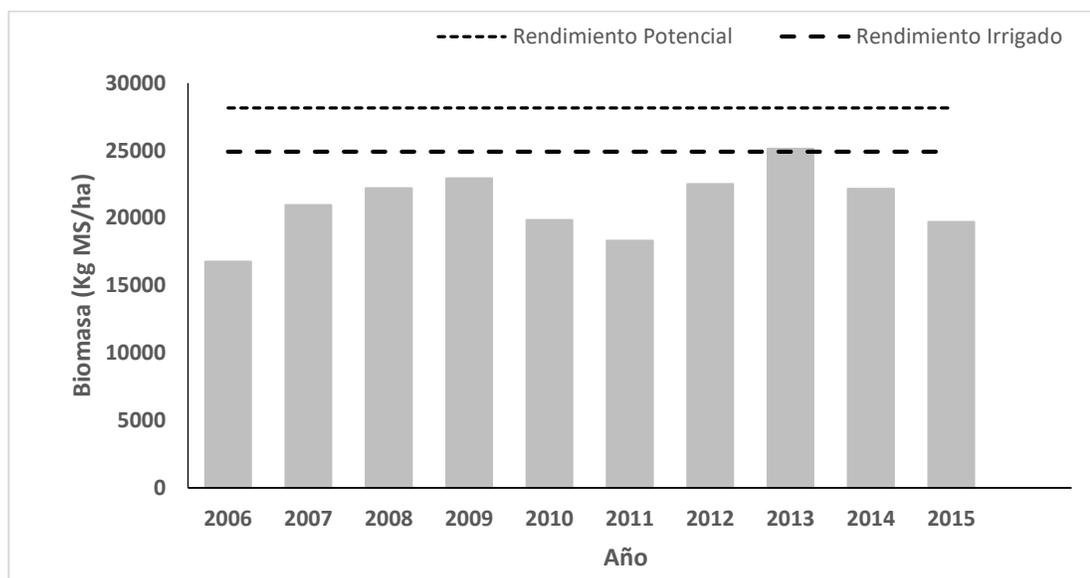
Los datos obtenidos del experimento, presentaron un error estándar de 566 y 813 kg/ha de biomasa respectivamente. Siendo la diferencia entre ambos tratamientos, estadísticamente significativa con un valor p de 0,03.



**Figura 4.8.** Gráfico comparativo de los rendimientos en biomasa simulados mediante AquaCrop y los rendimientos de biomasa medidos en las parcelas experimentales: estos últimos, analizados estadísticamente, muestran la significancia de la diferencia entre ambos tratamientos (letras a y b).

Las diferencias observadas entre los rendimientos de biomasa simulados y medidos fueron del 1,6% en condiciones de secano, y del 2% en condiciones bajo riego, evidenciando una muy buena capacidad del modelo AquaCrop de simular el rendimiento de biomasa para el cultivo de maíz en las condiciones experimentales definidas.

Utilizando la calibración del modelo generada en base a la información obtenida experimentalmente, y utilizando los valores medios de los factores climáticos para el sitio de estudio, se llevó adelante la simulación del rendimiento del cultivo de maíz en función de la variación de las precipitaciones, para la serie de años 2006-2015 (Figura 4.10). La modelación solo se llevó adelante para el tratamiento secano, en base a la oferta hídrica da cada uno de los años de la serie.



**Figura 4.9.** Simulación de rendimiento en secano para el periodo 2006-2015 en función de la variación de precipitaciones. La línea punteada superior indica el rendimiento potencial para el ambiente, según el modelo AquaCrop, y la línea punteada inferior indica el valor obtenido en el tratamiento irrigado llevado adelante en la campaña 2016-2017 que es tomado como referencia.

La serie de datos generada a partir de la simulación del rendimiento en biomasa arroja un promedio de 21.064,4 kg MS/ha. Utilizando el rendimiento obtenido bajo riego en el ensayo experimental como referencia (24.913 kg MS/ha), podemos decir que para ese año, con riego se obtuvo un incremento del 18,27% del rendimiento.

#### 4.2.4. Rendimiento de granos

Si bien nuestro planteo técnico no contemplaba que el cultivo finalizara su ciclo, llegando a la madurez comercial del grano; tanto en el experimento como en la simulación, llevamos el cultivo hasta este estadio para poder evaluar si el ajuste del modelo era bueno para esa fase del cultivo.

El rendimiento simulado utilizando AquaCrop fue de 8.382 kg/ha para el maíz en condiciones de secano y 9.119 kg/ha para el maíz irrigado, con una diferencia de 8,8% entre los rendimientos simulados para ambos tratamientos.

Los rendimientos observados experimentalmente, en base a la recolección de 5 plantas por parcela en cada una de las 5 parcelas delimitadas en cada tratamiento, fueron de 8.050 kg/ha de grano en condiciones de seco, y 8.668 kg/ha de grano en condiciones irrigadas, con una diferencia entre los rendimientos de 7,7% entre ambos tratamientos. Los datos obtenidos del experimento, presentaron un error estándar de 144 y 265 kg/ha de biomasa respectivamente, siendo la diferencia entre ambos tratamientos estadísticamente significativa ( $p = 0,05$ ).

La diferencia entre los rendimientos de grano medidos y modelados para el tratamiento de seco fue de 4,1%, mientras que para el tratamiento regado fue de 5,2%. Estas diferencias son algo mayores a las observadas para los rendimientos de biomasa.

## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA EVALUAR LA IMPLEMENTACIÓN DE RIEGO: RESULTADOS



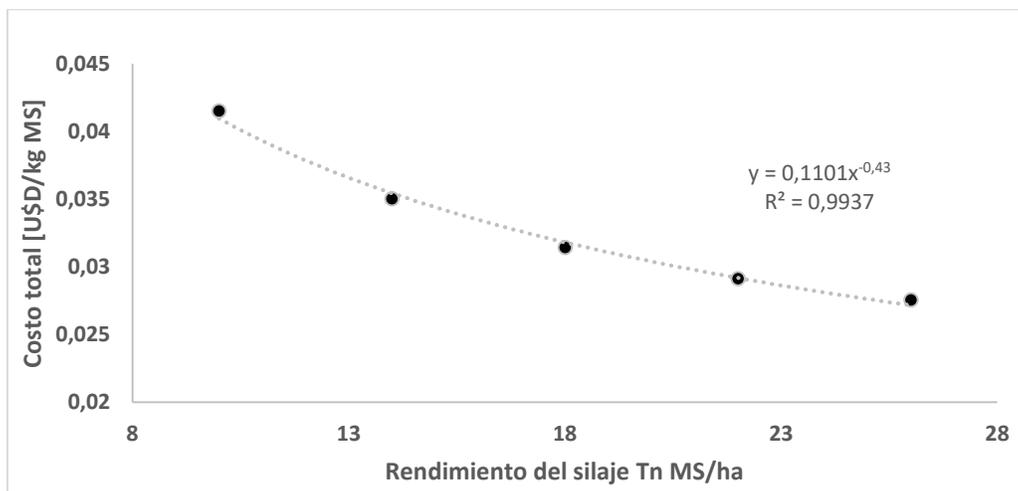
## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA EVALUAR LA IMPLEMENTACIÓN DE RIEGO: RESULTADOS

### 5.1. Variables económicas

A la hora de tomar decisiones técnicas por parte del productor agropecuario suele ser muy relevante el factor económico, y siempre debe ser considerado en el análisis de las propuestas técnicas. Pero no hay que perder de vista que la intervención agronómica sobre los ecosistemas genera impactos sobre los mismos a niveles edáficos, hidrológicos y biológicos, modificando los equilibrios, las relaciones y los procesos que se dan dentro del sistema. Por tal motivo, complementamos el análisis ecohidrológico del sistema con variables económicas, generando información que nos acerque a su posible aplicación en el medio productivo.

#### 5.1.1. Costo de producción de silaje de maíz

Para poder utilizar en el cálculo de costos a partir de la escala tabulada obtenida de la Cámara Argentina de Contratistas de Forrajeros (CACF, 2019), se realizó una regresión no lineal de la relación USD\$/kg MS de costo total del kg de silaje en función del rendimiento en Tn MS/ha (Figura 5.1). La regresión generó una función potencial  $Y = 0,5063 * X^{-0,717}$  con buen ajuste ( $R^2 = 0,99$ ). Utilizando la misma, fue posible definir el costo de elaboración por kg, para cada uno de los rendimientos obtenidos en la simulación con AquaCrop en el periodo 2006-2015.



**Figura 5.1.** Función de la variación del costo total del kg de MS de silaje de maíz, en función del rendimiento del cultivo expresado en Tn de MS/ha.

Los costos relevados por la CACF contemplan la sumatoria de los costos de cultivo, tierra y confección del silaje. En este caso, considerando que típicamente los establecimientos lecheros desarrollan sus actividades sobre tierras propias, al elaborar el margen bruto, se dedujo del costo de alquiler de la tierra, equivalente en los valores obtenidos de la CACF, a 16 qq de soja por ha.

### 5.1.2. El precio de mercado del kg de silaje de maíz.

El primer inconveniente que se afronta cuando se trabaja en la realización de estimaciones económicas sobre producciones forrajeras generadas y consumidas dentro del mismo establecimiento, es que en general, los forrajes no tienen un precio de mercado de referencia directo, lo que nos obliga a definir una metodología que permita inferir un precio representativo para ser capaces de evaluar la implementación de la tecnología desde un punto de vista económico.

En el caso de los establecimientos lecheros, podemos tomar un precio de referencia para su producto final (leche o grasa butirosa) y utilizarlo, afectado por el factor de conversión del forraje en producto, como referencia para la valoración económica del forraje. El precio para el kg de grasa butirosa es un dato público y conocido. El Ministerio de Producción de la Provincia de Santa Fe (Tabla 5.1), publica los precios promedio mensuales, el precio de la GB fue de 4,33 U\$/kg en promedio durante el año 2019.

**Tabla 5.1.** Tabla precios grasa butirosa reelaborada a partir de datos publicados por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca ([estadisticaslecheria@magyp.gob.ar](mailto:estadisticaslecheria@magyp.gob.ar)) y valor histórico del dólar, utilizando los promedios mensuales de la cotización emitidos por el BNA.

Mes	\$/kg GB	\$/U\$D del mes	U\$D/kg GB
Enero	152,41	38,57	3,95
Febrero	149,4	38,95	3,84
Marzo	185,13	40,97	4,52
Abril	210,38	42,72	4,92
Mayo	216,89	46,08	4,71
Junio	215,82	45,14	4,78
Julio	225,7	43,49	5,19
Agosto	231,03	59,6	3,88
Septiembre	232,57	59,14	3,93
Octubre	236,3	60,42	3,91
Noviembre	255,2	62,45	4,09
Diciembre	271,07	63,37	4,28
<b>Promedio anual U\$D/kg GB</b>			<b>4,33</b>

A partir del precio de la GB y siendo conocido el factor de conversión de silaje en GB y el precio de la GB, se calculó el precio del silaje, resultando en una estimación de 0,17 U\$/kg.MS de silaje, según se explica en punto 3.3.1 de Materiales y Métodos.

### 5.1.3. El costo del riego

El costo resultante para un riego por goteo enterrado, accionado por energía eléctrica en las condiciones de trabajo empleadas en el desarrollo de este trabajo, se calculó en base a la suma de los costos de inversión y su amortización, los costos de intereses y los costos operativos, siguiendo la metodología propuesta en Marengo *et al.* (2018), según puede observarse en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Datos y cálculos para establecer el costo del mm de riego

<b>Inversión</b>		
Equipo de riego (Base 100 ha)	U\$/ha	3100
Perforación	U\$/ha	480
Transformador 80 Kva	U\$/ha	343,2
Inversión total	U\$/ha	3923,2
<b>Amortizaciones</b>		
Valor residual del equipo	%	50
Valor residual del transformador	%	40
Vida útil del equipo años	Años	25
Vida útil del transformador años	Años	20
Vida útil de la perforación años	Años	15
Equipo de riego	U\$/ha.año	62
Perforación	U\$/ha.año	32
Transformador 80 Kva	U\$/ha.año	10,30
Amortizaciones totales	U\$/ha.año	104,30
<b>Intereses</b>		
Tasa de interés	% U\$D	2,5
Intereses anuales	U\$/año.ha	98,08
<b>Datos operativos</b>		
Consumo energético	Kw/mm.ha.hora	3,59
Precio de la energía	U\$/Kwh	0,13
Costo de la energía	U\$/mm.ha	0,47
Reparaciones (2% valor del equipo)	U\$/mm.ha	0,25
Mano de obra (10% del salario)	U\$/mm.ha	0,05
Costos operativos	U\$/mm.ha	0,77

A partir de la tabla 5.2., se obtuvieron los datos para calcular el costo del riego por mm de lámina aplicada para cada uno de los años de análisis. Esos datos fueron incorporados a la ecuación 3.6, a fin de obtener la ecuación 5.1 y poder llevar adelante el cálculo.

$$\text{Costo} \left[ \frac{\text{U\$D}}{\text{ha. año}} \right] = 104,3 \left[ \frac{\text{U\$D}}{\text{ha. año}} \right] + 98,08 \left[ \frac{\text{U\$D}}{\text{ha. año}} \right] + 0,77 \left[ \frac{\text{U\$D}}{\text{mm. ha}} \right] . \text{mm regados año}$$

(Ecuación 5.1)

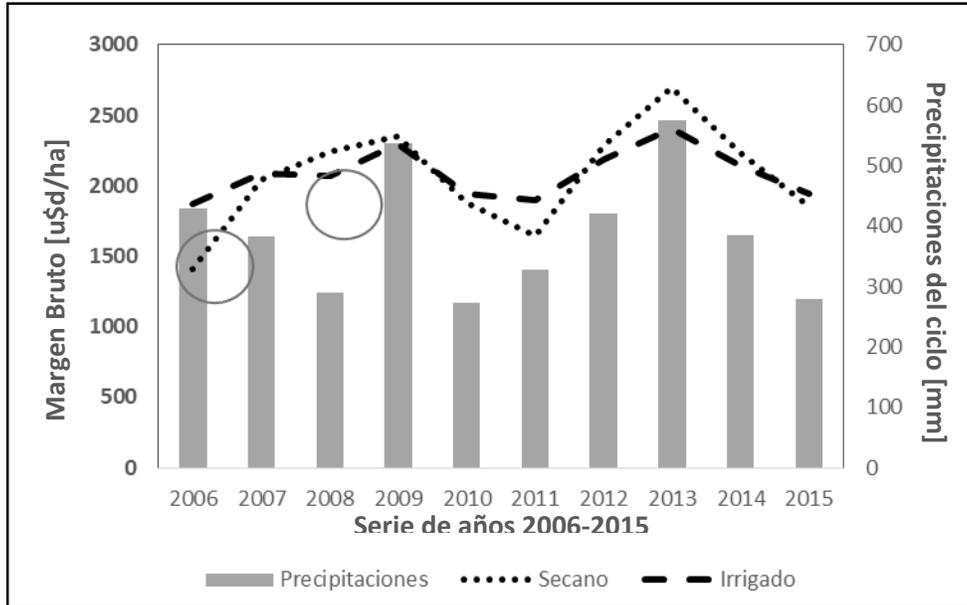
#### 5.1.4. Margen Bruto

El cálculo del Margen Bruto (MB) para ambos sistemas productivos arrojó una diferencia mínima en favor del sistema regado. Siendo 21 U\$/ha mayor el MB promedio anual por hectárea del sistema bajo riego respecto al sistema de secano en el periodo 2006-2015.

**Tabla 5.3.** Datos y resultados del cálculo del Margen Bruto para la producción de silaje en la serie de años 2006-2015

Concepto	Unidad de medida	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Rendimiento seco	tn/ha	16,8	21,0	22,2	23,0	19,9	18,3	22,5	25,1	22,2	19,7
Rendimiento irrigado	tn/ha	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9
Precio "Venta" del Silaje	U\$/KG.MS	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Ingresos Brutos seco	U\$/ha	2532,4	3243,0	3456,6	3582,4	3057,1	2795,6	3507,2	3953,6	3449,6	3032,1
Ingresos Brutos irrigado	U\$/ha	3915,2	3915,2	3915,2	3915,2	3915,2	3915,2	3915,2	3915,2	3915,2	3915,2
Costo de prod. silaje seco	U\$/KG.MS	0,067	0,057	0,055	0,054	0,059	0,063	0,054	0,050	0,055	0,060
Costo de prod. silaje irrigado	U\$/KG.MS	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
mm de riego necesarios	mm/ha	219,3	266,0	358,6	110,9	376,6	320,2	227,0	72,4	263,4	368,4
costo riego/año	U\$/ha	371,24	407,20	478,50	287,77	492,36	448,93	377,17	258,13	405,20	486,05
Total costos directos seco	U\$/ha	1124,6	1197,7	1217,6	1229,0	1179,7	1153,1	1222,2	1261,0	1217,0	1177,2
Total costos directos irrigado	U\$/ha	1669,8	1423,7	1365,5	1333,8	1479,5	1567,5	1352,5	1249,6	1367,3	1487,4
MB seco	U\$/ha	1407,8	2045,3	2238,9	2353,4	1877,4	1642,5	2285,0	2692,7	2232,6	1854,8
MB riego	U\$/ha	1874,1	2084,3	2071,2	2293,7	1943,4	1898,8	2185,5	2407,4	2142,7	1941,8

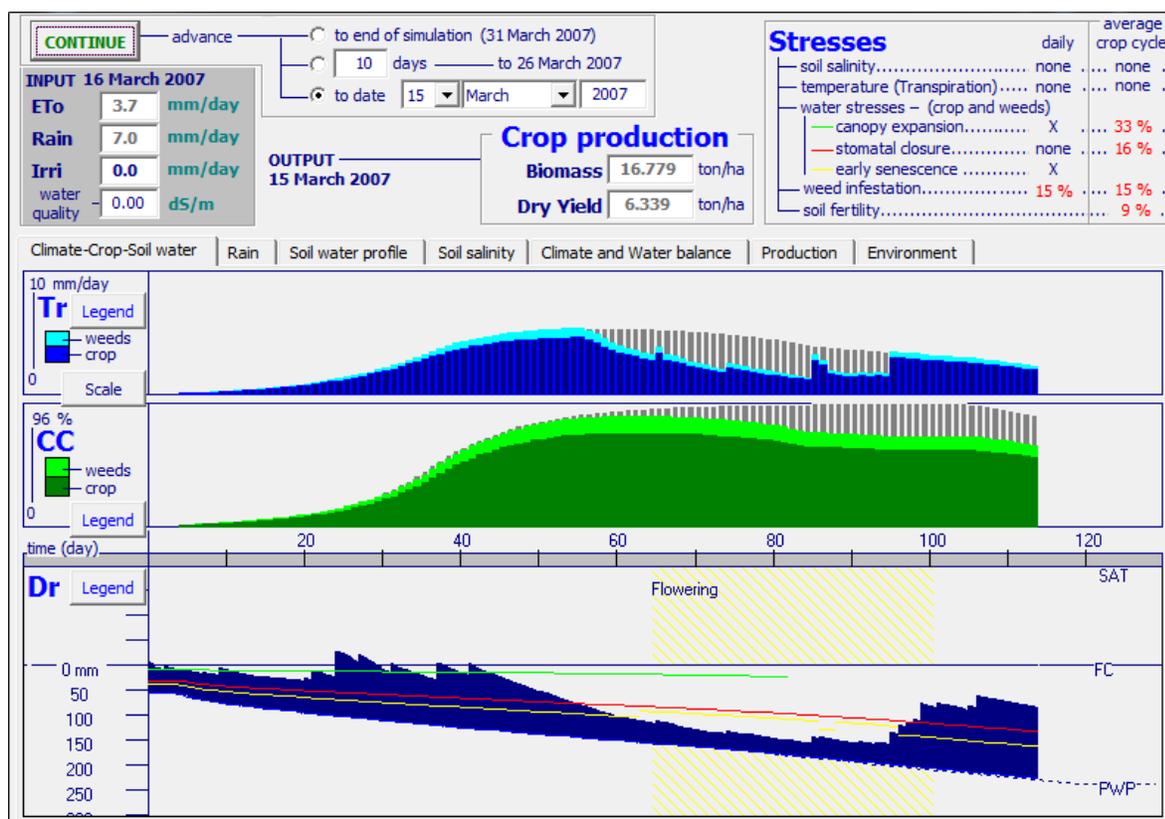
Es necesario dejar en claro, que el precio asignado al silaje está calculado en base al precio del kg de grasa butirosa, y en la estructura de costos no se contemplan los costos asociados a la ejecución de la producción ganadera ni la retribución al uso de la tierra, ya que se considera que los mismos son iguales para ambos sistemas, y en base a los objetivos planteados, en este trabajo se debe determinar la diferencia en el resultado económico y no el valor neto del resultado. El objetivo de la tesis es evaluar la factibilidad de emplear un modelo matemático de simulación de rendimiento en función de la oferta hídrica, y el MB solo se constituye como una herramienta para sumar una caracterización desde una perspectiva económica de la aplicación de la tecnología.



**Figura 5.2.** Variación del MB para los sistemas productivos irrigado y seco, en conjunto con los valores de las precipitaciones totales para cada ciclo, para el período 2006-2015. Se señalan con círculos dos años que se analizan en detalle en el texto.

Al analizar la evolución anual de los MB y las precipitaciones de cada año, vemos que no parece haber una relación directa aparente, como podría esperarse, entre los años más secos, y las mayores diferencias en MB a favor del sistema bajo riego. Esto podría explicarse porque la determinación del rendimiento no está dada solo por el nivel de las precipitaciones durante el ciclo, sino que también influye fuertemente su distribución a lo largo del ciclo del mismo; Como puede observarse para el caso del año 2006, donde las precipitaciones fueron mayores que en la mayoría de los años, pero el rendimiento, y consecuentemente el MB para el sistema de secano, no resultarían tan elevado (círculo de la izquierda en la Figura 5.2.); al observar la distribución de las precipitaciones para ese año (Figura 5.3), podemos ver que si bien las precipitaciones totales a lo largo del ciclo de cultivo no fueron escasas, pero su distribución generó un déficit hídrico para el cultivo durante la mayor parte del ciclo, incluyendo momentos de alta sensibilidad, que impactaron sobre el rendimiento.

Por el contrario, el año 2008 (círculo de la derecha en Figura 5.2), presentó precipitaciones totales más escasas pero mejor distribuidas que el 2006, lo que redundaría en un rendimiento mayor, y un margen bruto para el sistema secano mejor aún que para el sistema irrigado.



**Figura 5.3.** Transpiración, agua almacenada en el suelo y líneas de referencia de los distintos umbrales del estrés hídrico durante la campaña 2006-2007.

La distribución de las lluvias durante el año 2008, generó un déficit hídrico que provocó un alejamiento gradual y constante de la condición de capacidad de campo, pero durante casi todo el ciclo, el suelo se habría mantenido por encima (o levemente por debajo), de los umbrales para los distintos impactos que el estrés hídrico genera sobre el rendimiento, y las precipitaciones se concentraron a partir del inicio del periodo reproductivo (periodo crítico), permitiendo transcurrir todo el periodo de formación de grano en condiciones de suficiencia hídrica (Figura 5.4).

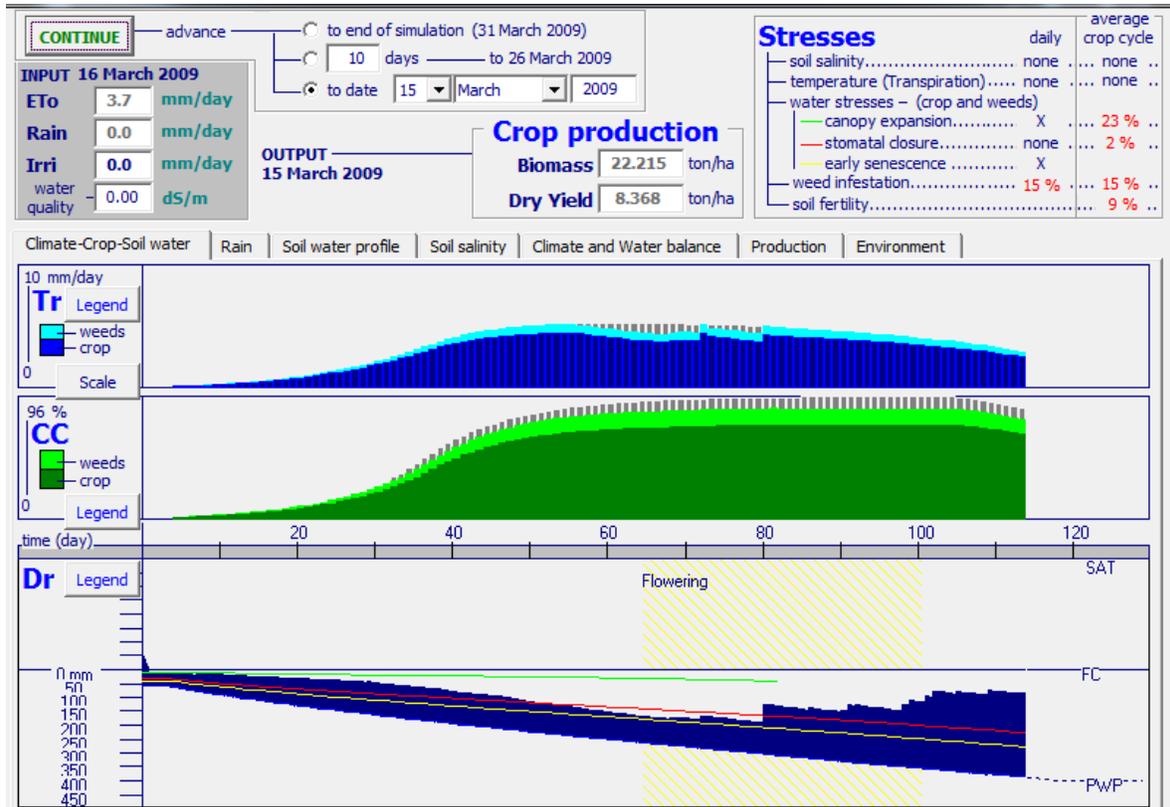
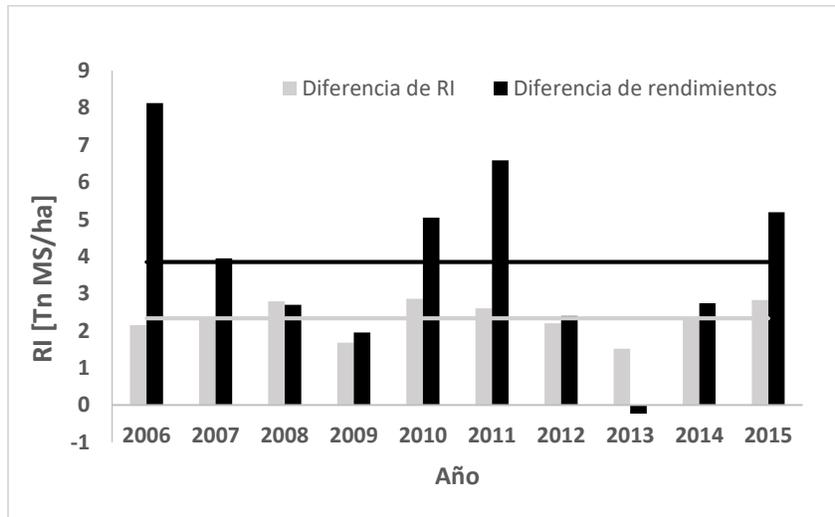


Figura 5.4. Transpiración, agua almacenada en el suelo y líneas de referencia de los distintos umbrales del estrés hídrico durante la campaña 2008-2009.

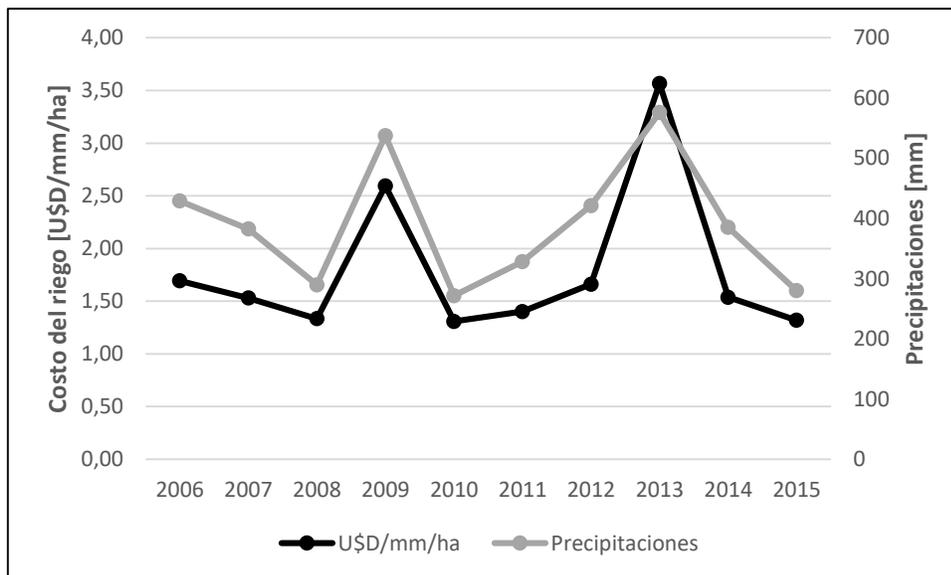
### 5.1.5. Rendimiento de indiferencia (RI)

En la Figura 5.5, se observa que el RI para las condiciones irrigada y secano para la serie de datos de los años 2006-2015. Se observa también la diferencia entre los RI de ambos tratamientos y la diferencia entre los rendimientos simulados para ambos tratamientos. De esta manera se pudo observar para cuáles años y en qué magnitud, arroja un mejor resultado cada uno de los tratamientos.



**Figura 5.5.** Comparación de las diferencias de los rendimientos de indiferencia (RI) y rendimientos simulados entre los tratamientos de riego y seco. Las líneas horizontales expresan los promedios de ambas categorías.

De acuerdo a la tabla 5.4, en 8 de los 10 años el resultado económico fue favorable al sistema bajo riego, siendo el promedio para la serie de años 2006-2015 de las diferencias los RI de ambos tratamientos entre sí, de 2,34 tn/ha, y el promedio de las diferencias de los rendimientos simulados de ambos tratamientos entre sí, de 3,85 tn/ha.



**Figura 5.6.** Comparación durante 10 años, del costo del mm irrigado y los mm precipitados durante el periodo de cultivo.

**Tabla 5.4.** Datos y resultados del cálculo del rendimiento de Indiferencia para la producción de silaje en la serie de años 2006-2015

Concepto	Unidad de medida	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Rendimiento secano	tn/ha	16,8	21,0	22,2	23,0	19,9	18,3	22,5	25,1	22,2	19,7
Rendimiento irrigado	tn/ha	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9
Precio "Venta" del Silaje	USD/KG.MS	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Costo de producción silaje secano	USD/KG.MS	0,067	0,057	0,055	0,054	0,059	0,063	0,054	0,050	0,055	0,060
Costo de producción silaje irrigado	USD/KG.MS	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Costo de confección secano	USD/KG.MS	0,033	0,030	0,029	0,029	0,030	0,032	0,029	0,028	0,029	0,031
Costo de confección irrigado	USD/KG.MS	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Costo de Implantación secano	USD/ha	255,23	254,03	252,88	252,07	254,77	255,33	252,57	249,17	252,93	254,85
Costo de Implantación irrigado	USD/ha	620,74	656,70	728,00	537,27	741,86	698,43	626,67	507,63	654,70	735,55
mm de riego necesarios	mm/ha	219,30	266,00	358,60	110,90	376,60	320,20	227,00	72,40	263,40	368,40
costo riego/año	USD/ha	371,24	407,20	478,50	287,77	492,36	448,93	377,17	258,13	405,20	486,05
RI secano	tn/ha	1,50	1,49	1,49	1,48	1,50	1,50	1,49	1,47	1,49	1,50
RI irrigado	tn/ha	3,65	3,86	4,28	3,16	4,36	4,11	3,69	2,99	3,85	4,33
Diferencia de RI	tn/ha	2,15	2,37	2,79	1,68	2,87	2,61	2,20	1,52	2,36	2,83
Diferencia de rendimientos	tn/ha	8,13	3,95	2,70	1,96	5,05	6,59	2,40	-0,23	2,74	5,20
Promedio diferencia de RI	tn/ha	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34
Promedio diferencia de rendimientos	tn/ha	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85

## **6. ANALISIS FODA DE VARIABLES AMBIENTALES: RESULTADOS**

## 6.1. FODA AMBIENTAL

La necesidad de incorporar estudios que evalúen el impacto sobre la sustentabilidad ambiental de los proyectos de riego complementario es conocida hace años. Según un estudio de la Secretaría de Agricultura de la Nación (1997), en la región pampeana el 60% de la tierra es potencialmente regable, frente a esta potencialidad, el mismo estudio previene que la implementación de esta tecnología, si bien puede ser muy beneficiosa desde el punto de vista microeconómico para los productores adoptantes, puede resultar perjudicial para el conjunto de la sociedad si no se contempla la escasez relativa del recurso agua y el impacto sobre el ambiente a escala regional. SAGyP (1997).

Por su parte, Barnes (1988) citó hace décadas, extensas regiones de suelos argentinos degradados por la práctica del riego, especialmente en regiones de bajas precipitaciones, evidenciando la necesidad de observar atentamente el impacto que la implementación de esta práctica genera sobre la sustentabilidad del sistema productivo.

A pesar de que los sistemas de riego complementarios ingresan relativamente poca cantidad de agua al sistema, el incremento de la salinidad y la degradación del recurso suelo por incremento de sodicidad podrían ser igualmente muy importantes, (Abrego *et al.* 1998) (Andriulo *et al.*, 2000). En efecto, es sabido que la degradación de los suelos y de los acuíferos es un peligro latente en aquellas zonas donde la expansión del riego ha sido más importante en los últimos años (Nogar y Annesi 2000).

La posible degradación de los suelos por salinidad y sodicidad debe ser interpretada como un proceso complejo y dinámico, donde los ingresos y salidas de sales, su interacción fisicoquímica con los componentes edáficos y la relación con la disponibilidad hídrica y su fluctuación en el tiempo, requieren de un análisis profundo, prolongado y localizado, para evitar incurrir en errores. Los modelos predictivos de salinización y sodificación desarrollados para otras condiciones ambientales, especialmente para climas secos, deben ser utilizados con extrema precaución; ya que aguas de similar composición, pero utilizadas para regar suelos de zonas más húmedas o con propiedades fisicoquímicas que los vuelven menos resistentes y/o resilientes, pueden dar lugar a procesos de degradación que no se observan en la región pampeana (Génova, 2012).

Génova (2007), ha demostrado, que en la región pampeana, es posible regar de forma complementaria con las aguas bicarbonatadas sódicas de los acuíferos Puelches y Pampeano y alcanzar situaciones de equilibrio salino y sustentabilidad del recurso edáfico producto de la resiliencia de los suelos y del lavado natural por precipitaciones.

Con el objetivo de caracterizar los posibles efectos ambientales de la implementación de la tecnología del riego por goteo enterrado, se desarrolló un FODA (Tabla 6.1.) de variables ambientales, para enriquecer el análisis de la aplicación de la tecnología en estudio.

**Tabla 6.1.** Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas a nivel ambiental de la implementación del sistema de riego por goteo enterrado.

<p><b>Fortalezas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos consumo de agua</li> <li>• Menor incorporación de sales al suelo</li> <li>• Menor gasto energético</li> </ul>	<p><b>Debilidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización del impacto agrícola</li> <li>• Uso de grandes cantidades de plástico</li> </ul>
<p><b>Oportunidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicación de fitosanitarios</li> <li>• Aplicación de fertilizantes</li> </ul>	<p><b>Amenazas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda sobre los acuíferos</li> </ul>

#### 6.1.1. Fortalezas

- Menor consumo de agua

Los métodos de riego tradicionales por gravedad presentan eficiencias de uso del agua que pueden ser inferiores al 40% (Jensen, 2007), mientras que los métodos de riego por goteo subsuperficial permiten alcanzar eficiencias de 95 a 99% (Lamm, 2003), llegando a generar ahorros de hasta 50% de agua en relación al riego por surcos y del 30% en relación al riego por aspersión. Siendo incluso significativamente más eficiente que el riego por goteo convencional o no enterrado (Medrano *et al.* 2007). Esta mayor eficiencia permite reducir tanto la demanda hídrica como la energía consumida por el bombeo.

- Menor incorporación de sales al suelo

La reducción de la lámina de agua aplicada, producto de la mayor eficiencia descrita en el punto anterior, redundará en una menor incorporación de sales al sistema, con la consecuente reducción de la degradación del sistema suelo asociada a estas sales (Andriulo *et al.*, 2000).

- Menor gasto energético

Sabiendo que uno de los principales impactos ambientales de la agricultura moderna se origina en el gran consumo energético directo e indirecto que la misma genera (Flores, 2007); se desprende una de las principales ventajas ambientales del riego por goteo subterráneo, que es el ahorro energético, debido, no solo al menor volumen de agua requerido, a causa de su mayor eficiencia; sino también a la baja presión operativa del sistema en relación a otros sistemas de riego presurizados.

La presión operativa del goteo, es alrededor de 4 veces menor a la requerida en los sistemas de riego por aspersión, que reduce el uso de energía y mejora el margen de ganancias y la sustentabilidad del sistema para el cultivo de maíz en relación a otros sistemas de riego (O'Brien, 1998).

### **6.1.2. Oportunidades**

- Aplicación de fitosanitarios:

La utilización de un sistema de riego por goteo subterráneo, permite la aplicación de productos fitosanitarios de forma localizada por las cintas de riego, brindando una alternativa más amigable para el medio ambiente y más segura para los trabajadores que llevan adelante la aplicación, ya que evita la necesidad de pulverizar, reduciendo el riesgo de deriva por el viento e inhalación (Ajwa *et al.*, 2002). A su vez, aplicar fitosanitarios mediante el sistema de riego, evita el uso de maquinaria, reduciendo el consumo de energía y la compactación por tránsito del terreno.

La aplicación de fitosanitarios a través de las cintas de riego, a su vez, reduce la carga de herbicidas y fungicidas a aplicar, ya que tanto las malezas (Grattan *et al.*, 1988) como los hongos fitopatógenos (Lamm, 2002), reducen su proliferación al evitar el humedecimiento de la superficie del suelo, y la generación de un ambiente húmedo dentro del canopeo.

- Aplicación de fertilizantes

Si bien no queda claro que la fertilización vía goteo permita alcanzar mayores rendimientos (del Amor *et al.*, 2007); con el riego por goteo la fertilización se realiza en forma fraccionada de acuerdo a las necesidades de ese momento del cultivo. Esto reduce el riesgo de fitotoxicidad del cultivo (Infocampo, 2017) y la pérdida de nutrientes por lixiviación, escurrimiento superficial y volatilización. (Camp, 1998), Mejorando la eficiencia de uso y reduciendo los efectos adversos de la liberación de fertilizantes al ambiente como por ejemplo la eutrofización de cuerpos de agua (RAPAL, 2010).

De la misma forma que sucede con los fitosanitarios, la fertilización vía riego por goteo, evita la circulación de maquinaria para realizar la fertilización; reduciendo el consumo de combustible y la compactación del suelo.

### **6.1.3. Debilidades**

- Localización del impacto agrícola

El sistema productivo tambo, resulta del complemento de la actividad ganadera y la actividad agrícola como productora de forraje. Los lotes del establecimiento destinados a la actividad agrícola para producción de silaje, sufren una mayor extracción de nutrientes y una reducida incorporación de materia orgánica, ya que se cosecha la planta entera y no sólo el grano, dejando escaso rastrojo con la consecuente baja en la incorporación de materia orgánica al suelo y menor cobertura del mismo, incrementando el riesgo de erosión.

Al instalar un sistema de riego enterrado, se fija en ese lote un uso agrícola permanente destinado a la producción de silaje, concentrando el impacto sobre el suelo en

un solo lugar. Un efecto aditivo es la compactación por tránsito, ya que el mismo lote será transitado anualmente por maquinaria pesada para la siembra, las aplicaciones de fitosanitarios y fundamentalmente la cosecha, sabiendo que el tránsito afecta la estructura edáfica (Duttmann *et al.*, 2014).

- Uso de grandes cantidades de plástico

La utilización de cintas de riego, tanto enterradas como superficiales, implica una incorporación de una gran cantidad de plástico al sistema productivo, para un distanciamiento de 1 m entre cintas, son 10 km de cinta por ha. El plástico, tiene la ventaja de ser resistente y durable para su uso, pero estas cualidades se convierten en problema en el momento que el producto pierde su valor de uso (García, 2011). Por este motivo resulta importante planificar la deposición final del plástico ingresado al sistema una vez cumplida su vida útil.

#### **6.1.4. Amenazas**

- Demanda sobre los acuíferos

Es importante considerar que por cada mm por hectárea utilizado para regar, se deben bombear desde el acuífero 10 m<sup>3</sup> de agua. Si la implementación de sistemas de riego se masifica a escala local, podría generarse un decaimiento de la altura piezométrica del acuífero por uso consuntivo, considerando que la extracción de perforaciones que captan agua del Acuífero Puelche aumentó un 80% en los últimos 20 años (García, 2016), resulta importante monitorear la posible amenaza que implica una potencial sobreexplotación del recurso.

## 7. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES



## 7. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

### 7.1 Consideraciones sobre el uso del modelo AQUACROP y el análisis económico de la implementación del riego por goteo.

El estudio minucioso del funcionamiento del modelo matemático AquaCrop y de la revisión bibliográfica de diferentes experiencias realizadas en distintas partes del mundo y para diferentes cultivos, sumado al desarrollo de un cultivo experimental, en el cual se pudo medir la evolución de una serie de parámetros tanto de cultivo, como a los niveles suelo y atmósfera, permitieron llevar adelante los pasos necesarios para la aplicación del modelo a la simulación de la producción de maíz para silaje en las condiciones experimentales dadas. Si bien existen reportes del uso de AquaCrop para modelado de producción de biomasa de maíz con fines potencialmente forrajeros (Mebane *et al.*, 2013), no contamos con información sobre su implementación en condiciones bajo riego en ambientes húmedos sub-húmedos.

La cuenca lechera Abasto Sur en general, y la zona de La Plata en particular, forman parte de una zona de producción lechera histórica, de las más antiguas del país, surgidas en torno a la ciudad de Buenos Aires. Con los años, la producción lechera, se ha ido desplazando hacia zonas más alejadas y con mayores potencialidades productivas, como el sur de Córdoba y Santa Fe. Este proceso ha centrado la investigación y el desarrollo tecnológico en esas zonas, siendo actualmente la Estación Experimental del INTA de Rafaela, en Santa Fe, el punto de referencia para el desarrollo tecnológico de la industria lechera en nuestro país.

La cultura alimentaria y la forma y tipo de alimentos consumidos por la sociedad está evolucionando permanentemente, y nuevas ideas como “consuma local”, “productos de cercanía” y “cadenas cortas de comercialización”, aparecen como posibles nuevos paradigmas en el consumo de alimentos. Sumado a la posible implementación de legislaciones que tiendan a diversificar la oferta de marcas en las góndolas de los mercados, se abre la posibilidad de que pequeñas empresas lácteas accedan a los puntos de distribución con productos locales. Este contexto resulta propicio para el desarrollo de análisis técnicos que generen información en torno a la aplicación de nuevas tecnologías para mejorar la producción en la zona.

El uso del agua en la agricultura va evolucionando constantemente, y el riego ya no es solo un recurso técnico implementado para hacer posible la producción en zonas áridas, sino que poco a poco, y a medida que se van interpretando los efectos sobre el ambiente de las nuevas tecnologías de riego aplicadas (Génova, 2007) van integrándose a la amplia gama de recursos técnicos utilizados para llevar adelante la producción agropecuaria en zonas sub-húmedas e incluso húmedas. Por tal motivo en la Pradera Pampeana, el riego complementario se difundió ampliamente (Vázquez *et al.*, 2006).

Este avance en el uso del agua para riego, debe ser acompañado con una mejora de la eficiencia del uso de los recursos, que se expresa, para el caso del agua, en la consigna “*more crop per drop*”, impulsada por la FAO (Diouf *et al.*, 2003).

A partir de este trabajo puede considerarse que el modelo AquaCrop, es funcional a fines de simular productividad de biomasa con fines forrajeros, ampliando la gama de posibilidades para las cuales se había empleado hasta este momento el modelo en el país. Ello abre las puertas a su utilización en la planificación forrajera de sistemas tanto en seco como bajo riego. Utilizando herramientas simples, como una cámara fotográfica para la determinación de la CC, que hizo posible calibrar mejor el modelo (Figura 4.4); y programas abiertos, como el *Soil Water Characteristics*, que hacen posible la utilización del modelo con fines técnicos productivos, y sin necesidad de contar con grandes recursos, pudo aplicarse AquaCrop a la solución de una problemática técnica concreta.

Tanto el modelo, como el seguimiento de los datos a campo, permitieron caracterizar mediante simulación y mediante observación, las diferencias generadas en el sistema físico por la aplicación del riego, tanto en la humedad del suelo (Figura 4.4), como en el balance hídrico (Figura 4.2), o en la conductividad eléctrica del mismo (Figura 4.3). Estas diferencias observadas en el sistema suelo, se expresaron en los parámetros del cultivo, tanto en aquellos asociados al desarrollo del mismo, como es la evolución del CC (Figura 4.6), como así también a aquellos que caracterizan la productividad final del sistema, como son la producción de biomasa y de granos (Figuras 4.8 y 4.9).

El análisis económico para evaluar la factibilidad de implementación de la tecnología de riego por goteo enterrado, además de la calibración y utilización del modelo, requirió de la aplicación de metodologías que permitan establecer un valor económico tanto para el silaje de maíz producido (Figura 5.1) como así también para el costo de aplicación por hectárea del mm de agua de riego (Tabla 5.2). A partir de estos datos, se pudo desarrollar el análisis del Margen Bruto (Tabla 5.3), y del rendimiento de indiferencia (Tabla 5.4), que arrojaron resultados favorables a la implementación de la tecnología de riego, aunque no fueron resultados concluyentes en lo referido a la conveniencia económica de la aplicación, ya que la diferencia en el resultado económico, si bien favorable al sistema irrigado, es estrecha. Esto se debe, en parte, al incremento del costo del mm regado cuando la necesidad hídrica del año es baja, debido a la ocurrencia de mayores precipitaciones, tal cual puede observarse en la figura 5.6., donde se evidencia la correlación entre el nivel de precipitaciones del año y el costo del mm para el mismo periodo.

La estrechez de la ventaja en el resultado económico que se observa para el riego aplicado en estas condiciones, obliga, tal cual se dijo en la introducción, a incluir una visión holística del agroecosistema, incluyendo factores asociados a la sustentabilidad, que quedan por fuera de los análisis económicos de corto plazo, como son el Margen Bruto o el rendimiento de indiferencia.

## 7.2. Conclusiones generales

En relación a la posible continuidad del estudio:

- El objetivo general propuesto para la tesis fue alcanzado satisfactoriamente; ya que se consiguió evaluar el efecto del riego por goteo subterráneo sobre la estabilización de la producción de maíz para ensilaje utilizando el modelo AquaCrop.
- La hipótesis puede ser considerada válida, y así afirmar que el sistema de riego por goteo enterrado resulta una herramienta apropiada para estabilizar la producción forrajera de silaje en el marco de sistemas productivos de tambo en la cuenca lechera Abasto Sur.
- El desarrollo de un cultivo experimental en una parcela localizada en la zona Abasto Sur, permitió obtener datos de la dinámica hídrica, fisiológica y de rendimiento en el cultivo de maíz, que permitieron calibrar el modelo AQUACROP para la zona y el cultivo, y luego simular rendimientos para una serie de datos climáticos de 10 años.
- Podría mejorarse la adaptación experimental a la realidad productiva si se trabajaran con densidades de siembra y fertilizaciones independientes para ambos tratamientos. Ya que la mayor oferta hídrica, podría llegar a permitir aprovechar mejor una mayor oferta nutricional y una mayor densidad de cultivo, modificando potencialmente los resultados del análisis económico.
- Desde una perspectiva económica, los años donde el volumen y distribución de las precipitaciones redundan en baja producción de silaje, como es el caso del año 2007, resultaría claramente conveniente contar con un sistema de riego.
- El análisis económico en un plazo de 10 años no brinda un resultado concluyente en torno a la conveniencia económica de adoptar el sistema de riego propuesto. Para la toma de la decisión deberían contemplarse otros elementos en el marco de un análisis holístico.
- Desde una perspectiva ecohidrológica, la aplicación de tecnologías de riego eficientes, como es el goteo enterrado, permite reducir el impacto negativo que el riego con aguas bicarbonatadas sódicas, como las presentes en el acuífero Puelches, puede generar sobre la dinámica de sales de los suelos y sobre el acuífero por extracción excesiva en relación a lo esperable para sistemas de riego tradicionales, como el riego gravitacional.

En relación al modelo AquaCrop:

- El modelo pudo ser calibrado con éxito, pudiendo validar mediante mediciones a campo el ajuste de la calibración y observando que la simulación de datos asociados tanto a la dinámica hidrológica del sistema (ej: balance hídrico del suelo), como a la dinámica del cultivo (ej: cobertura de canopeo, biomasa total) presenta buen ajuste.

- El modelo no cuenta con una función que permita trabajar con diferentes porcentajes de humedad para la biomasa y el índice de cosecha. A fin de optimizar el ajuste sería adecuado poder acceder a la información del contenido hídrico en el tejido simulado por AquaCrop.
- Sería deseable en futuros ensayos experimentales, mejorar la adquisición de datos de la humedad del suelo durante el ciclo del cultivo, a fin de poder mejorar la calibración del modelo, para esto es necesario llevar adelante mediciones hasta 1,6 m de profundidad.

### **7.3. Conclusión personal**

La realidad obliga a pensar en sistemas agropecuarios que sean capaces de satisfacer las demandas de alimentos del presente, sin generar procesos de degradación que pongan en peligro la sustentabilidad de los recursos naturales y la posibilidad de producir alimentos en el futuro. Para alcanzar esta meta es fundamental, en primera instancia, comprender el funcionamiento dinámico de los agroecosistemas y llevar adelante un análisis global de los mismos desde una perspectiva ecológica; interpretando apropiadamente la gran diversidad y complejidad de interacciones en las relaciones de equilibrio físicas, químicas y biológicas hacia el interior del sistema, como así también sociales, económicas y ambientales en términos de relaciones con otros sistemas, ya sea productivos, naturales o urbanos.

A lo largo del desarrollo de esta tesis se han adquirido conocimientos acerca de cómo la aplicación de modelos matemáticos constituye una herramienta fundamental que permite modelar en forma ajustada la dinámica de determinados fenómenos como es, en este caso la estabilización en términos de rendimiento de un agroecosistema en función de la oferta hídrica. También se pudieron apreciar mejor las interrelaciones entre los factores del sistema productivo, mejorando la capacidad de comprensión en torno a lo que está sucediendo dentro del agroecosistema.

La aplicación de herramientas técnicas concretas, como el modelo AquaCrop, para generar y analizar información sobre el funcionamiento del sistema productivo; sumado a la posibilidad de interpretar, contextualizar y aplicar esta información desde diferentes marcos conceptuales y teóricos que brindan las distintas disciplinas que integran en conjunto la ecohidrología; constituyeron un aprendizaje significativo en la propia formación profesional. Se espera tener la posibilidad de poner en práctica y en diálogo estos aprendizajes en el desarrollo de futuras labores profesionales, tanto científicas y técnicas como docentes.

## 8. Bibliografía

Abarca Jaramillo, A. L. (2019). Aplicación del modelo AquaCROP para la simulación del rendimiento agrícola del maíz duro en la región Costa del Ecuador. Tesis de grado, Universidad de Quito, Ecuador.

Abdalhi, M. A. M., Jia, Z., Luo, W., Tang, S., Ali, O. O., y Cheng, J. (2019). FAO AquaCrop Model Performance: in Green Canopy Cover, Soil Moisture and Production of Maize at Middle and Lower Reaches Plain of Yangtze River of China. *Russian Agricultural Sciences*, 45(2), 186-193.

Abrego, F., A. Andriulo, C. Ferreyra, M. L. Galetto, J. Galina, C. Iurtia, R. Mon, F. Rimatori y C. Sasal .(1998). Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. II. Propiedades físicas. XVI° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Córdoba, Argentina, pp. 249-250.

Adams, J. E., Arkin, G. F., y Ritchie, J. T. (1976). Influence of Row Spacing and Straw Mulch on First Stage Drying 1. *Soil Science Society of America Journal*, 40(3), 436-442.

Ajwa, H. A., Trout, T., Mueller, J., Wilhelm, S., Nelson, S. D., Soppe, R., y Shatley, D. (2002). Application of alternative fumigants through drip irrigation systems. *Phytopathology*, 92(12), 1349-1355.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 298, 0.

Andriulo, A., M. L. Galetto, C. Sasal, F. Abrego, M. Bueno, F. Rimatori y M. A. de la Cruz. (2000). Efecto del riego complementario con aguas salino – sódicas sobre algunas propiedades edáficas en el sudoeste santafesino. XVII° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.

Aparicio, V. C., Barbacone, A., y Costa, J. L. (2014). Efecto de la calidad de agua para riego complementario sobre algunas propiedades químicas edáficas. *Ciencia del suelo*, 32(1).

Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., y Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838-1846.

Auge, M. P. (2005). Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. In *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata. pp. 293-311.

Barnes, H. R. 1988. Los problemas hidráulicos en la actividad agropecuaria y sus soluciones. En "El deterioro del ambiente en la Argentina". (1995) Cap. VIII. p. 253 – Ed. FECIC , Argentina. 497 pp.

Belmans, C., Wesseling, J. G., y Feddes, R. A. (1983). Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of hydrology*, 63(3-4), 271-286.

Bennett, J.M., J.W. Jones, B. Zur, y L.C. Hammond. (1986). Interactive effects of nitrogen and water stresses on water relations of field-grown corn leaves. *Agron. J.* 78:273–280.

Bongiovanni, R.; Barberis, N. y Simondi, J. M. (2011). Análisis económico del riego en Córdoba. En Miranda O. (Editor). *Estudios sociales del riego en la agricultura argentina*. (1 a Ed.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. Pp. 303-318.

Bongiovanni, R. (2012). Análisis económico del riego. 3º Reunión Internacional de Riego. Manfredi, Córdoba, Argentina: EEA INTA Manfredi. Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/3a-reunion-internacionalde-riego-inta-analisis-economico-del-riego>.

Boyer, C. N., Larson, J. A., Roberts, R. K., McClure, A. T., y Tyler, D. D. (2014). The impact of field size and energy cost on the profitability of supplemental corn irrigation. *Agricultural Systems*, 127, 61-69.

Bragachini, M., Cattani, P., Gallardo, M. y Peiretti, J. (2008). Forrajes conservados de alta calidad y aspectos relacionados al manejo nutricional. INTA-PRECOP II. Manual técnico N°6. I.S.S.N. 1667-9199

Bray, R. H., y Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*, 59(1), 39-46.

Brevik, E. C., Fenton, T. E., y Lazari, A. (2006). Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture*, 7(6), 393-404.

Buelink, D., Schaller, A., y Labriola, S. (1996). Principales cuencas lecheras argentinas. SAGPYA FAO.

CACF. Cámara Argentina de Contratistas Forrajeros. (2019). Costo del servicio de ensiladores en \$/Kg/MS. [www.ensiladores.com.ar](http://www.ensiladores.com.ar)

Camp, C. R. (1998). Subsurface drip irrigation: a review. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1353.

Cassman, K. G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 5952-5959.

Castignani, H. A. y Suero, M. M., (2013). El costo de los alimentos en los sistemas de producción de leche. Ficha técnica. Proyecto Lechero INTA. Economía, (27).

Cataldo, K. (2013). Valoración económica de la implementación de riego complementario en el partido de Pergamino (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Económicas. Universidad de Buenos Aires).

Cataldo, K. A. y Cabrini, S. A. (2014). Valoración económica de la implementación de riego complementario en el partido de Pergamino. *Revista de Investigación en Modelos Financieros*. Año 3, Vol. 1, pp. 35-50.

Cavero, J., Farre, I., Debaeke, P., y Faci, J. M. (2000). Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models.

Centeno A. (2013). Intensificación en el tambo: ¿Qué cambió?. Hoja de Información Técnica, INTA, N°33, 2250-8546.

Cortes Bello, C. A., Bernal Patino, J. G., Diaz Almanza, E. D., y Mendez Monroy, J. F. (2013). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Cordoba, Meta. Tolima y Valle del Cauca, Rome, Italy.

de Wit, C. T. (1958). Transpiration and crop yields, Institute of biological and chemical research of field crops and herbage, No. 64.6, Wageningen, the Netherlands.

del Amor, M. A., y del Amor, F. M. (2007). Response of tomato plants to deficit irrigation under surface or subsurface drip irrigation. *Journal of Applied Horticulture*, 9(2), 97-100. Camp, C. R. (1998). Subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1353

Diouf, J. (2003). Agriculture, food security and water: towards a blue revolution: growing enough food to feed the world depends on water supply. The challenge can be met, though there are conditions. *oecd Observer*, 21-23.

Doorenbos, J., y Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and drainage paper*, (33), 257.

Duttmann, R., Schwanebeck, M., Nolde, M., y Horn, R. (2014). Predicting soil compaction risks related to field traffic during silage maize harvest. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 408-421.

Evans, R. G., y Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water resources research*, 44(7).

Evelt, S. R., y Tolk, J. A. (2009). Introduction: Can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management?. *Agronomy Journal*, 101(3), 423-425.

Feddes, R. A. (1982). Simulation of field water use and crop yield (pp. 194-209). Pudoc.

Flores, C. C., Sarandón, S. S., y Lermanó, M. J. (2007). Eficiencia energética en sistemas hortícolas familiares del partido de La Plata, Buenos Aires, Argentina. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 2(1).

Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., y Mejía-Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de Maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*, 47(4), 347-359.

García, M. (2011). El Cinturón Hortícola Platense: ahogándonos en un mar de plásticos. Un ensayo acerca de la tecnología, el ambiente y la política. *Theomai*, (23).

García, J. M. (2016). Particularidades del acuífero Puelche en la región de La Plata. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP.

Génova, L., J. E. Marassi, M. Etcheverry y W. Chale. (1998) Optimización de la operación de riego complementario de cultivos extensivos en el Norte de Buenos Aires. Topografía, aguas y suelos. ISBN N° 950-34-0124-0. Balbuena, Benez y Jorajuría editores. Cong. Latinoam. de Ingeniería Rural CLIR '98. La Plata.

Génova, L. J. (2007) *Resiliencia a la degradación salina y sódica de algunos suelos pampeanos, regados complementariamente con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas*. 2007. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata.

Génova, L. (2012). Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata, 110(2), 63-81.

Génova, L. J., Andreau, R., y Etchevers, P. (2015). Desempeño de tres métodos de riego de maíz por surcos: caudal único, dos caudales y caudal discontinuo. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata, 113.

Grattan, S., Schwankl, L., y Lanini, W. (1988). Weed control by subsurface drip irrigation. California Agriculture, 42(3), 22-24.

Greaves, G. E., y Wang, Y. M. (2016). Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. Water, 8(12), 557.

Guida Daza, C., y Urquiza, B. (2009). Análisis de costo beneficio del cultivo de trigo. Campaña 2009/2010. Información para Extensión. EEA Marcos Juárez, (128).

Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., y Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal, 101(3), 488-498.

Howell, T.A., S.R. Evett, J.A. Tolk, A.D. Schneider, y J.L. Steiner. (1996). Evapotranspiration of corn—Southern high plains. p. 381–387. In C.R. Camp et al. (ed.) Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proc. of the Int. Conf., San Antonio, TX. 3–6 Nov. 1996. ASAE, Washington, DC.

Howell, T.A., J.A. Tolk, A.D. Schneider, and S.R. Evett. (1998). Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. Agron. J. 90:3–9.

Hurtado M. (2004). Estudio de suelos del partido de La Plata. Informe Final. Aportes al planeamiento ambiental y ordenamiento territorial. 153 p.

Infocampo. (2017). <https://www.infocampo.com.ar/el-riego-por-goteo-subterraneo-sorprende-por-sus-altos-rendimientos-en-cordoba/>

Ion, V., Dicu, G., Dumbravă, M. A. R. I. N., Temocico, G., Alecu, I. N., Basa, A. G., y State, D. (2015). Harvest index at maize in different growing conditions. Romanian Biotechnological Letters, 20(6), 10951.

Jensen, M. E. (2007). Beyond irrigation efficiency. Irrigation Science, 25(3), 233-245.

Jones, C. A. (1986). CERES-Maize; a simulation model of maize growth and development (No. 04; SB91. M2, J6.).

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., y Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 235-265.

Kaboosi, K., y Kaveh, F. (2012). Sensitivity analysis of FAO 33 crop water production function. *Irrigation science*, 30(2), 89-100.

Kassam, A. H. (1977). Net biomass production and yield of crops. FAO, Rome.

Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., y McLean, G. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 267-288.

Kjeldahl, J. (1883). A new method for the estimation of nitrogen in organic compounds. *Z. Anal. Chem*, 22(1), 366.

Lamm, F. R. (2002). Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. In *International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation*, Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands (p. 13)

Lamm, F. R., y Trooien, T. P. (2003). Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. *Irrigation Science*, 22(3-4), 195-200.

Lorite, G., y Vila. (2013). AquaData and Aqua GIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water limited yield with AquaCrop. *Computers & Electronics in Agriculture*, 96(6), 227.

Ma, L., G. Hoogenboom, L.R. Ahuja, J.C. Ascough, y S.A. Saseendran. (2006). Evaluation of the RZWQM-CERES-Maize hybrid model for maize production. *Agric. Syst.* 87:274–295.

Marcos Solorio, B., Martínez Campos, Á. R., López Urquidez, G. A., López Orona, C. A., y Arteaga Reyes, T. T. (2016). La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (*Zea mays*) como alternativa a la captura de carbono. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 361-367.

Marengo, A. I., Barberis, N. A., y Giletta, M. A. (2018). Análisis económico comparado de dos tecnologías de riego: por aspersión y por goteo. INTA.

Marino, Castignani, y Arzubi. (2011). Caracterización de los tambos pequeños en las cuencas lecheras pampeanas. INTA. *Publicación Técnica N° 61*, 0485-9057.

Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Warren, J., y Marek, G. (2019). Simulating Soil Water Content, Evapotranspiration, and Yield of Variably Irrigated Grain Sorghum Using AquaCrop. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 55(4), 976-993.

Mainali, B., Ngo, H. H., Guo, W. S., Pham, T. T. N., Wang, X. C., & Johnston, A. (2011). SWOT analysis to assist identification of the critical factors for the successful implementation of water reuse schemes. *Desalination and Water Treatment*, 32(1-3), 297-306.

Mebane, V. J., Day, R. L., Hamlett, J. M., Watson, J. E., & Roth, G. W. (2013). Validating the FAO AquaCrop model for rainfed maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal*, 105(2), 419-427.

Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., y Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (43).

Miles, E. (2016). Riego: el costo del mm. *Revista Márgenes Agropecuarios*, agosto de 2016, año 34, n° 374, pp. 28-29.

Mkhabela, M. S., y Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16-24.

Monteith, J. L. (1996). The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal*, 88(5), 695-697.

Moot, D. J., Jamieson, P. D., Henderson, A. L., Ford, M. A., y Porter, J. R. (1996). Rate of change in harvest index during grain-filling of wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 126(4), 387-395.

Morla, F. D., y Giayetto, O. (2012). Calibración y validación del modelo Aquacrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba. In XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata (RA).

Nogar, G., y Annessi, G. (2000). Incorporación de riego complementario en los sistemas de producción agrícola: Tecnología y medio ambiente. Estudio de caso en un distrito de la provincia de Buenos Aires (Argentina). In II Jornadas de Geografía de la UNLP 13 al 15 de septiembre de 2000 La Plata, Argentina.

O'Brien, D. M., Rogers, D. H., Lamm, F. R., & Clark, G. A. (1998). An economic comparison of subsurface drip and center pivot sprinkler irrigation systems. *Applied Engineering in Agriculture*, 14(4), 391-398.

Oliveira, E. C., Quartezani, W. Z., de Oliveira Neves, L., Aguiar, L. J. G., Fischer, G. R., Roberti, D. R., y da Costa, J. M. N. (2016). Evapotranspiration Soybean: Comparison between eddy covariance method and the estimate of CROPGRO-Soybean model. *Ciência e Natura*, 38, 28-33.

Olivera, N. T., Manrique, O. B., Masjuan, Y. G., y Alega, A. M. G. (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23-30.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., y Fereres, E. (2009). AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.

Rao, N. H., Sarma, P. B. S., y Chander, S. (1988). A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 13(1), 25-32.

R. A. P. A. L. (2010). Contaminación y eutrofización del agua. Impactos del modelo de agricultura industrial. Uruguay.

Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water resources research*, 8(5), 1204-1213.

Rosegrant, M. W., Ringler, C., y Zhu, T. (2009). Water for agriculture: maintaining food security under growing scarcity. *Annual review of Environment and resources*, 34, 205-222.

SAGyP. Secretaría Agricultura Ganadería y Pesca. (1997). La SAGyP y el riego complementario en la Región Pampeana, [www.sagyp.gov.ar](http://www.sagyp.gov.ar).

Sallah, A. H. M., Tychon, B., Piccard, I., Gobin, A., Van Hoolst, R., Djaby, B., y Wellens, J. (2019). Batch-processing of AquaCrop plug-in for rainfed maize using satellite derived Fractional Vegetation Cover data. *Agricultural water management*, 217, 346-355.

Sandhu, R., y Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687.

Schaible, G., y Aillery, M. (2012). Water conservation in irrigated agriculture: Trends and challenges in the face of emerging demands. *USDA-ERS Economic Information Bulletin*, (99).

Slabbers, P. J., Herrendorf, V. S., y Stapper, M. (1979). Evaluation of simplified water-crop yield models. *Agricultural Water Management*, 2(2), 95-129.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., y Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., y Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) spa no. 66.

Stöckle, C. O., Donatelli, M., y Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 289-307.

Uset, O. A., y Lazzaro, M. (2009). Reservas Forajeras. Informe Técnico N° 63. EEA Montecarlo.

Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., y Moreno, P. M. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*, 62, 351-360.

Vázquez, M., Millán, G., y Gelati, P. (2006). Efecto del riego complementario sobre la salinidad y sodicidad de diferentes suelos del NO y Centro-E de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, la Plata*, 106(1), 57-67.

Villalobos, F. J., y Fereres, E. (1990). Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agronomy Journal*, 82(6), 1153-1159.

Vories, E. D., Tacker, P. L., Lancaster, S. W., y Glover, R. E. (2009). Subsurface drip irrigation of corn in the United States Mid-South. *Agricultural Water Management*, 96(6), 912-916.

Wang, L., Wu, J., Li, Q., Gu, J., & Xue, H. (2015). A review on the research and application of AquaCrop model. *Advances in Earth Science*, 30(10), 1100-1106.

Wanjura, D. F., y Upchurch, D. R. (2000). Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *Transactions of the ASAE*, 43(4), 867.

Yang, H. S., Dobermann, A., Lindquist, J. L., Walters, D. T., Arkebauer, T. J., y Cassman, K. G. (2004). Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*, 87(2-3), 131-154.

Zelege, K. T. (2019). AquaCrop calibration and validation for faba bean (*Vicia faba* L.) under different agronomic managements. *Agronomy*, 9(6), 320.

Zwart, S. J., y Bastiaanssen, W. G. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural water management*, 69(2), 115-133.



## Anexos

**Tabla anexo 1.** Bibliografía asociada al modelo AquaCrop. Datos de las publicaciones más relevantes y resumen de la información contenida en las publicaciones.

Año	Primer autor	Título	Revista/publicación	País	Resumen
2009	Heng L. K.	Validating the FAO AquaCrop Model for irrigated and water deficient field maize	Agronomy Journal	EE UU y España	Utiliza parámetros conservativos validados para maíz para evaluar la performance de AquaCrop en la simulación cultivos en España y Estados Unidos. El desempeño del modelo fue bueno, principalmente en condiciones de suficiencia hídrica y estrés hídrico leve. En base a los resultados considera a AquaCrop una herramienta valiosa.
2009	Steduto P.	AquaCrop – The FAO Crop Model to simulate yield response to water. concepts and underlying principles	Agronomy Journal	Italia	Describe la mecánica del funcionamiento del AquaCrop, con sus particularidades, limitaciones y funcionalidades. Incluye ejemplos de diferentes comportamientos posibles para diferentes cultivos y condiciones.
2009	Raes D.	AquaCrop – The FAO Crop Model to simulate yield response to water. Main algorithms and software description	Agronomy Journal	Bélgica	Describe los procedimientos matemáticos que subyacen al funcionamiento del modelo y su expresión en la interfaz del software.
2010	Araya A.	Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficit and irrigated barley	Agricultural Water Management	Etiopía	El artículo se sitúa en Etiopía, zona de escasez de agua. Busca encontrar puntos de máxima eficiencia de aprovechamiento de agua usando AquaCrop y combinando

					diferentes fechas de siembra y ofertas hídricas.
2012	Morla F. D.	Calibración y validación del modelo AquaCrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba.	XIX Congreso Latinoamericano de Ciencias del Suelo	Argentina	Calibran, validan y analizan la sensibilidad del modelo AquaCrop para cultivos de trigo, maíz y soja en Río Cuarto, Argentina. Concluyen que el modelo es apropiado para predecir comportamiento de cultivos en función de la oferta hídrica.
2012	Mkhabela M. S.	Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in western Canada	Agricultural Water Management	Canadá	Usa AquaCrop para simular rendimiento del cultivo de trigo y acumulación de agua en el perfil en Canadá. Concluye que el modelo es capaz de simular de forma aceptable ambos valores.
2013	Flores Gallardo H.	Simulación del rendimiento de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop	Agrociencia	México	Frente a las variaciones cada vez mayores de las precipitaciones, evalúan la pertinencia de utilizar AquaCrop para modelar el cultivo de maíz en Sinaloa. Llegan a la conclusión de que el modelo permite simular apropiadamente la respuesta del rendimiento a la oferta hídrica.
2013	Lorite I. J.	AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water limited yield with AquaCrop	Computers and Electronics in Agriculture	Holanda	Generan dos herramientas denominadas AquaData y AquaGIS para facilitar la aplicación de AquaCrop a análisis desarrollados sobre grandes superficies y espacios temporales, obteniendo resultados positivos en términos de la reducción de horas de trabajo que requerirían dichos análisis.

2013	Cortés Bello C. A.	Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los Departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca	FAO	Colombia	Trabajo realizado por FAO en colaboración y a pedido de organismos gubernamentales de Colombia. Adaptan y validan AquaCrop para cultivos de importancia económica en zonas estratégicas de Colombia. El modelo se aplicará al estudio del impacto del cambio climático en las producciones.
2014	Vanuytrecht E.	AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model	Environmental Modelling and Software	Bélgica	Describe el funcionamiento del modelo AquaCrop desde una perspectiva de análisis del software.
2016	Olivera N. T.	Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation	Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias	Cuba	Se evalúa la simulación realizada con AquaCrop para cultivo de poroto en Cuba. Obtienen buena correlación entre los resultados simulados y observados para la simulación de humedad del suelo, biomasa y cobertura foliar.
2016	Greaves G. E.	Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment	Water	Taiwan	Evalúan la pertinencia del modelo AquaCrop para modelar diferentes parámetros del cultivo de maíz en el trópico. El modelo fue capaz de brindar datos con buena correlación con los datos observados para condiciones de suficiencia hídrica y estrés hídrico moderado. Pero la correlación no fue satisfactoria en condiciones de déficit hídrico intenso.
2019	Abdalhi M. A. M.	FAO AquaCrop Model Performance: in Green canopy cover, soil moisture and production of maize at	Russian Agricultural Sciences	China	Evalúan la pertinencia de AquaCrop para modelar diferentes parámetros de cultivos de maíz bajo riego por goteo. Obtienen un buen ajuste entre el modelo y los datos observados para condiciones de suficiencia

		middle and lower reaches plain of Yungtze River of China			hídrica y déficit hídrico moderado. Mientras que el modelo no fue capaz de lograr un buen ajuste para condiciones de exceso hídrico y déficit hídrico severo.
2019	Abarca Jaramillo A. L.	Aplicación del modelo AquaCrop para la simulación del rendimiento agrícola del maíz duro en la región costa de Ecuador	Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental EPN (Tesis de grado)	Ecuador	En esta tesis se valida y calibra el modelo AquaCrop en base a datos experimentales y datos históricos para el cultivo de maíz duro en la región Costa de Ecuador, tanto para el ciclo de cultivo denominado seco, como para el ciclo húmedo.
2019	Zelege K. T.	AquaCrop calibration and validation for faba bean ( <i>Vicia faba</i> L.) under different agronomic Managements	Agronomy	Australia	Evalúan el modelo AquaCrop para modelar rendimiento y otros parámetros del cultivo de habas en región semiárida de Australia, obteniendo un buen ajuste entre los resultados del modelo y los datos experimentales obtenidos de dos campañas.
2019	Masasi B.	Simulating soil water content, evapotranspiration, and yield of variably irrigated grain sorghum using AquaCrop	Journal of the American Water Resources Association	Estados Unidos	Evalúa la efectividad de AquaCrop como herramienta para modelar rendimiento y otros parámetros del cultivo de sorgo bajo diferentes disponibilidades hídricas, densidades de siembra y fechas de siembra, obteniendo un buen ajuste entre los datos obtenidos experimentalmente y la simulación.
2019	Sandhu R.	Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and	Agricultural Water Management	Estados Unidos	Se evalúa con qué grado de certeza el modelo AquaCrop es capaz de simular el rendimiento, biomasa y Et del cultivo de maíz bajo diferentes condiciones hídricas.

		evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation			Concluyen que el modelo es capaz de simular con un ajuste aceptable todos estos factores, aunque el ajuste se reduce en condiciones de exceso o déficit hídrico, y en condiciones de elevada demanda evapotranspirativa.
2019	Sallah A. H. M.	Batch-processing of AquaCrop plug-in for rainfed maize using satellite derived fractional vegetation cover data	Agricultural Water Management	Bélgica	A fin de poder aplicar el modelo AquaCrop a escalas espaciales mayores, evalúan la correlación entre datos obtenidos experimentalmente en una serie de tres años de trabajo a campo, y la simulación generada por AquaCrop a partir de imágenes satelitales de fracción de cobertura vegetal obteniendo un buen ajuste.

**Tabla anexo 2.** Bibliografía asociada al maíz y su interacción con la oferta hídrica y el modelado del cultivo. Contiene las publicaciones más relevantes y un resumen de la información contenida en las publicaciones.

Año	Primer autor	Título	Revista/publicación	País	Resumen
1986	Jones J. W.	CERES-Maize; a simulation model of maize growth and development	Texas University Press (Libro)	Estados Unidos	En este libro, se describe el modelo CERES para la simulación del cultivo de maíz. Los parámetros incluidos, la mecánica del modelo y los alcances y limitaciones del mismo para diferentes condiciones de cultivo.
2009	Vories E. D.	Subsurface drip irrigation of corn in the United States Mid-South	Agricultural Water Management	Estados Unidos	Estudian el desempeño del Sistema de riego por goteo enterrado en el cultivo de maíz en zonas aptas para el cultivo de maíz en condiciones de secano. Obtienen buenas respuestas al riego, particularmente en los años menos lluviosos como era de esperarse.
2014	Boyer C. N.	The impact of field size and energy cost on the profitability of supplemental corn irrigation	Agricultural Systems	Estados Unidos	Evalúan la factibilidad económica de aplicar riego en cultivos de maíz en zona húmeda, obteniendo como resultado que es rentable para superficies mayores a 51 ha. en las condiciones del ensayo.
2015	Ion V.	Harvest Index at maize in different growing conditions	Romanian Biotechnological Letters	Rumania	Evalúan la variación del índice de cosecha en función de diferentes condiciones ambientales y diferentes prácticas agronómicas, para diferentes híbridos de maíz obteniendo índices entre 0,3 y 0,5.
2016	Marcos B.	La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo ( <i>Zea</i>	Revista internacional de Contaminación Ambiental	México	Evalúan la capacidad de diferentes variedades nativas de maíz, cultivadas en ambientes de montaña, valle y planicie, en

*mays*) como alternativa  
a la captura de carbono

relación a su capacidad de fijar carbono.  
Concluyen que estas variedades de maíz  
pueden considerarse aptas como  
herramienta de fijación.

**Tabla anexo 3.** Bibliografía asociada a la interpretación de factores climáticos y fisiológicos que influyen en el proceso de modelado de cultivos. Contiene las publicaciones más relevantes y un resumen de la información contenida en las publicaciones.

Año	Primer autor	Título	Revista/publicación	País	Resumen
1958	de Wit C. T.	Transpiration and crop yields	Institute of Biological Chemistry Research on Field Crops and Herbage	Holanda	En este libro se sientan las bases para la interpretación fisiológica de la evaporación en las plantas, su relación con la captación de nutrientes, el rol que los diferentes órganos desempeñan en la misma y la relación con la productividad de los cultivos, además de los fundamentos físicos que hacen a la interpretación de este proceso.
1972	Ritchie J. T.	Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover	Water Resources Research	EE UU	Este trabajo presenta un modelo para la estimación de la evaporación de cultivos en instancias tempranas del desarrollo (lo que actualmente definimos como evapotranspiración). Establecen relaciones entre los factores agronómicos, ambientales y fisiológicos para la interpretación, que posteriormente serán profundizados.
1976	Adams, J. E.	Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying	Soil Science Society of American Journal	EE UU	Analiza la relación entre el marco de plantación y la presencia del mulching con la evaporación (hoy denominada evapotranspiración) del cultivo. Proponen un modelo que permite calcular la misma y aportando criterios en torno a la importancia del aprovechamiento del sombreado del suelo por el canopeo, y la cobertura del suelo

					con mulching para mejorar la eficiencia del uso del agua en el suelo.
1978	Feddes R. A.	Simulation of field water use and crop yield.	Pudoc (Capítulo libro)	Holanda	Propone un modelo para simular rendimiento de cultivo que presenta características novedosas, como son la reducción de los intervalos de simulación y la incorporación de la influencia de agua freática al alcance de las raíces.
1979	Doorenbos J.	Yield response to water	Irrigation and Drainage, Paper 33 FAO	Italia	Propone un modelo que a partir de la función de productividad del agua y un coeficiente para el cultivo, permite simular la productividad.
1983	Belmans C.	Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE.	Journal of Hidrology	Holanda	Presenta un modelo matemático para simular el balance de agua en un perfil de suelo bajo cultivo, definiendo los límites del Sistema, los flujos y las interacciones para condiciones insaturadas y saturadas.
1988	Rao N. H.	A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture	Agricultural Water Management	India	Hace una revisión de las diferentes interpretaciones realizadas hasta el momento de la función de productividad del agua. Evalúa la incorporación que hace Doorenbos (1979) de la misma a un modelo de simulación de rendimiento y propone un modelo alternativo.
1990	Villalobos F. J.	Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies.	Agronomy Journal	España	Desarrollan una medición minuciosa de los procesos de evapotranspiración en maíz, algodón y girasol, utilizando lisímetros y balances hídricos y establecen relaciones

					entre aspectos fisiológicos y ambientales y la evapotranspiración.
1996	Moot D. J.	Rate of change in harvest index during grain-filling of wheat	The Journal of Agricultural Science	Canadá	Evalúan cómo diferentes aspectos del cultivo, como la irrigación, el nivel de nitrógeno, la fecha de siembra, la temperatura y el CO <sub>2</sub> impactan sobre el índice de cosecha, a fin de mejorar la interpretación que se hace del mismo en los modelos.
1996	Monteith J. L.	The quest of balance in crop modelling	Agronomy journal	Reino Unido	Hace una reflexión sobre el uso de modelos matemáticos para el cálculo de balances y la simulación de cultivos. Describe los modelos de diferentes orígenes, cuestiona el uso irracional de los modelos y señala la necesidad de avanzar hacia modelos más robustos y transparentes.
1998	Allen R. G.	Crop Evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements	Irrigation and Drainage	Italia	Profundiza la interpretación del proceso de evapotranspiración, enmarcando la fórmula de Penman-Monteith en la interpretación física y fisiológica de sus principios y brindando criterios y herramientas para su correcto uso tanto en investigación como en producción.
2003	Jones J. W.	The DSSAT cropping system model	European Journal of Agronomy	Estados Unidos	Describe ciertas problemáticas emergentes del uso del modelo de simulación de cultivo DSSAT, y propone una renovación del mismo para facilitar el uso con diferentes objetivos científicos. Ordena los inputs en módulos: suelo, cultivo, clima y manejo. Este

					criterio fue posteriormente incorporado de forma similar en AquaCrop.
2004	Zwart S. J.	Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize	Agricultural Water Management	Holanda	Review que analiza la información publicada en 84 trabajos científicos sobre la productividad del agua en el cultivo (CWP), un elemento central en el modelado de AquaCrop. Define rangos observados para los valores de CWP y los componentes del sistema a los que se asocia su variación.
2009	Evelt S. R.	Can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management	Agronomy Journal	Estados Unidos	Analiza el desempeño de diferentes modelos utilizados para calcular la eficiencia del uso del agua por parte de los cultivos, en diferentes condiciones ambientales y para diferentes cultivos de importancia económica, buscando profundizar el conocimiento del comportamiento de los cultivos en este aspecto con el objetivo de aportar soluciones a escenarios de escasez del recurso agua.
2012	Kaboosi K.	Sensitivity analysis of FAO 33 crop water production function	Irrigation Science	Irán	Analiza la sensibilidad del método 33 de la FAO, en su versión original Doorenbos (1979) y las modificaciones incluidas por Rao (1988). Evalúa el impacto de sub y sobreestimaciones de las evapotranspiraciones reales y potenciales, y del coeficiente de cultivo para ambos métodos.
2012	Steduto P.	Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua	FAO	Italia	Profundiza los conceptos que relacionan la oferta hídrica con la productividad de los cultivos, detalla cómo son incluidos en el

modelo AquaCrop, da criterios de uso del modelo y profundiza en las particularidades de un gran número de cultivos herbáceos y leñosos.