



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE DE *Medicago sativa* L. A
PARTIR DE VARIABLES CLIMÁTICAS Y EDÁFICAS; Y DESARROLLO DE UN
ÍNDICE DE VALORACIÓN FORRAJERO, EN LA REGIÓN PAMPEANA
ARGENTINA**

BEATRIZ MARTÍN

DOCTORANDO

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

ALEJANDRA SILVIA CORONEL

DIRECTOR

MÓNICA BENITA SACIDO

CO- DIRECTOR

2020

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE DE *Medicago sativa* L. A PARTIR DE
VARIABLES CLIMÁTICAS Y EDÁFICAS; Y DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE
VALORACIÓN FORRAJERO, EN LA REGIÓN PAMPEANA ARGENTINA**

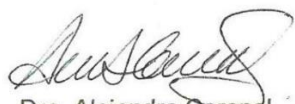
BEATRIZ MARTÍN

Ingeniera Agrónoma MSc, Facultad de Ciencias Agrarias, UNR

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR, durante el período comprendido entre agosto de 2015 a diciembre de 2019, bajo la dirección de la Dra. Alejandra Coronel.



Ing. Agr. Beatriz Martín
-Doctorando-



Dra. Alejandra Coronel
-Directora-



Dra. Mónica Sacido
-Codirectora-

Defendida:de 20__.

Agradecimientos

Todo el desarrollo y la culminación de las distintas actividades realizadas en el marco del doctorado que se resumen en el presente trabajo de tesis, fue posible gracias al desempeño, ayuda y colaboración de muchas personas entre las que quiero destacar:

En primer lugar a mi directora de tesis, Alejandra Coronel, por su ayuda, dedicación y asesoramiento. La generosidad y amabilidad demostrada en cada momento, han sido de gran apoyo durante todo el tiempo dedicado a la realización de la tesis.

Gracias a mi co-directora, Mónica Sacido por aceptar guiarme en esta etapa de mi formación, enriqueciendo este trabajo.

Gracias a todos los integrantes de la cátedra de Forrajes, por su afecto y ayuda durante toda esta etapa, en especial a mi amigo, Andrés Galleano, por apoyarme en todo momento y decisión.

Destaco la colaboración de mis amigas Marta Costanzo y Verónica Anibalini, por estar dispuestas a discutir ideas y resultados, y/o facilitarme información.

Gracias a la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR por otorgarme los tiempos necesarios para la realización de este trabajo.

¡Muchas gracias a todos!

Dedicatorias

a Rubén y Eva,

a mi padre en su memoria.....

Publicaciones y Presentaciones a Congresos

Presentaciones a Congresos:

*Martin, B; Sacido, M; Coronel A 2016. Evolución histórica de la producción forrajera de *Medicago sativa* L. en la región pampeana. X Jornada de Ciencia y Tecnología de la UNR. Rosario. 26 de octubre de 2016, Sede de Gobierno de la UNR, Rosario.

*Martín, B.; Coronel, A.^{*ec-aequo}; Galleano, A.; Karl, P. 2017. Evaluación de cultivares de *Medicago sativa* L. en la localidad de Marcos Juárez. Presentado para el XIX Congreso y XXXVII Reunión Anual de la Sociedad de Biología de Rosario (libro de resúmenes).

*Martín, B., Coronel, A., Sacido M. y Galleano, A. 2018. Análisis del comportamiento de cultivares comerciales de alfalfa en la región pampeana. III Reunión Transdisciplinar en CIENCIAS AGROPECUARIAS 2018. .XIX Jornadas de Divulgación Técnico-Científicas- VI Jornada Latinoamericana-IV Jornada de Ciencia y tecnología. 2018

*Martín, B.; Coronel, A. 2018. Impacto del ENOS sobre las producciones de biomasa aérea de alfalfa en la región Pampeana Argentina. CONGREMET XIII (ROSARIO- 2018)- aceptado.

*Martín, B., Coronel, A. y Galleano, A. 2018. Análisis del comportamiento de cultivares comerciales de alfalfa en Marcos Juárez, Córdoba. XII Jornada de Ciencia y Tecnología. 17 y 18 de octubre de 2018 - Sede de Gobierno.

*Martín, B.; Coronel, A, y Costanzo, M. 2019. Productividad forrajera y uso consuntivo en alfalfa en la localidad de Marcos Juárez. XX Jornadas de Divulgación Técnico-Científicas 2019. Facultad de Ciencias Veterinarias. VII Jornada Latinoamericana yV Jornadas de Ciencia y Tecnología 2019. Facultad de Ciencias Agrarias. IV Reunión Transdisciplinaria en Ciencias Agropecuarias 2019, Universidad Nacional de Rosario. Casilda y Zavalla, 11 y 12 de diciembre de 2019.

*Martín, B.; Coronel, A. y Sacido, M. 2019. Calibración y validación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Congreso de la Asoc. Argentina de Producción Animal – RAPA Vol. xy, Supl. 1

*Martín, B.; Coronel, A. y Sacido, M. 2019. Análisis del comportamiento de cultivares comerciales de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la región pampeana húmeda-subhúmeda de argentina. Congreso de la Asoc. Argentina de Producción Animal – RAPA Vol. xy, Supl. 1

* Sacido, M.; Martín, B. and Coronel, A. 2020. Simulation With Aquacrop Of The Consumptive Use Of Water In Alfalfa, In The Pampean Region Of Argentina. The Joint XXIV IGC and XI IRC Congress 2020. Sustainable Use of Grassland and Rangeland Resources for Improved Livelihoods 24th -30th October 2020. (aceptado)

Publicaciones en Libros y Revistas

* Martin, B.; Sacido, M. y Coronel, A. 2016. Evolución histórica de la producción forrajera de *Medicago sativa* L. en la Región Pampeana Ciencia y Tecnología. Divulgación de la Producción Científica y Tecnológica de la UNR. CyT2016. Capítulo Sección Ciencias Agrarias y Veterinaria Rosario 1ra ed.UNR. Editora. Editorial de la Universidad nacional de Rosario. ISBN 978-950-673-987-4- 2037 pp. Capítulo Ingeniería Agronómica y Veterinaria

* Martín, B.; Coronel, A.^{*ec-aequo}; Galleano, A.; Karl, P. 1918. Evaluation of cultivars of *Medicago sativa* L. in the locality of Marcos Juárez, Santa Fe. BIOCELL 42 (suppl. 4), 2018.

* Martín B, Coronel A; Galleano A. 2018. Análisis del comportamiento de cultivares comerciales de alfalfa en Marcos Juárez, Córdoba. Ciencia y Tecnología 2018: divulgación de la producción científica y tecnológica de la UNR. Cap 2: 344-347 / Lucía Bulacio; Claudio Pairoba; Elena Orellano. - 1a ed. Rosario. UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario, 2019.

* Martín, B.; Coronel, A. y Sacido, M. 2019. *Medicago sativa* en la región pampeana húmeda. Ocho lustros de historia. Journal UNR. Ciencias Agropecuarias. Año 12. Vol.01. Noviembre 2019. 15 p

Artículo de divulgación

Andrés Galleano; Beatriz Martín; Miglioratti, M. y Mónica Sacido. 2017. Panorama de las variedades de alfalfa comercializadas en la Argentina. AGROMENSAJES – Diciembre 2017: 31 – 33.



INICIO

Índice- Abreviaturas y Símbolos

Índice

	Páginas
- Abreviaturas y Símbolos	1-2
- Resumen	4-5
- Abstract	6-7
-Descripción general	9-11
1- Introducción	13-20
2- <i>Objetivos principales e Hipótesis</i>	22
2-1- <i>Objetivos específicos e hipótesis</i>	23-24
3- Materiales	
3-1- <i>Localización regional del área de estudio</i>	26
3-2- <i>Composición de la base de datos utilizada</i>	26
3-2-1- Información climática de la zona de estudio	26-27
3-2-2- Características de los suelos de la zona de estudio	28
3-2-3- Información de la Red de Evaluación de cultivares de alfalfa de INTA	28-29
3-3- <i>Programas estadísticos</i>	29-30
4- Métodos	
4-1- <i>Análisis agroclimático</i>	30-31
4-2- <i>Relación estadística entre producción de biomasa y variables agroclimáticas</i>	31
4-3- <i>Análisis de la variabilidad anual, estacional y espacial de la MS</i>	31
4-4- <i>Modelo AQUACROP</i>	31-32
4-4-1- Módulo de clima	32-33
4-4-1-1- <i>Cálculo de evapotranspiración de referencia (ET_o)</i>	33
4-4-2- Módulo de manejo de cultivo	
4-4-2-1- <i>Riegos</i>	33
4-4-2-2- <i>Prácticas agrícolas</i>	33-34
4-4-3- Módulo suelo	34
4-4-4- Módulo Napa freática	34
4-4-5- Módulo Cultivo	34-36
4-4-5-1- <i>Cobertura máxima del dosel verde, CC (%)</i>	37
4-4-5-2- <i>Días a la cobertura máxima del dosel (máx CC)</i>	37
4-4-5-3- <i>Índice de cosecha (HI)</i>	37
4-4-5-4- <i>Umbrales de temperatura del aire</i>	37-38
4-4-5-5- <i>Temperaturas Base (T_b)</i>	38-40
4-4-5-6- <i>Duración del ciclo (crecimiento acumulado de la biomasa)</i>	40
4-4-5-7- <i>Profundidad efectiva de las raíces de alfalfa (Z_e)</i>	40-41
4-4-5-8- <i>Evapotranspiración (ET)</i>	

4-4-8-8-1- <i>Coeficiente de evaporación del suelo (Ke)</i>	41
4-4-8-8-2- <i>Coeficiente de transpiración de la especie (Kc)</i>	41-42
4-4-5-9- <i>Productividad hídrica del cultivo normalizada (WP*)</i>	42-43
4-4-5-10- <i>Estrés</i>	43
4-4-5-11- <i>Salinidad</i>	43-44
4-5-6- <i>Módulo de condiciones iniciales</i>	44-45
4-5-7- <i>Proceso de calibración del modelo Aquacrop</i>	45-47
4-5-8- <i>Proceso de validación del modelo Aquacrop</i>	47
4-5-9- <i>Indicadores estadísticos en la calibración y validación del modelo AquaCrop</i>	47-48
4-5-9-1- <i>Coeficiente de determinación (R^2)</i>	48
4-5-9-2- <i>Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)</i>	48
4-5-9-3- <i>Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE)</i>	48-49
4-5-9-4- <i>Eficiencia del Modelo de Nash-Sutcliffe (EF)</i>	49
4-5-9-5- <i>Índice de agregación de Willmott o estadístico “d”</i>	49
4-5-10- <i>Simulación de otras condiciones hídricas para evaluar la presencia o ausencia de napa freática</i>	49-50
4-5-11- <i>Comportamiento del modelo respecto a la eficiencia en el uso del agua</i>	50
4-6- <i>ÍNDICE DE VALORACIÓN DE LOS CULTIVARES (Iv)</i>	
4-6-1- <i>Tipo de información de la producción de biomasa aérea que proveerá al Índice de valoración</i>	50-51
4-6-2- <i>Construcción del Índice de valoración</i>	51-52
4-6-4- <i>Evaluación del Iv</i>	52
5- Resultados	
5-1- <i>Análisis agroclimático</i>	54-59
5-2 <i>Relaciones entre cortes de biomasa aérea forrajera y cada variable agroclimática</i>	59-62
5-3- <i>Generalidades del comportamiento productivo en el sector en estudio</i>	63
5-3-1- <i>Distribución de la producción anual de alfalfa</i>	63-64
5-3-2- <i>Distribución de la producción anual de alfalfa por año del ciclo total</i>	64-65
5-3-3 <i>Distribución estacional de la producción de alfalfa</i>	65
5-3-4 <i>Distribución estacional de la duración entre cortes</i>	65-67
5-4 <i>Modelo AquaCrop: Módulo Cultivo: cálculo y/o determinación de los parámetros</i>	67
5-4-1- <i>Cobertura inicial del dosel (CD₀)</i>	67-68
5-4-2- <i>Cobertura máxima del dosel verde, CC (%)</i>	68-70
5-4-3- <i>Índice de cosecha (HI)</i>	70
5-4-4- <i>Temperatura base (Tb)</i>	70-71

5-4-5- Evaporación (Ke)	71
5-4-6- Estrés	71-72
5-5 <i>Condiciones iniciales o previas a la simulación</i>	72-73
5-6 <i>Generación de las variables de cultivo y parámetros para AquaCrop</i>	73-75
5-7 <i>Calibración</i>	75-79
5-8 <i>Validación</i>	79-82
5-9 <i>Productividad forrajera de alfalfa</i>	
5-9-1- Producción de biomasa aérea y brecha de rendimientos	82-83
5-9-2- Comportamiento del modelo AquaCrop considerando los niveles de la napa freática	84-87
5-9-3- Eficiencia del uso del agua en alfalfa (EUA) obtenida por el modelo AquaCrop	88-89
5-10 <i>Índice de valoración de cultivares (Iv)</i>	89-96
6- Discusión	98-99
6-1 <i>Calibración y validación de Aqua Crop en alfalfa.</i>	99-104
6-2 <i>Variabilidad espacial e interanual de las productividades, condiciones edafoclimáticas y modelo AquaCrop.</i>	104-110
6-3 <i>Desempeño de AquaCrop. Brechas en las producciones potenciales y en las producciones alcanzables.</i>	110-118
6-4 <i>Comportamiento del modelo AquaCrop considerando los niveles de la napa freática</i>	118-120
6-5 <i>Eficiencia del uso del agua en alfalfa (EUA)</i>	121-128
6-6 <i>Índice de valoración de cultivares (Iv)</i>	128-131
7- Conclusiones	133-134
8- Consideraciones	135-136
9- Bibliografía	138-160
Anexo	162-170

Abreviaturas y Símbolos

	Símbolo	Unidades
Capacidad de campo	CC	$\text{cm}^3_{\text{H}_2\text{O}} \text{cm}^{-3}_{\text{Suelo}}$
Cobertura inicial del dosel	CD_0	%
Cobertura máxima del dosel verde	CC	%
Coeficiente de determinación	R^2	adimensional
Coeficiente de estrés	Ks	adimensional
Coeficiente de variación	CV	%
Componentes principales (CP).	CP	adimensional
Conductividad hidráulica saturada	$K\phi$	m/s
Cultivares	cv	adimensional
Curva Número	CN	adimensional
Días a la cobertura máxima del dosel	máx CC	días
Eficiencia del uso de agua	EUA	kg de MS m^{-3}
Evaporación del suelo	Ke	mm día^{-1}
Evapotranspiración	ET	mm día^{-1}
Evapotranspiración de referencia	ET_0	mm día^{-1}
Fracción porcentual del agua disponible total en el suelo	TAW	%
Grado de latencia	GL	$^{\circ}\text{C}$
Grados días de crecimiento acumulado	GDA	$^{\circ}\text{C}$
Índice de Área Foliar	IAF	$\text{m}^2 (\text{área foliar}) \text{m}^{-2}$ (superficie del suelo)
Heliofanía efectiva	Hef	hs
Humedad a capacidad de campo	HCC	mm cm^{-3} suelo
Humedad relativa	Hr	%
Índice de agregación de Willmott	“d”	adimensional
Índice de cosecha	HI	%
Índice de valoración	Iv	adimensional
Coeficiente del cultivo	Kc	adimensional

Conductividad eléctrica promedio del extracto de suelo saturado	ECe	dS m ⁻¹
Máxima cobertura aérea	CC _{máx}	%
Napa freática	NF	m
Precipitación	P	mm
Primavera-verano	P-V	meses
Producción estimada	PE	Mg de MS ha ⁻¹
Producción observada	PO	Mg de MS ha ⁻¹
Producción de materia seca	MS	Mg de MS ha ⁻¹
Producción potencial	PP	Mg de MS ha ⁻¹
Profundidad efectiva de las raíces de alfalfa	Ze	cm
Punto de marchitez permanente	PMP	bares
Saturación	S	cm ³ poros con H ₂ O/cm ³ Suelo
Raíz del Error Cuadrático Medio	RMSE	adimensional
Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado	NRMSE	adimensional
Otoño-invierno	O-I	meses
Saturación del suelo	S	% (Vol poros con agua/Vol suelo)
Temperatura máxima	T _{máx}	°C
Temperatura mínima	T _{mín}	°C
Temperaturas Base	T _b	°C
Textura del suelo	Tex	adimensional
Transpiración de la especie	Kc	mm día ⁻¹
Velocidad media del viento	Vv	Km h ⁻¹
Productividad hídrica del cultivo normalizada	WP*	g biomasa .m ⁻² mm ⁻¹
Productividad hídrica del cultivo normalizada ajustada	WP* <i>ajust</i>	Kg biomasa.m ⁻² . mm ⁻¹



RESUMEN Y ABSTRACT

Resumen

En esta tesis se utilizó el modelo AquaCrop (FAO) con el objetivo de analizar las relaciones entre las variables edafoclimáticas y la dinámica estacional e interanual de la producción de *Medicago sativa* L. en diversas localidades de la ecorregión pampeana argentina, no existiendo trabajos precedentes de calibración del mismo en alfalfa. Así también se desarrolló un Índice de valoración forrajero para la clasificación de cultivares en la región, en función de sus resistencias genéticas a plagas y enfermedades. Se utilizó información de la Red de evaluación de cultivares de alfalfa de INTA para los grupos de latencia corta (8-10) de los cortes que ocurrieron en los tres primeros ciclos de producción de la especie durante el período 2000-2018 para Marcos Juárez, Manfredi, Rafaela, Paraná y Concepción del Uruguay. Los cortes fueron agrupados en dos estaciones de crecimiento relacionadas a períodos de mayor (septiembre a febrero) y menor (marzo a agosto) crecimiento de forraje, y según condiciones de déficit, excesos o normalidad de las precipitaciones. El modelo AquaCrop permite estimar la biomasa de un cultivo a partir del agua evapotranspirada. Los parámetros del módulo cultivo no estaban disponibles para alfalfa, por lo que se utilizó fuentes bibliográficas para definir las y/o estimarlas, lo que constituye a nivel mundial un avance significativo del modelo. Su trascendencia radica en el análisis de cada parámetro para ser considerado en futuros ensayos a campo en pos de mejorar las calibraciones, ya que algunas de esas variables han quedado como rangos en el proceso de calibración. El modelo fue calibrado con 72 cortes por localidad (2000-2014) y validado con los cortes de 2015-2018. La variabilidad regional, interanual y interestacional de alfalfa fue bien ajustada por el modelo de acuerdo a los indicadores estadísticos. A partir de las variables edafoclimáticas, los parámetros conservativos y no conservativos del cultivo, los componentes del balance hídrico, en especial la incidencia de la napa freática, y la ocurrencia de diferentes estreses se ha podido establecer las posibles causas de estas variabilidades, mostrando la complejidad del sistema suelo-clima-planta. Se analizaron los valores de biomasa en condiciones de óptimos y brechas a ese óptimo y la eficiencia del uso del agua, en condiciones de déficit y excesos de precipitación. Se observaron en la mayoría de los casos, altas brechas de rendimientos entre las producciones potenciales y las observadas en los cortes de la Red, variando dicha brecha entre un 30% y un 85%. La eficiencia en el uso del agua en alfalfa presentó valores que fluctuaron de acuerdo a las estaciones de crecimiento y condiciones de precipitación contrastantes. La mayor eficiencia en el uso del agua fue lograda en Marcos Juárez en los períodos secos de crecimiento de otoño-invierno con $3,59 \text{ kg MS m}^{-3}$,

valor que superó significativamente al resto de las localidades. La localidad de Concepción del Uruguay mostró las menores eficiencias ($<2 \text{ kg MS m}^{-3}$). La utilización del modelo fue una herramienta integradora de los diferentes procesos involucrados en el crecimiento y en la formación del rendimiento de la alfalfa, y permitió identificar las relaciones edafoclimáticas que dan respuestas a las brechas a las producciones potenciales y a la eficiencia del uso de agua en la especie. En un segundo aspecto del trabajo y para analizar la contribución relativa del mejoramiento genético en cultivares de latencia corta (8-10), respecto a resistencias a plagas y enfermedades, se construye un Índice de valoración para agrupar los cultivares según sus cualidades de resistencia, utilizando la metodología de componentes principales. El índice se definió como la primera componente principal, y se determinaron tres grupos de cultivares (división por terciles). Se observó que los cultivares del grupo I, caracterizados por su mayor resistencia combinada presentaron las mayores productividades y las menores dispersiones relativas dentro del grupo, mostrando mayor estabilidad frente a situaciones hídricas contrastantes (12,5; 11,7 y 11,3 Mg MS ha⁻¹ año⁻¹, como promedios de las localidades y condiciones climáticas, en grupos I, II y III, respectivamente). En síntesis, se presentaron las relaciones entre las variables edafoclimáticas y la dinámica estacional e interanual de la producción forrajera de *Medicago sativa* L. en las diversas localidades de la ecorregión pampeana de Argentina. Se plantearon escenarios en los que se analizaron datos climáticos en la serie 2000-2018 a partir de los cuales se lograron diferentes respuestas del sistema ante eventos de precipitación contrastantes. Es destacable la simplicidad del modelo AquaCrop y su capacidad de adaptación a diferentes climas y suelos, en las localidades ensayadas. Se considera que su horizonte de utilización es amplio en aspectos como: estimación de producciones de biomasa, evaluación de la incidencia de la napa freática, análisis de riesgos productivos por impactos de sequías o excesos hídricos, definición de uso eficiente del agua y análisis de brechas productivas. Se agruparon más de 90 cultivares de latencia corta en respuesta a sus resistencias bióticas en un índice de valoración, el que fue asociado a situaciones de anomalías de precipitación, lo que mostró otro aspecto de elección de cultivares para una zona determinada. Disponer de estas informaciones es una herramienta más para que la especie pueda acercarse a las producciones potenciales.

Palabras Clave: AquaCrop, alfalfa, grado latencia corta, situaciones hídricas, resistencia biótica.

Abstract

Estimation of forage production of *Medicago sativa* L. from climatic and edaphic variables; and development of a forage valuation index, in the Pampas region of Argentina.

The objective of this thesis was to use the AquaCrop model (FAO) to analyze the relationships between the edaphoclimatic variables and the seasonal and year-on-year dynamics of the production of *Medicago sativa* L. It was used in various locations in the Argentine Pampas ecoregion. There are no previous works to calibrate it in alfalfa. Also, a forage valuation index was developed to classify cultivars in the region, based on their genetic resistance to pests and diseases. Was used the Information from the INTA alfalfa cultivar evaluation for the short latency groups (8-10) in the three production first years during the period 2000-2018. The localities were Marcos Juárez, Manfredi, Rafaela, Paraná and Concepción del Uruguay. He cuts were grouped into two growing seasons, those periods of greatest (September to February) and lowest (March to August) forage growth, also according to conditions of deficit, excess or normal rainfall. For the first objective, the AquaCrop (FAO) model was used, which allows estimating the biomass of a crop from evapotranspirated water, there being no previous calibration work on alfalfa. The parameter of the cultivation module were not available for alfalfa, so bibliographic sources were used to define and / or estimate them, which constitutes a worldwide advance of the model. The biomass values were analyzed under optimal conditions and gaps to that optimum. The efficiency of water use, in conditions of deficit and excess precipitation, was also analyzed. High yield gaps were observed between potential productions and those observed in the network cuts, this gap varying between 30% and 85%. The greatest efficiency in the use of water was achieved in Marcos Juárez in the dry periods of autumn winter growth with $3.59 \text{ kg DM m}^{-3}$, a value that significantly exceeded the rest of the localities. The town of Concepción del Uruguay showed the lowest efficiencies ($<2 \text{ kg DM m}^{-3}$). The model allows identifying the edaphoclimatic relationships that respond to gaps in potential production and to the efficiency of water use in alfalfa. A second objective was to analyze the relative contribution of genetic improvement in short dormancy cultivars, regarding resistance to pests and diseases. For this, a valuation index was built to group the cultivars according to their resistance qualities. It was observed that the cultivars in the group with the highest combined resistance presented the highest productivity and the lowest relative dispersions within the group. They also showed the greatest stability against contrasting water situations (12.5, 11.7

and 11.3 Mg MS ha⁻¹ year⁻¹, as averages of localities and climatic conditions, in groups I, II and III, respectively). In summary, the simplicity of the AquaCrop model and its ability to adapt to different climates and soils in the tested locations are remarkable. Over 90 cultivars with short latency in response to their biotic resistance were group into a valuation index, which was associated with abnormal precipitation situations. This index showed another aspect in cultivar choice for a given area. The work allowed a more detailed analysis of alfalfa productions in the Pampa region of Argentina.

Key words: AquaCrop, alfalfa, short latency degree, water situations, biotic resistance



CUERPO DEL TRABAJO DE TESIS
Descripción general

Descripción general del trabajo de la tesis

En Argentina la alfalfa (*Medicago sativa* L.) constituye el principal componente de la oferta forrajera de las pasturas implantadas (Hijano y Basigalup, 1995). Por su adaptación a un amplio rango de condiciones agroclimáticas y por su capacidad de producir elevada cantidad de forraje de alta calidad es una especie utilizada en sistemas de producción de carne y leche en distintas regiones ganaderas templadas del mundo (Díaz-Zorita y Fernández-Canigia, 1998; Racca *et al.*, 2001).

La región pampeana es la principal área de producción de alfalfa (90%), comprende el noroeste de La Pampa y Buenos Aires, el centro-sur de Santa Fe y el sudeste de Córdoba (Collino *et al.*, 2007). Dicha región posee ambientes favorables para esta forrajera que se cultiva casi exclusivamente en condiciones de secano, con rendimientos anuales de forraje elevados, estables y muy buenos niveles de persistencia (Spada, 2007). Su productividad depende, entre otros factores del adecuado aprovechamiento de las condiciones agroclimáticas y de la oferta de nutrientes (Díaz Zorita, 2008). Entre las variables climatológicas y factores abióticos que han sido reportados como determinantes en su producción, se encuentra la temperatura, el fotoperíodo, la radiación solar, las precipitaciones, la evapotranspiración y la humedad disponible en el suelo (Gardner *et al.*, 1985; Grismer, 2001; Collino *et al.*, 2007; Lindenmayer *et al.*, 2011). Las tendencias actuales en investigación se centran en analizar las interacciones del sistema planta-clima-suelo, detectar y definir los factores del suelo y del clima que limitan la producción agropecuaria, como también poder predecir los rendimientos de los cultivos y los posibles futuros comportamientos de las variables que pueden afectar positiva o negativamente al cultivo.

Considerando la incertidumbre en la frecuencia e intensidad de la precipitación, así como en su distribución espacial y en la eficiencia de retención de agua por el suelo, la producción de biomasa de alfalfa puede disminuir considerablemente por condiciones de escasez y/o exceso de agua (Collino *et al.*, 2007). Por otro lado, varios investigadores (Smeal *et al.*, 1991; Grimes *et al.*, 1992; Saeed y El-Nadi, 1997; Bai y Hao Li, 2003; Geerts *et al.*, 2010) reconocieron una relación lineal positiva entre el rendimiento de alfalfa y la evapotranspiración.

Doorenbos y Kassam (1979) desarrollaron las relaciones entre disponibilidad hídrica y rendimiento, y concluyen que ese rendimiento se puede medir por unidad de agua aplicada. La predicción de la respuesta de rendimiento al uso de agua de la alfalfa es importante en el

desarrollo de estrategias y en la toma de decisiones para el uso del cultivo. Sin embargo, existen pocos trabajos relacionados en la región pampeana argentina (Collino *et al.*, 2007).

Teniendo en cuenta la complejidad del sistema mencionado, el uso de los modelos de simulación tiene varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo y la planificación agropecuaria (Díaz Ambrona, 2011).

AquaCrop es un modelo descriptivo que simula la biomasa y el rendimiento potencial cosechable de un cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua y estima el rendimiento posible de cultivos. Este modelo fue desarrollado por la División de Tierra y Agua de la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, sus siglas en inglés) y simula la respuesta en el rendimiento de acuerdo al agua transpirada por el cultivo, según el volumen de agua disponible en el suelo, estimado a partir de datos de precipitación y/o riego en el suelo (Steduto *et al.*, 2009). Uno de los objetivos de este trabajo fue indagar sobre las posibilidades de aplicación del modelo para las condiciones del cultivo de alfalfa en las áreas húmedas y sub-húmedas de la Argentina. A partir de las variables calibradas y validadas en la productividad de alfalfa, se realizaron análisis del comportamiento de la respuesta del modelo y de la especie estudiada bajo diferentes condiciones agroecológicas en las localidades seleccionadas, y se interpretan los valores de biomasa en condiciones de óptimos y brechas a ese óptimo. También se analizó la incidencia de la napa freática en el aporte capilar a las raíces de la alfalfa en comparación con ausencia de esta variable. Además, se ha podido determinar el comportamiento de la productividad de alfalfa en condiciones de anomalías de precipitación en cada localidad.

Con estos estudios se reconoce que el conocimiento de los factores ambientales y de manejo que explican la brecha entre las producciones logradas y las alcanzables, son claves para diseñar estrategias de mejora de la especie.

Por otra parte, para profundizar en el estudio de la especie, no se desconoce el comportamiento diferencial entre los cultivares comerciales. Entre los factores que contribuyen a alejarse del potencial se encuentran las pérdidas provocadas por plagas y enfermedades, que pueden reducir la densidad del stand de plantas, disminuir rendimientos y acortar la vida de la pastura. Es así que, en una segunda etapa de análisis se estudió el comportamiento de los cultivares comerciales de la especie, respecto a la ganancia genética en los caracteres de resistencias a plagas y enfermedades. La genética orientada a tales resistencias supone que en ambientes desfavorables como anomalías climáticas de déficit o excesos hídricos esos materiales expresarían mejor sus producciones. Este estudio fue realizado a partir del desarrollo de un Índice de valoración de

los materiales comerciales y el posterior análisis de su expresión productiva en cada una de las localidades del estudio.

En síntesis, en la primera parte de la tesis, se describe el nivel de avance y complejidad del estado del arte y los alcances científicos y tecnológicos en que se encuentra el conocimiento de la producción de la biomasa vegetal de alfalfa a partir del agua. Se tuvo en cuenta el entorno agroclimático enmarcado dentro de diversas localidades de Argentina, así como los avances logrados en el modelo AquaCrop (Raes *et al.*, 2009) y las contribuciones de su uso en esta especie. El cuerpo del documento incluye la “Metodología” que describe los procedimientos para la determinación de los parámetros y variables de entrada al modelo y luego el capítulo de “Resultados y Discusión” donde se presentan, se comentan y discuten los resultados encontrados. Finalmente se incluye un capítulo sobre las Conclusiones y recomendaciones y se presentan los Anexos del trabajo.



INTRODUCCIÓN

1- Introducción

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es la principal especie forrajera del país y la base de la producción de carne y de leche en la región pampeana. La difusión del cultivo se apoya en sus altos rendimientos de materia seca por hectárea (MS ha^{-1}), su excelente calidad forrajera y su gran adaptabilidad a diversas condiciones ambientales (suelo, clima) y de manejo. Por otro lado, su capacidad para la fijación del nitrógeno atmosférico a través de la simbiosis con *Sinorhizobium meliloti* la convierten también en un importante componente de la sustentabilidad de los sistemas productivos (Gramshaw *et al.*, 1989; Bouton, 2001; Irwin *et al.*, 2001).

En el país el cultivo de alfalfa se realiza mayoritariamente bajo condiciones de secano pudiendo producir entre 8 y 22 Mg MS $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, dependiendo de la disponibilidad hídrica, radiación, fertilidad regional y temperatura, además de otros factores (Hijano y Basigalup, 1995). Mientras que las producciones máximas alcanzables son aquellas logradas por un cultivo que crece sin limitantes nutricionales y utilizando la mejor combinación de insumos y tecnología (Lobell *et al.*, 2009), las producciones promedio de la especie resultan inevitablemente menores que las potenciales, ya sea porque alcanzar estos niveles requiere un manejo de la defoliación óptimo, asegurar a escala el control de plagas, malezas, enfermedades, nutrición, elección de genotipos, densidades de siembra, etc. (Collino *et al.*, 1997, 2005 y 2007). No menos importante para lograr la producción potencial de forraje es la disponibilidad no limitante de agua para satisfacer la transpiración del cultivo, así, en la región pampeana la disponibilidad de agua es el principal factor limitante (Collino *et al.*, 1997; Abate *et al.*, 2000; Magrin *et al.*, 2005). La alfalfa consume agua durante todo el año, aún durante el reposo invernal, generando una demanda evapotranspiratoria mayor que un sistema de cultivos anuales, en donde siempre existen períodos de barbecho (Collino *et al.*, 2007). El máximo potencial de producción de alfalfa se alcanza con 1.200 mm anuales en promedio (Dorenboos y Kassam, 1979), situación alejada de la que se presenta en algunas regiones de nuestro país.

En un cultivo como la alfalfa, cuya duración promedio en buenas condiciones de manejo es de 4 años (Rossanigo *et al.*, 1995), el agua almacenada en el suelo sólo tiene una influencia relevante durante el primer año de vida. Por lo tanto, la principal fuente de suministro de agua para el cultivo, considerando su ciclo en conjunto, son las precipitaciones. En algunos casos, habrá que considerar también el aporte de la napa

freática, en particular porque el sistema radical puede alcanzar profundidades de hasta 6 m a partir del segundo año de implantación (Borg y Grimes, 1986).

Las variaciones entre localidades en el consumo potencial anual de agua se deben a las diferencias en la demanda atmosférica. Ésta a su vez está integrada por dos componentes: el componente radiativo, que depende principalmente de la radiación solar (factor que está directamente relacionado con la generación de materia seca), y el componente advectivo, relacionado con la sequedad del aire, que está influenciado por la temperatura, viento y la humedad relativa (Hämmerly, 2001; Collino *et al.*, 2007). Con respecto a la radiación, la producción de forraje depende de: a) la cantidad de radiación que el cultivo sea capaz de interceptar, y b) la eficiencia con que utilice dicha radiación para generar biomasa aérea (hoja y tallo). Estos parámetros pueden disminuir si ocurren temperaturas limitantes para la fotosíntesis y por condiciones que favorezcan la acumulación de carbohidratos en estructuras de reserva: corona y porción superior de las raíces (Heichel *et al.*, 1988).

Los efectos sobre la producción de biomasa de alfalfa pueden ser analizados con mayor nivel de detalle a través del análisis de los cambios en cada uno de los componentes del rendimiento forrajero: la densidad de plantas por m², el número de tallos por planta y el peso por tallo (Volenc *et al.*, 1987), y también estudiando los componentes del modelo ecofisiológico de aprovechamiento de la radiación incidente: la interceptación de la radiación y su conversión en biomasa (Monteith, 1977). Por otra parte, para alcanzar producciones elevadas de forraje se requiere de suelos profundos, bien aireados, fértiles y sin anegamientos temporarios (Basigalup *et al.*, 2007). Esto implica que serían suelos con buena aptitud y por lo tanto competirían con los cultivos agrícolas en el uso de los mismos. De esta forma al aumentar la producción forrajera podría mejorar la competitividad del cultivo de alfalfa frente a cultivos agrícolas que han tenido un importante crecimiento en la última década y que provocaron los desplazamientos de las pasturas hacia suelos de menor aptitud.

Son las variables climáticas las que controlan la producción de la biomasa aérea, la ocurrencia de condiciones climáticas adversas afecta la maximización de la energía solar captada (Briske y Heischmidt, 1993), ya que agua y temperatura, al igual que algunos nutrientes frecuentemente limitan el desarrollo de un canopeo suficiente para interceptar la radiación fotosintéticamente activa disponible (Volenc *et al.*, 1987, Monteith, 1977; Pembleton *et al.*, 2009). Para analizar la influencia de las variables climáticas sobre el crecimiento de alfalfa, se requiere del conocimiento de los mecanismos morfofisiológicos y genéticos subyacentes, formación del

área foliar, intercepción y eficiencia de la radiación, distribución de la materia seca y rendimiento potencial de forraje.

En nuestro país, en una gran diversidad de climas y tipos de suelo se han reportado productividades que se extienden en rangos de 3,16 Mg MS ha⁻¹ en regiones que poseen suelos con baja capacidad de retención de agua y donde se presentan bajas precipitaciones (<300 mm año⁻¹, Anguil, La Pampa), hasta regiones que reportan 21,25 Mg MS ha⁻¹ (Marcos Juárez, Córdoba), en suelos profundos bien provistos de agua (Spada, 2011, 2012, 2013, 2014). O bien producciones máximas de forraje de 31 Mg MS ha⁻¹ año⁻¹ en Rafaela, 29 Mg MS ha⁻¹ año⁻¹ en Hilario Ascasubi, 28 Mg MS ha⁻¹ año⁻¹ en Pergamino y 20 Mg MS ha⁻¹ año⁻¹ en Balcarce, en períodos sin estrés hídricos (Spada, 1998 y 2002) y los valores anuales en suelos Argiudoles de Entre Ríos de 10 Mg MS ha⁻¹, con máximos y mínimos de 18 y 6 Mg MS ha⁻¹ tanto para alfalfas con grado latencia intermedio y corto (Di Nucci de Bedendo y Valentinuz, 2008).

No obstante, a estos valores en las producciones, se destaca que la especie tiene un elevado consumo de agua que varía, tanto diaria como estacionalmente, de acuerdo a la demanda evaporativa de la atmósfera y al estado fenológico del cultivo (Roca da Cunha *et al.*, 1994; Collino *et al.*, 2007). Se han registrado consumos de agua de 1630 mm año⁻¹ en el norte de Buenos Aires (Totis de Zelijkovich y Coca, 1998) y 1464 mm año⁻¹ en Córdoba (López *et al.*, 1997). Por otro lado, se han registrado variaciones entre 12,9 - 25,4 kg mm⁻¹ (López *et al.*, 1997), 9,0 - 25,4 kg mm⁻¹ para otoño y primavera, respectivamente (Collino *et al.*, 2005).

Los conceptos de “uso eficiente” y “productividad” del agua han sido y son ampliamente estudiados por la comunidad científica y académica ligadas al uso del agua en la agricultura. Ambos tienen matices según la escala de estudio, sus objetivos y los actores involucrados, lo que determina el marco a utilizar (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Las relaciones agua-rendimiento son difíciles de predecir, al estar determinadas por factores específicos locales. Así, se debe tener un adecuado conocimiento de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera y también de la relación entre disponibilidad de agua, producción de biomasa y rendimientos. Si bien es posible desarrollar funciones agua-rendimiento de alcance local a través de experimentación a campo, no siempre es logrado debido a la alta demanda de financiamiento, tiempo y mano de obra. Además, la experimentación específica tiene limitaciones cuando interesa conocer respuestas para una serie larga de años. Una buena estrategia es plantear experimentos específicos y dirigidos en combinación con el uso de

modelos de simulación de crecimiento de cultivos (Fereres y Stubber, 1993 y Fereres *et al.*, 1993; Farahani *et al.*, 2009).

En este contexto, la producción en climas templados es probablemente la situación más difícil de analizar cuando se debe armonizar demanda y oferta de agua. Esta dificultad se debe al aporte de las precipitaciones, que son inciertas en cuanto a frecuencia, duración e intensidad, y más aún considerar los aportes de la napa freática en algunas regiones del país (Jobbágy y Jackson, 2004; Jobbágy *et al.*, 2008; Chiacchiera, 2017). Si bien existen diversas acciones de manejo agronómico para que los cultivos puedan prosperar en condiciones no demasiado propicias, tales como: la elección del cultivar, fecha de siembra, densidad de siembra y adecuadas prácticas en general, estas acciones logran en forma parcial, que el cultivo, transpire la mayor cantidad de agua disponible (Loomis y Connor, 1992).

Uno de los enfoques nuevos para evaluar el uso y productividad del agua en la agricultura se basa en la utilización de modelos de simulación. Los modelos son una representación simplificada de la realidad y su objetivo es simular el funcionamiento de un sistema determinado, utilizando un conjunto de ecuaciones. En el caso de los modelos agrícolas, su función principal es estimar la producción de los cultivos en función del clima, el suelo y el manejo tecnológico. Existen numerosos modelos de simulación, entre los que se puede mencionar: CERES (Ritchie y Otter, 1985); el sistema de soporte de decisiones DSSAT (Jones *et al.*, 2003); COTCROP (Brown *et al.*, 1985), OZCOT (Hearn y Constable, 1984), GOSSYM (Baker *et al.*, 1983), APSIM (Wang *et al.*, 2002) y CropSyst (Stöckle *et al.*, 1996). Estos modelos dan buenas estimaciones de la producción en relación a la disponibilidad de agua, pero, en general, requieren información sobre parámetros que describen el comportamiento de los cultivos, que no es siempre sencillo obtener. Otros, como CROPWAT (Smith *et al.*, 1998), utilizan funciones empíricas para describir la relación agua-rendimiento.

AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009) fue desarrollado por sus autores para FAO y se centra en la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua. AquaCrop basa la relación entre crecimiento de los cultivos y la disponibilidad de agua en el comportamiento conservador de la biomasa producida por unidad de agua transpirada por el cultivo. La producción de biomasa y el rendimiento dependen de factores tales como evolución de la cobertura del canopeo, conductancia estomática, productividad del agua e índice de cosecha, entre otros. AquaCrop fue concebido buscando un equilibrio entre simplicidad, precisión y robustez (García Vila y Ferrere, 2012). Ha sido aplicado en maíz (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009; Mebane *et al.*,

2013), algodón (Farahani *et al.*, 2009; García Vila *et al.*, 2009; Qiao *et al.*, 2012, entre otros), sorgo granífero, trigo (Salemi *et al.*, 2011) y cebada (Araya *et al.*, 2010), entre otros cultivos.

El modelo permite analizar condiciones de estrés por temperatura, hacer análisis de sensibilidad en función de la fertilidad de suelo, la salinidad del agua de riego y la influencia de la napa freática. Se destaca que, en áreas de secano, uno de los factores productivos más importantes es la disponibilidad hídrica para los cultivos (Scilingo, 2013; Nasetto *et al.*, 2015; Videla Mensegue *et al.*, 2015). En este sentido, el incremento de las precipitaciones también está asociado a una mayor recarga de los acuíferos, con elevaciones estacionales y ocasionales de los niveles freáticos (Cisneros *et al.*, 1999; Degioanni *et al.*, 2006; Cisneros *et al.*, 2013). Esta elevación, si bien constituye un factor de riesgo de anegamiento y salinización de suelos, también representa una fuente adicional de agua para alfalfa, cuando las raíces son capaces de llegar hasta el frente capilar.

Los datos de entrada requeridos por AquaCrop son de clima (temperatura máxima y mínima, precipitaciones, evapotranspiración de referencia y concentración de CO₂), cultivo, suelo y de manejo agronómico, los cuales definen el ambiente en el cual el cultivo se desarrolla. Respecto de los cultivos, el modelo cuenta con parámetros que pueden separarse en dos grupos: los conservadores y los no conservadores. Los parámetros conservadores deben permanecer prácticamente constantes y son generalmente aplicables ante diferentes condiciones de manejo, clima y ubicación geográfica; los “no conservadores” dependen del cultivar y las condiciones de crecimiento y deben ser especificados por el usuario.

El parámetro de eficiencia en el uso del agua es el resultado angular de AquaCrop, en base al cual se deriva la biomasa aérea a partir del agua transpirada, la productividad hídrica del cultivo expresada en materia seca aérea producida por unidad de área por unidad de agua transpirada (mm). Muchos experimentos han mostrado que la relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo dado es altamente lineal (Steduto *et al.*, 2007). Alfalfa tiene un elevado consumo de agua que varía, tanto diaria como estacionalmente, de acuerdo a la demanda evaporativa de la atmósfera y al estado fenológico del cultivo (Roca da Cunha *et al.*, 1994).

AquaCrop ha sido desarrollado para cultivos anuales, no tiene activo hasta el presente, la opción de “tipo de cultivo de especies forrajeras”, se esperaba la inclusión de la primera de ellas para el caso de la alfalfa, sin embargo esto no se realizó. Tampoco se ha establecido la posibilidad de simulación de los cortes periódicos los cuales se suelen realizar para algunas especies

forrajeras. Esta es una característica importante a la hora de estimar la producción de biomasa en cultivos forrajeros, dado que el nivel del corte determina el desarrollo futuro del cultivo. El hecho de que los cultivos forrajeros no se hayan calibrado para el modelo AquaCrop se ha tomado en este trabajo como una oportunidad, aprovechando esta vacancia para desarrollar el contenido de la presente tesis.

En síntesis, son varios los factores que deben coincidir para obtener las máximas producciones de biomasa, los climáticos que no se podrán controlar, otros que corresponden a herramientas de manejo imprescindibles para aumentar las posibilidades de aproximarse al potencial de la especie y otros referidos a cualidades de la especie. Respecto a esto último, la producción acumulada de forraje como su distribución, son respuestas a las tasas de crecimiento que se van registrando a lo largo del ciclo y dependen, no sólo de las condiciones ambientales del sitio en particular, sino también del potencial genético de cada cultivar (Santini *et al.*, 1975; Rossanigo *et al.*, 1995; Bertín, 1997; Pecce, 2000; Spada *et al.*, 2007).

Las interacciones genéticas y ambientales que determinan el rendimiento del forraje y la calidad de un cultivar de alfalfa son complejas. Los factores genéticos pueden quedar ocultos por limitaciones de temperatura, de humedad, de enfermedades o de plagas y otros, los cuales difieren de un lugar a otro (Elliot *et al.*, 1972). Se suman a estas consideraciones lo señalado por Basigalup (2007) no sólo en cuanto al alto número de cultivares de alfalfa que se ofrecen anualmente en el mercado nacional (> 120), sino también en cuanto a la marcada tendencia de utilización de cultivares con menor reposo invernal (grados de latencia de 7 a 10) por parte de los productores. Podríamos confirmar que todas las acciones, decisiones tomadas en relación al cultivar que se planifica sembrar, son importantes y contribuyen en mayor o menor medida, al éxito de la producción alcanzada.

El clima, temperaturas y precipitaciones, en combinación con el tipo de suelos, ejercen una interacción que va a determinar su producción y persistencia. El medio ambiente determinará también la incidencia de enfermedades y la presencia de insectos que afectarán la producción potencial, la calidad del forraje y la persistencia, y disminuirán la eficiencia en el uso de agua y nutrientes (Graham *et al.*, 1972; Annicchiarico, 2002). Por lo tanto, la correcta elección de los materiales de alfalfa a utilizar es un aspecto importante para los sistemas de producción que basan la alimentación del ganado en esta leguminosa. Resulta obvia, en consecuencia, la

importancia de conocer las posibles virtudes o rangos de adaptación de cada cultivar en la localidad de uso, de manera de aconsejar su difusión sobre las bases más sólidas posibles.

Es de destacar que el rango de cultivares disponibles en el mercado nacional es mayor en alfalfa que en otras leguminosas forrajeras (434 cultivares inscriptos según SENASA, 2019). Un número importante de cultivares de alfalfa ha sido evaluado por el Programa Nacional de Evaluación de Cultivares de INTA, demostrándose el buen potencial productivo y persistencia de muchos de ellos (Spada, 2007). El grado de reposo invernal y el comportamiento sanitario generalmente integran la información disponible de cada cultivar ensayado en la Red de Evaluación de cultivares de alfalfa de INTA (de aquí en adelante Red). Respecto al grado de latencia, aspecto más relevante de las características de los cultivares, éste incide en la distribución estacional de forraje, en particular el potencial de crecimiento en otoño-invierno. Como norma general, las diferencias en las tasas de crecimiento a lo largo del ciclo entre cultivares de distinto grado de latencia, no siempre se traducen en diferencias de producción acumulada de forraje (Basigalup *et al.*, 2007; Spada, 2007, 2012, 2013 y 2014). Cabe señalar que más allá del efecto del grado de latencia, el resultado final depende del potencial genético de cada cultivar (Spada *et al.*, 2007; Spada, 2007).

La genética, aunque un factor más en el paquete tecnológico disponible actualmente, es de vital importancia. Se considera que debe ser tenida muy en cuenta en la elección del cultivar de alfalfa, ya que tiene gran repercusión en la producción y distribución en el tiempo de la biomasa forrajera (Spada *et al.*, 2007). Los referidos autores recomiendan que atributos tales como grado de latencia, persistencia y resistencia a plagas y enfermedades, sean considerados en conjunto porque, en muchas ocasiones, la no detección de diferencias en la producción potencial de forraje, no necesariamente expresa similitud entre variedades (Di Nucci de Bedendo, 2011; Spada, 2010). No obstante, a este planteo, numerosos trabajos señalan que la principal variable de estudio para calificar a los cultivares de alfalfa en los distintos ensayos experimentales resulta ser su potencial de rendimiento de forraje. En este sentido, es notorio el avance logrado en los últimos años, que permite disponer de cultivares con excelentes producciones de forraje, que duplican a las que se lograban a mediados de la década del 70 (Rossanigo, 1997 a y b). En este sentido, la calidad genética de la semilla es de fundamental importancia, debe contar con una base genética que le permita adaptarse a determinadas condiciones climáticas y sobrellevar los estreses bióticos y abióticos. Un buen cultivar de alfalfa debe brindar altas producciones, excelente calidad forrajera, buena persistencia, resistencia a las plagas y enfermedades más

importantes, competir adecuadamente con las malezas y estar adaptado a la región ecológica donde ha de ser utilizada (Lowe *et al.*, 1972; Rossanigo, 1997; Basigalup y Rossanigo, 2007, Basigalup y Odorizzi, 2007; Altier *et al.*, 2010).

Haciendo un análisis del ordenamiento relativo de los cultivares, a través de los distintos ensayos de la Red, se evidencia que hay cultivares que se ubican en las primeras posiciones del ranking productivo. El número de cultivares con este comportamiento varía por región, por ciclo productivo (marcadas diferencias entre el primer y segundo año y se reduce para los acumulados de tres años y de cuatro años) y entre ciclos (Rossanigo *et al.*, 1995).

Si analizamos la persistencia, puede incluir conceptos de productividad, pero el mantenimiento de un número adecuado de plantas es un criterio más complejo a resolver genéticamente (Bouton, 2001). No se desconoce que, la incorporación de múltiples características, como ser resistentes a las plagas y enfermedades, mejoran la persistencia y la producción en las regiones de uso de la especie (Irwin *et al.*, 2001; Bouton, 2012).

Desde esta perspectiva y sabiendo que las condiciones ambientales modifican la expresión de las características genéticas en los cultivares, se realizó un análisis exploratorio de clasificación de los cultivares comerciales de grado de latencia corto, por rasgos de resistencia a plagas y enfermedades. En general, se considera que la mayor resistencia biótica, enfatiza la persistencia y producción de las especies (Altier, 1991; 1996 y 2000). Si bien las evaluaciones de producción que realiza la Red son conducidas bajo condiciones de corte y en parcelas de pequeñas dimensiones, la información es útil para analizar el potencial de producción esperado de cada cultivar en condiciones de anomalías climáticas. Evaluar los referidos rasgos genéticos permitirá orientar la elección de los mismos en las distintas localidades contempladas en este trabajo, analizando sus comportamientos respecto a años con excesos o déficit hídricos.



OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivos principales e Hipótesis

Se establecieron dos objetivos principales:

a- Aplicar el modelo AquaCrop (FAO) con el objetivo de analizar las relaciones entre las variables edafoclimáticas y la dinámica estacional e interanual de la producción de *Medicago sativa* L. en diversas localidades de la ecorregión pampeana argentina.

Hipótesis: Las producciones de biomasa de *Medicago sativa* reflejan un comportamiento diferencial a nivel espacial y temporal en la ecorregión pampeana, debido a la complejidad de las variables ambientales. Ante este escenario es importante referenciar las relaciones entre las condiciones edáficas y climáticas para entender los valores productivos de forraje en la especie. Tal comprensión puede ser resuelta con el uso del modelo AquaCrop quien es capaz de lograr los mejores valores de predicción posibles con los datos disponibles. Así, se plantea que la producción de forraje de *Medicago sativa* L. en la ecorregión pampeana podrá ser estimada a partir de un modelo funcional dinámico que simula la productividad alcanzable de alfalfa como función del consumo de agua (AquaCrop), conformados por combinaciones de variables climáticas y edáficas a nivel de períodos de crecimiento.

b- Desarrollar un Índice de valoración forrajero en *Medicago sativa* L. para la clasificación de cultivos de grado de latencia corta, que permita identificar el comportamiento productivo en las diferentes subregiones edafoclimáticas, principalmente en escenarios de condiciones hídricas extremas.

Hipótesis: El comportamiento productivo de cultivos en alfalfa presentará importantes variaciones en las producciones anuales acumuladas, causadas por las variaciones en el ambiente edafoclimático. Los cultivos que presenten mayores resistencia a plagas y enfermedades, presentarán también mayor grado de adaptabilidad y en consecuencia mayor productividad en biomasa aérea, en condiciones de excesos o déficit hídricos. Por lo tanto se plantea que en situaciones de exceso y déficit hídricos, existe una relación positiva entre la productividad en biomasa y el Índice de valoración forrajero.

2-1 Objetivos específicos e hipótesis

a.1- Parametrizar, calibrar y validar el modelo de simulación AquaCrop para alfalfa (grado de latencia corta), a partir de datos secundarios de corte en la Red de Inta de alfalfa en el período 2000-2018, en condiciones de secano en Marcos Juárez, Manfredi, Rafaela, Paraná y Concepción del Uruguay.

Hipótesis: La buena capacidad de predicción de la producción de forraje del modelo AquaCrop, la simplicidad y robustes del funcionamiento, en diferentes localidades de la ecorregión pampeana argentina, hacen promisorio su uso en *Medicago sativa*.

a.2- Analizar la brecha entre las producciones potenciales logradas por el modelo y las observadas en los cortes (limitado por el régimen climático de las localidades), en situaciones hídricas normales y extremas.

Hipótesis: Las anomalías de excesos y déficit hídricos, manifiestan diferencias en el comportamiento productivo de alfalfa, las cuales son identificadas por el modelo AquaCrop. Consecuentemente, es posible identificar, en cada una de las localidades del estudio, el o los factores de mayor valoración que afectan las brechas de productividad entre lo alcanzable y lo potencial.

a.3- Explorar en la región de estudio, la respuesta de alfalfa al efecto del ascenso capilar desde una napa freática fluctuante para las condiciones de los ambientes analizados.

Hipótesis: El modelo AquaCrop, en su última versión, incorpora la profundidad del nivel freático y los aportes que realiza por ascenso capilar. La influencia de esta variable permite comprender las respuestas de la producción de la biomasa forrajera a la dinámica freática en cada localidad analizada. De modo que napas freáticas demasiado profundas son inaccesibles y no ofrecen agua al crecimiento de la biomasa, napas freáticas someras generan anegamientos que limitan su producción.

a.4- Evaluar la eficiencia en el uso del agua y su relación con la producción de la biomasa en alfalfa, en diferentes ambientes.

Hipótesis: La naturaleza perenne de la alfalfa ofrece constantes desafíos con vistas a optimizar la utilización del recurso agua, a diferencia de los cultivos anuales. A lo largo del año, está sometida a condiciones ambientales variables de disponibilidad de agua,

sumado a la radiación y variaciones térmicas. En consecuencia, el conocimiento de la eficiencia con que el cultivo utiliza el agua adquiere significativa relevancia a nivel científico. Al respecto se reportan numerosos estudios en la eficiencia del uso del agua en alfalfa, en ensayos a campo y en diferentes ambientes edafoclimáticos. Tomando en cuenta esos resultados, se plantea la afirmación de que la respuesta de la eficiencia en el uso del agua de la biomasa aérea acumulada en alfalfa, mediante simulaciones realizadas con el modelo AquaCrop, es similar a lo informado por la literatura nacional e internacional. (Cabe aclarar que no se dispuso de valores empíricos de eficiencia del uso del agua a partir de los ensayos de la Red, de manera que la validación de esta variable es con datos bibliográficos).



MATERIALES Y MÉTODOS

3- Materiales

3-1- Localización regional del área de estudio

Se analizó la región comprendida entre los 31,18° y 32,68° de Latitud Sur y 58,35° y 63,77° de Longitud Oeste, dentro de la ecorregión pampeana húmeda, a partir de la información de las localidades de Marcos Juárez, Manfredi, Rafaela, Paraná y Concepción del Uruguay. Las principales características de cada localidad se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Zonas bajo estudio para el cultivo de alfalfa en Argentina

Localidad	Coordenadas geográficas (°C)		Altura nivel del mar (m)
	Latitud	Longitud	
Marcos Juárez (zona sub-húmeda-Córdoba)	-32,68	-62,12	110
Manfredi (zona semiárida-Córdoba)	-31,82	-63,77	292
Rafaela (zona húmeda-Santa Fe)	-31,18	-61,55	100
Paraná (zona húmeda- Entre Ríos)	-31,85	-60,53	110
Concepción del Uruguay (zona húmeda- Entre Ríos)	-32,49	-58,35	25

3-2- Información agroclimática de la zona de estudio

La información meteorológica utilizada en el modelo fue obtenida de SIGA - Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico- de INTA (años 2000 al 2018). A cada lugar de recolección se le han asignado los parámetros climáticos de las estaciones meteorológicas ubicadas en cada localidad. Se utilizaron registros diarios de las variables: precipitación (mm, P), temperatura máxima (°C, T_{máx}) y mínima (°C, T_{mín}), humedad relativa (%), Hr), velocidad media del viento (Km h⁻¹, Vv), heliofanía efectiva (hs, Hef).

A partir de estas variables se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_o); y la concentración de CO₂ utilizada fue la asignada por defecto por el modelo AquaCrop.

Para obtener el producto final de estas variables, en una secuencia diaria y en el período 2000/2018, se han llevado a cabo varios procedimientos y pasos de análisis.

En esta construcción de información se presentaron situaciones en las que algunos datos climáticos no estaban disponibles. Para esos casos, se recurrió a estaciones meteorológicas automáticas o estaciones meteorológicas convencionales muy próximas a cada centro de lectura de INTA, evaluándose el coeficiente de determinación R². Los datos faltantes fueron completados por los datos de las estaciones cercanas. Se destaca que no pudo lograrse la variable Vv en Manfredi, en el período de análisis (tabla 2).

Tabla 2: Porcentajes de datos faltantes completados y no completados en cada localidad.

Localidad	Datos faltantes completados (%)	Datos faltantes sin completar según variable
Marcos Juárez	6	-
Manfredi	12,5	100 % Vv
Rafaela	1,5	12 % Hef y Vv
Paraná	0,1	0,5 % Hef
Concepción del Uruguay	5	3,5 % Hef y Vv

También se utilizó una serie histórica (2000-2018) de valores de profundidad de la napa freática (NF) registradas en las localidades estudiadas. En la tabla 3 se presentan las localidades, frecuencias de lectura y fuente de información utilizada.

Tabla 3. Localidades y fuente de información para determinar la profundidad de la napa freática en el período 2000-2018.

Localidad	Período y frecuencia de lectura	Fuente de Información
Marcos Juárez	Período 2000/17 (Lecturas mensuales)	*Índice de registros de niveles freáticos del INTA Marcos Juárez, disponible en: https://inta.gob.ar/documentos/indice-de-registros-de-niveles-freaticos-en-localidades-del-area-del-inta-marcos-juarez
Manfredi	Período 2000/08 (lecturas mensuales discontinuas)	* Datos aportados por la Agencia Córdoba Ambiente SE Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Manfredi, Córdoba, Argentina
	Período 2008/2013 (lecturas semanales)	*Registros de niveles freáticos en Oncativo, datos aportados, en comunicación personal, por el Geólogo Héctor Frontera (Empresa Hidromediterránea, Departamento Punilla, Provincia de Córdoba, Argentina).
	Período 2013/2017 (lecturas mensuales discontinuas)	*Datos recogidos del Proyecto marco del Módulo de riego de INTA Manfredi – Córdoba (2013/17)
Rafaela	Período 2000/2017 (lecturas mensuales)	* Boletín Agrometeorológico Mensual INTA Rafaela, disponible en: https://inta.gob.ar/documentos/boletin-agrometeorologico-mensual-inta-rafaela
Paraná	Períodos 2000/2007 (lecturas mensuales)	*Índice de registros de niveles freáticos del INTA Paraná (2000/2009).
	2008/2009 (lecturas decádicas)	*Centro de Informaciones Meteorológicas - El Pozo - FICH - UNL - Santa Fe (2010/2017)
	2010/2017 (lecturas diarias)	
Concepción del Uruguay	Período 2000/17 (lecturas decádicas)	*Aportes de información realizados por la Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos del Sistema de Información Hidrometeorológica de Entre Ríos (SIHER)

3-3- Características de los suelos de la zona de estudio

Este modelo requiere parámetros físicos como textura del suelo (Tex), punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (cc), punto de saturación (PS) y saturación (S). Los datos de suelo (parámetros físicos-químicos) fueron obtenidos de trabajos de investigación y relevamientos de suelos realizados en cada localidad considerada (Inta sección suelos, //inta.gov.ar). Las principales características de los perfiles, según la clasificación Soil taxonomi (USDA-NCRS, 2006), en las localidades estudiadas, se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Tipo de suelos en cada localidad estudiada y fuente bibliográfica

Localidad	Tipo de suelo	Fuente
Marcos Juárez	Clasificación taxonómica: Argiudol típico Familia: arcillo/limosa fina, térmica (mineralogía no determinada). Textura del horizonte superficial: franco-limosa.	<i>Carta de suelos de la República Argentina - Hoja 3363-12 LAS ROSAS 1980.</i>
Manfredi	Clasificación taxonómica: Haplustol típico serie Oncativo Familia: franco gruesa mixta Textura del horizonte superficial: franco arenosa	<i>Cartas de Suelos -Pcia. de Córdoba - Localidad: Hoja 3163-32 ONCATIVO 1987</i>
Rafaela	Clasificación taxonómica: Argiudol típico serie Rafaela Familia: arcillosa fina, térmica (mineralogía no determinada). Textura del horizonte superficial: franco limosa	<i>Carta de suelos de la República Argentina - Hoja 3163-36y35; SAN JORGE-LAS PETACAS; 1990</i>
Paraná	Clasificación taxonómica: Argiudol ácuico serie Tezanos Pinto Familia: fina, mixta, térmica Textura del horizonte superficial: franco-arcillo-limoso a franco-limoso	<i>Serie de Suelos de la Provincia de Entre Ríos - Convenio INTA - Gob. De Entre Ríos (http://sisinta.inta.gob.ar/es/proyectos /11)</i>
Concepción del Uruguay	Clasificación taxonómica: Pulluderte típico serie Mughery (Vertisol) Familia: muy fina, montmorillonítica, ligeramente ácida Textura del horizonte superficial: franco-arcillo-limosa	<i>Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Entre Ríos. (1980). Suelos y Erosión de la provincia de Entre Ríos. Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 1. EERA INTA Paraná.</i>

3-4- Información de la Red de Evaluación de cultivares de alfalfa de INTA

Para la realización del trabajo se utilizó información de la Red coordinada por la Ingeniera Agrónoma María del Carmen Spada (2000 al 2014) y actualmente por la Bióloga Valeria Arolfo e Ingeniero Agrónomo Ariel Odorizzi (2015 al 2018), referidos a producción de materia seca (MS), grado de latencia (GL) y resistencia a plagas y enfermedades.

Cada ensayo de la Red se compone de parcelas de 5 * 1 m, con hileras distanciadas a 0,20 m y con una densidad de siembra de 20 kg ha⁻¹. En todos los casos se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La producción de MS se obtuvo cortando

con una motoguadadora y pesando todo el forraje producido en cada parcela (5 m²). Los cortes se efectuaron cuando la mayoría de los participantes de cada ensayo alcanzaba el 10% de floración, o cuando los rebrotes desde la corona medían aproximadamente 5 cm. La producción promedio de cada cultivar se expresó en t MS ha⁻¹. Para las determinaciones del porcentaje de materia seca se extrajeron, en cada fecha de corte y por participante, muestras de 200 g las que se secaron en estufa hasta peso constante. El porcentaje de cobertura se estimó contando, en cada hilera, la cantidad de espacios vacíos mayores a 15 cm. A los veinte días del último corte otoñal se midió la altura modal (cm) promedio de las plantas de cada parcela. Las tasas de crecimiento (kg MS ha⁻¹ día⁻¹) por corte se calcularon como el cociente entre la producción promedio de cada corte y los días que mediaron entre dos cortes sucesivos.

Respecto a las resistencias califica a los cultivares sobre la base de su comportamiento frente al ataque de pulgones como plagas y enfermedades en corona, los cultivares se pueden clasificar básicamente como: a) resistentes: las plantas son capaces de restringir o eliminar la actividad de una plaga o patógeno; b) tolerantes: las plantas no impiden el avance ni el desarrollo de la plaga o patógeno pero lo soportan sin manifestar disminución significativa de su producción, y c) susceptibles: las plantas son incapaces de restringir a la plaga o a la actividad del patógeno y sufren daños agudos o la muerte. Los porcentajes de resistencia se determinan en pruebas estandarizadas bajo condiciones controladas y con participación de testigos resistentes y susceptibles (Fox *et al.*, 1998).

La Red evalúa cultivares (cv) y líneas experimentales de alfalfa de origen nacional y extranjeros bajo condiciones de corte que están protocolizadas (Spada, 2000; Arolfo y Odorizzi, 2015). Los ensayos están organizados en series que se siembran cada 2 años, con un período de evaluación de 4 años, agrupando a los cv de acuerdo a su grado de latencia. En este estudio, la evaluación se realizó durante los ciclos productivos consecutivos del 2000/2001 al 2016/2018. Las localidades participantes de la red de evaluación que fueron consideradas son: Rafaela en Santa Fe, Manfredi y Marcos Juárez en Córdoba, Paraná y Concepción del Uruguay en Entre Ríos. En la sección Anexo se puede observar las planillas de información brindadas por la Red.

3-5- Programas estadísticos

Para la secuencia de procedimientos en el manejo de los datos cualitativos y cuantitativos de la investigación se utilizaron los paquetes informáticos Microsoft Excel (Microsoft Office

Professional Edition 2007, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) e Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2009).

4- Métodos

4-1- Análisis agroclimático

Para el análisis de las series temporales de las variables P, T_{máx}, T_{mín} y ETo, se inició con una aplicación metodológica básica, comenzando por la elaboración de los gráficos de las series temporales (con datos anuales y mensuales), donde se evidenciaron fluctuaciones marcadas: anomalías respecto del valor medio en el período 2000-2018, y determinación de la tendencia lineal, además de la obtención de la fórmula de la ecuación y el coeficiente de determinación (R^2) representativa de cada tendencia.

Se realizó un estudio estadístico básico de las variables P, ETo y NF, a través del cálculo de los parámetros: promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de sus valores anuales y estacionales.

A fin de caracterizar a los períodos de crecimiento como normales, secos o húmedos, se calculó en cada localidad analizada, el promedio diario de las P (período 2000-2018). Para considerar la irregularidad de las mismas, tanto en periodicidad como en intensidad, fueron clasificados períodos climáticos húmedos, secos y normales. Para ello se utilizaron los registros promedios históricos diarios, y se los relacionó con las condiciones de P del período de acumulación de la MS en cada corte. Si el valor de P acumulado era superior o inferior en un 25% respecto de las P históricas para ese período de acumulación de la MS, se consideró períodos de excesos o déficit hídricos respectivamente y a los casos restantes neutros.

Este planteo fue basado considerando el siguiente fundamento: la expresión que define sequías o excesos como el “intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de días, meses o años, durante el cual el aporte de las precipitaciones en un determinado lugar, cae consistentemente por debajo de las precipitaciones climatológicas esperadas o el aporte de humedad climatológicamente apropiado” (Palmer, 1965). En esta tesis se consideró un valor umbral del 25%.

Por otra parte, también fue considerada la suma de las P que ocurrieron 15 días previos al inicio del crecimiento de cada período de acumulación de la MS. El referido período de días se debió considerar ya que la producción del modelo AquaCrop es calculada en base a la disponibilidad hídrica inicial. Además se consideró la base de trabajos científicos de distintos autores (Murata

et al., 1966; Moreno, 2009; Altier *et al.*, 2010) que señalan los efectos del estrés por sequía o excesos de precipitaciones, en el crecimiento aéreo y en la morfología y estructura anatómica de la raíz de alfalfa, a pocos días de ocurrir esos eventos. La trascendencia de agrupar los cortes teniendo en cuenta la situación hídrica previa radica en las implicaciones de la simulación en la predicción de la oferta de pasto en situaciones de excesos o déficit hídricos.

4-2- Relación estadística entre producción de biomasa y variables agroclimáticas

Tomando como unidad de análisis la biomasa acumulada por corte, se estudió la relación estadística entre esta variable y la P acumulada en ese período, la ETo y la NF. Para cada relación estadística se determinó la ecuación de mejor ajuste (lineal o polinómica) por mínimos cuadrados y el respectivo coeficiente de determinación R^2 .

4-3- Análisis de la variabilidad anual, estacional y espacial de la MS

A través de la técnica de análisis de la varianza se analizaron: a) las diferencias estadísticas entre las producciones de MS en las distintas localidades (variabilidad espacial), las variaciones de producción entre años del ciclo de crecimiento para cada localidad, las diferencias entre las productividades por período estacional (otoño, invierno, primavera, verano) (variabilidad interestacional), tomando el test de Tukey para determinar la significancia de las diferencias ($p < 0,05\%$).

La variabilidad interanual de las producciones anuales de MS, para cada localidad, se analizó mediante el CV.

A partir del test de diferencias de medias T-Student al 5% se identificaron las diferencias significativas en la duración de los cortes entre localidades, fijando la estación climática, y entre estaciones climáticas, fijando la localidad.

4-4- MODELO AQUACROP

AquaCrop ha sido desarrollado para cultivos anuales, no tiene activo hasta el presente, la opción de “tipo de cultivo de especies forrajeras”. Tampoco se ha establecido la posibilidad de simulación de los cortes periódicos, de manera que en esta tesis se estableció la estrategia metodológica de considerar al período “entre cortes” como si fuera el ciclo de alfalfa. Cada

período considerado establecía una fecha de inicio, que corresponde a la fecha del corte precedente, y una fecha de cosecha (coincidente con la senescencia) que era el día de corte.

En base a la información brindada por la Red, para los cv de GL corta (8-10), se corrió el modelo AquaCrop para cada corte que ocurrió en los tres primeros años, durante el período 2000-2018. En esos ciclos, debido a la marcada estacionalidad en el crecimiento de alfalfa, con contrastes que frecuentemente alcanzaron porcentajes de 60 a 40% entre los períodos de mayor (primavera-verano (P-V), septiembre a febrero) y menor (otoño-invierno (O-I), marzo a agosto) crecimiento de forraje (tabla 5), respecto de la biomasa acumulada por año, se agrupan los cortes en esas estaciones climáticas.

Por otra parte, si bien la metodología utilizada para determinar el momento de corte que considera la Red, fue aplicada por igual en los ensayos a campo en todas las localidades, no son comparables los períodos de cortes si se consideran los días en la acumulación de la biomasa. Por ello, en el modelo, el tiempo de acumulación de la biomasa en cada corte fue asociado a la suma térmica y no al día calendario.

Tabla 5. Producción promedio de biomasa forrajera (período 2000/2018), en cada corte de primavera-verano (P-V) y otoño-invierno (O-I) (Mg MS ha⁻¹), y porcentaje de producción en cada estación de crecimiento, en cada localidad de estudio.

Localidad	Producción por cortes en primavera y verano	Producción por cortes en otoño e invierno	Relación P-V:O-I
Marcos Juárez	3,06±0,96	2,21±0,89	58:42
Manfredi	1,74±0,79	1,16±0,51	60:40
Rafaela	1,94±0,78	1,43±0,67	58:42
Paraná	1,82±0,25	1,52±0,85	55:45
Concepción del Uruguay	1,37±0,03	0,91±0,29	60:40

Dentro del modelo AquaCrop se tiene una serie de módulos que permiten ingresar las variables externas (clima, suelo y manejo), y los parámetros conservativos y no conservativos (propios del cultivo específico). A continuación, se describen de manera general los requerimientos que se tuvieron en cuenta en el proceso de evaluación del modelo:

4-4-1- Módulo de clima

El módulo requiere la caracterización del clima, con frecuencia por lo menos diaria de la mayoría de los elementos del clima. Las estaciones climáticas ubicadas muy próximas al sector

de los lotes experimentales de la Red, facilitó la caracterización de los elementos climáticos de importancia para la evaluación de ETo y el valor real en cada período de crecimiento analizado. La información climática reportada durante el período 2000-2018, fue considerada en forma diaria teniendo en cuenta las siguientes variables o elementos climáticos: Tmax, Tmin, ETo, P, y concentración de CO₂ atmosférica media anual.

4-4-1-1- Cálculo de evapotranspiración de referencia (ETo)

AquaCrop no calcula la evapotranspiración de manera directa; para ello en este estudio se utilizó el software de circulación gratuita ETo Calculator, desarrollado por FAO, el cual es un módulo complementario del software AquaCrop y utiliza el método FAO Penman-Monteith para obtener la ETo en función de variables climáticas y de la localización geográfica (Allen *et al.*, 2006). Este método combina el balance energético con el método de la transferencia de masa y deriva una ecuación para calcular la evapotranspiración de un cultivo hipotético de pasto con características específicas, a partir de datos climáticos de Hel, Tmáx, Tmín, Hr y Vv. Variables que formaron parte de planillas Excel, convertidas algunas según lo solicitado por el software ETo calculator⁽¹⁾. El procesamiento de los datos y la metodología de cálculo para obtener ETo fueron realizados en cada localidad específica de estudio.

Este software permite el cálculo de ETo aún en los casos en que falte alguna de las variables climáticas mencionadas, tal es el caso de Manfredi donde la información de Vv presentó una faltante del 100%.

4-4-2- Módulo de manejo de cultivo

4-4-2-1 Riegos

En la etapa de ajuste del módulo del cultivo de alfalfa no se aplicaron láminas de riego debido a que en las localidades consideradas la producción del cultivo es en secano.

4-4-2-2 Prácticas agrícolas

La mencionada evaluación agronómica de los cv, es llevada a cabo mediante ensayos parcelarios, ubicados en sectores de suelo regional de cada INTA, en este sentido se destaca, que el objetivo es captar la expresión de las diferencias entre los cv, manejados en igualdad de condiciones y que no se permite la semillazón, como forma de evidenciar la persistencia de las

¹ EToCalculator, software de dominio público desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO

plantas originales. En términos generales se manejan condiciones no limitantes de fertilización y protección de los ensayos, para posibilitar la máxima expresión del potencial genético de los cv. Por esta razón se consideraron las condiciones que garantizan un rendimiento potencial de la especie (siembra directa, bien provistos de nutrientes y sin malezas).

4-4-3- Módulo suelo

Este módulo requiere parámetros físicos como Tex, PMP, CC y S. Esta información se refirió a perfiles realizados en la estación experimental INTA de cada localidad analizada y se empleó información de calicatas descriptas por GEO INTA (2015).

Otro parámetro a completar en el módulo es el valor de la Curva Número (CN) de cada localidad y depende del tipo de suelo, de la naturaleza y tipo de cobertura, del estado de compactación en relación a su uso, de la capacidad de infiltración en atención a su Tex y condición previa de humedad. El Servicio de Conservación de Suelos de USA (1965), ha publicado extensas y amplias investigaciones sobre este factor y presentan tablas para seleccionar el valor más representativo de cada situación. Los valores varían entre 1 y 100, siendo mayor cuanto peor sea su situación.

AquaCrop también contempla, según la Tex de cada horizonte de suelo, los valores de flujo no saturado del agua (movimiento capilar) y relaciona esta capilaridad con la profundidad asignada de la napa freática. Los valores asignados respondieron a las determinaciones de los análisis físicos de las diferentes texturas que muestran los suelos en el que se desarrollaron los ensayos de corte de la Red. Los valores de conductividad hidráulica saturada en cada tipo de textura, son considerados por AquaCrop (Raes *et al.*, 2011).

4-4-4- Módulo Napa freática

Se utilizó la información explicada en Tabla 3. En este módulo se especificó la profundidad y la calidad del nivel freático en los momentos del registro realizados en featímetros ubicados en cercanía a las parcelas de corte de la Red de INTA.

4-5-5- Módulo Cultivo

El proceso de creación del módulo para el cultivo de la alfalfa se realizó con base en la información bibliográfica recopilada y el apoyo del conocimiento de expertos en la temática específica de la especie; pues la versión 6.1 (mayo 2018) de AquaCrop, última versión existente

hasta la fecha, no cuenta con este módulo para alfalfa. La FAO viene evaluando y desarrollando investigaciones para el diseño de un módulo de cultivo para forrajeras, pero aun no pudo incluir un módulo de prueba con algunos elementos para especies perennes o con varios cortes en el año.

Existe un conjunto de parámetros del cultivo que se denominan conservativos, pues tienen la característica de que no cambian con el tiempo, prácticas de manejo, localización geográfica o climática. Mientras que los parámetros no conservativos son específicos de la especie, afectados por el clima, el manejo de campo o condiciones del perfil del suelo.

En la Tabla 6 se muestran los parámetros utilizados por AquaCrop en este módulo.

En esta sección y en la sección Resultados se muestran los conceptos teóricos básicos de cada parámetro y los valores de los mismos utilizados en la calibración, obtenidos a través de criterios propios de selección de la bibliografía disponible y de las consultas a expertos; como así también los valores de los parámetros resultantes durante el proceso de calibración.

4-4-5-1 Cobertura máxima del dosel verde, CC (%)

En el proceso de cálculo del modelo AquaCrop, el porcentaje máximo de cobertura verde del dosel bajo condiciones óptimas, es el primer parámetro que se determina. Expresar la cantidad de follaje en términos de cobertura del dosel (en fracción o porcentaje), sería como considerar, indirectamente, el índice de área foliar utilizados en otros modelos de crecimiento. Esta expresión de cobertura del dosel da como resultado una simplificación considerable de la simulación y permite al usuario introducir valores reales de CC, incluso si sólo se estiman de manera visual. La estimación fue realizada a partir de:

- a. Determinar el desarrollo del follaje a través de la cubierta verde de área de hojas en imágenes fotográficas,
- b. $CC = 1,005 [1 - \exp(-0,6 IAF)]^{1,2}$ (Hsiao *et al.*, 2009),
- c. $CC = 1 - \exp(-0,416 IAF)$ (Araya *et al.*, 2016)

El valor final se determinó en el proceso de calibración.

Tabla 6. Parámetros conservativos y no conservativos requeridos en el módulo cultivo (tomado de Manual de Referencia de AquaCrop, Raes *et al.*, 2009).

Fenología del cultivo	tipo
Umbral de temperaturas del aire	
Temperatura Base	Conservativo
temperatura superior	Conservativo
Desarrollo de la cobertura del dosel verde	
Cobertura de la superficie del suelo inicial	Conservativo
Número de plantas por m ²	Manejo
tiempos (crecimiento en °GD)	Manejo
Coeficiente de crecimiento (en °GD)	Conservativo
Máxima cobertura del dosel	Manejo
tiempo inicio a senescencia (en °GD)	Manejo
Coeficiente de declinación del dosel	Conservativo
Tiempo de inicio a momento de corte (longitud del descanso para acumular el crecimiento de la biomasa aérea)	Manejo
Desarrollo de la zona de raíces	
Profundidad de raíz mínima efectiva (m)	Ambiental
Profundidad de raíz máxima efectiva (m)	Ambiental
Factor de forma que describe la expansión de la raíz	Conservativo
Tiempo de inicio a la máxima profundidad de la raíz (crecimiento en °GD)	Ambiental
Transpiración del cultivo	
Coeficiente de transpiración cuando el dosel se encuentra en el máximo	Conservativo
Factor de reducción o declinación del cultivo (%/día)	Conservativo
Máxima extracción del agua por la raíz (m ³ .m ³ .día)	Conservativo
Efecto de la cobertura del dosel sobre la disminución de la evaporación del suelo	Conservativo
Productividad del cultivo por el agua	
WP* Productividad hídrica normalizada para ETo y CO ₂ (g/m ²)	Conservativo
Índice de cosecha	
Índice de cosecha de referencia (%)	Manejo
Estrés hídrico del suelo	
Umbral inferior de agotamiento del agua en el suelo para la expansión del dosel	Conservativo
Umbral superior de agotamiento del agua en el suelo para la expansión del dosel	Conservativo
Factor de forma para el estrés	Conservativo
Umbral superior de agotamiento de agua de suelo para el control estomatal	Conservativo
Factor de forma para el cierre de estomas	Conservativo
Umbral superior de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel	Conservativo
Factor de forma para la senescencia del dosel	Conservativo
Punto anaeróbico en % vol suelo respecto a la saturación	Ambiental
Estrés de la temperatura del aire	
Mínimos de °GD requeridos para producción de biomasa (día °C)	Conservativo

4-4-5-2 Días a la cobertura máxima del dosel (máx CC)

Este parámetro especifica cuantos días demora el cultivo en alcanzar el nivel máximo de cobertura del dosel. Para considerarlo se calculó la acumulación en grados día (GDA) que ocurrió entre cortes sucesivos. El modelo también contempla la disminución del canopeo o senescencia. En alfalfa, se señala que la biomasa perdida por senescencia es prácticamente despreciable (Brown *et al.*, 2006), mediciones efectuadas durante rebrotes prolongados muestran que la biomasa senescente alcanza valores del 7-10% del total del crecimiento acumulado (Berone *et al.*, 2017).

Como metodología se contabilizó el tiempo transcurrido en crecimiento en GDA desde inicio del corte anterior hasta la máxima cobertura del dosel y senescencia, determinado a partir de las evaluaciones de la Red. Se estimó que antes de alcanzar el inicio de la senescencia la especie se encuentra en su máximo crecimiento y debe ser defoliada. Se contabilizó los GDA acumulados en cada corte ensayado en el modelo.

4-4-5-3 Índice de cosecha (HI)

El índice de cosecha (HI) es un parámetro que establece una relación entre la biomasa y el rendimiento del cultivo, este parámetro es conservador en el programa. Para las especies no forrajeras este índice se evalúa considerando la materia seca total del cultivo y el rendimiento cosechado. En cultivos de hojas no se diferencia este índice pues su producción se orienta a obtener todo lo producido en el crecimiento. Por otro lado, de acuerdo a resultados experimentales en raigrás, para una altura de corte de 7 a 10 cm del suelo, se obtuvo un índice de cosecha del 83% (Terán Chaves, 2015). No se desconoce que el HI debería analizarse específicamente en los ensayos de corte del cultivo de alfalfa. Al respecto, Sevilla (2004) registró eficiencia de cosechas del 70% en ensayos de pastoreo en la E.E.A Concepción del Uruguay del INTA y Schneider *et al.* (2001), expresan que es factible de ser alcanzado un valor del 70%. Para alfalfa cuyo producto es el heno está entre el 40% al 90%, según Doorenbos y Kassam (1979). En el caso particular de este trabajo, se ajustará en el proceso de calibración el porcentaje de cosecha mediante una aproximación progresiva de valores a partir del 70%, orientado en la metodología de la Red, consulta a expertos y bibliografía de referencias.

4-4-5-4 Umbrales de temperatura del aire

Existen numerosos trabajos, en alfalfa, donde están estudiadas el comportamiento de la especie y los parámetros térmicos para su crecimiento y desarrollo (Doorenbos y Pruitt, 1977; Al-Hamdani y Tood, 1990; Collino *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2005; Thiébeau *et al.*, 2011). Se consideró una óptima de 25°C y una máxima de 35°C.

La temperatura mínima a la cual el desarrollo del cultivo ya no progresa (temperatura base, T_b), fue analizada con mayor detalle. Su metodología es descripta a continuación.

4-4-5-5 Temperaturas Base (T_b)

Los procesos que hacen parte del balance hídrico del modelo, están relacionados con el desarrollo del cultivo, sus etapas fenológicas y, lo más importante en este estudio, la producción de biomasa aérea forrajera. Para ello es una característica esencial de AquaCrop proporcionar el valor de T^o_b .

Para realizar un análisis más profundo del cultivo de alfalfa en sus distintas fases fenológicas y el efecto de la temperatura en este proceso, se analizaron los grados días acumulados (GDA). En tal sentido y con el propósito de realizar una descripción del efecto de la temperatura en el comportamiento del cultivo, se dividió al ciclo del cultivo en 2 grandes etapas: vegetativo (períodos de cortes antes de la estación climática de floración O-I) y reproductivo (estación climática P-V).

El concepto de GDA es una variable que utiliza el modelo AquaCrop como parámetro conservativo de la especie. Para realizar el cálculo del mismo se considera la T_b a partir de la cual alfalfa activa su función de crecimiento y/o desarrollo (Daubenmire, 1974). Estudios previos y con una T_b igual a 5°C, indican que alfalfa alcanza el estado de botón floral o 5 cm de rebrote basal a los 350 a 400 GDA durante P-V (Sardiña *et al.*, 2015 a y b), otros señalan 550 a 600 GDA durante el estado reproductivo (Berone y Dreher, 2007; Teixeira *et al.*, 2011; Baldissera *et al.*, 2014) o entre 400 a 700 GDA en O-I (Quiroga Garza, 2013).

En base a la bibliografía consultada, se realizó una indagación de los GDA en cada corte, utilizando como datos los días transcurridos entre cortes sucesivos, la temperatura media en ese período y la T_b de 5°C (tabla 7).

Tabla 7. Grados días de crecimiento acumulados promedio (GDA) por período de corte estacional y su variabilidad (CV, %), considerando como temperatura base (Tb) 5°C.

		Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
Primavera/verano	Nº de cortes (2000-2014)	143	82	105	74	73
	GDA promedio por corte (°C)	555±117	494±90	571±132	613±178	673±204
	Variabilidad (CV=%)	21	18	23	29	29
Otoño/invierno	Nº de cortes (2000-2014)	43	41	98	45	29
	GDA promedio por corte (°C)	558±167	493±114	528±152	564±110	631±225
	Variabilidad (CV=%)	30	23	29	20	36

Del análisis de los GDA señalados en la bibliografía y los calculados, se observa discrepancia entre los valores ($p < 0,05$) y una gran variabilidad en aquellos calculados en base a cada corte realizado en los ensayos de la Red. Por lo tanto, y con el fin de indagar cuál será la Tb más conveniente a utilizar en los períodos de crecimiento O-I y P-V, se aplicarán diversos métodos de análisis de la misma. Para este trabajo se calculó la Tb a través de los métodos descriptos por Arnold (1959):

- Método de menor variabilidad;
- Método del coeficiente de regresión
- Método de intercepción de la x.

Descripción:

- Método de menor variabilidad:

A partir de una serie de datos de cortes se calcula GDA en cada período, probando distintas Tb, y por eliminación se eligió la de menor variabilidad, característica determinada por medio del coeficiente de variación (CV, %).

Para ello, fue considerado el promedio entre T_{máx} y T_{mín} diarias y restando la Tb, para cada uno de los días transcurridos durante el ciclo de los mismos (Arnold, 1959). Se tomó como Tb desde 0 a 12°C, en los cortes de O-I y P-V. La fórmula empleada para obtener los grados día fue la siguiente:

$$\text{GDA} = ((T_{\text{max}} \text{ diaria} + T_{\text{mín}} \text{ diaria})/2) - T_b$$

Se determinó el CV, el Tb correcto será aquella que tenga la menor variabilidad.

b) Método del coeficiente de regresión

Este método desarrollado por Yang *et al.* (1995), consiste en calcular una ecuación de regresión usando la temperatura media del período de acumulación de MS como la variable independiente y GDA en dicho período como la variable dependiente. Se contrastan las ecuaciones de regresión de la serie de Tb, y el Tb correcto es aquella donde la pendiente de la ecuación es igual a cero. Si las Tb son demasiado altas, las pendientes son positivas y si son demasiado bajas, las pendientes son negativas.

c) Método de intercepción de la x:

Este método se basa en el análisis de la temperatura media de crecimiento del ciclo y en la tasa de crecimiento que se puede medir como el inverso de la duración en días o tasa equivalente. Con estos valores se calcula la ecuación de regresión, siendo ubicada la temperatura media en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas en crecimiento equivalente. Finalmente, para obtener la Tb se resuelve la ecuación con $y = 0$, donde gráficamente el valor se representa en la intercepción de la recta con el eje de las abscisas.

*Como fuente de datos para validar los resultados del Tb, se utilizaron los datos de la Red, de todas las localidades estudiadas en las series de corte 2000-2018.

4-4-5-6 Duración del ciclo (crecimiento acumulado de la biomasa)

Parámetro especificado por los días o GDA entre fechas de cortes. Se determinará por la suma térmica del período, desde la fecha del corte anterior hasta el momento del corte, a partir de los GDA, considerando la Tb que resulta del estudio metodológico.

4-4-5-7 Profundidad efectiva de las raíces de alfalfa (Ze)

La absorción de agua por las raíces en AquaCrop se simula definiendo la profundidad efectiva de las raíces (Ze). El modelo considera esta profundidad desde el punto previo a la emergencia de la especie en la cual la plántula naciente puede extraer agua. En alfalfa, algunos estudios revelan que, en condiciones favorables, por ejemplo en suelos Haplustoles típicos de Villa María, Córdoba, pueden llegar entre 80 y 150 cm de profundidad a los 120 días de sembrada la especie (Bonadeo *et al.*, 2006) hasta 2,10 m o 3 m de profundidad efectiva en dos años, a 4,6

m al cabo de tres años (Jung y Larson, 1972 y Jun *et al.*, 2009). Otros autores (Collino, *et al.*, 2007) asumen que, durante el primer año, el cultivo es capaz de aprovechar gran parte del agua útil almacenada en el perfil del suelo hasta 3,5 m de profundidad. A partir de esta información bibliográfica, se estableció en 3,5 m la profundidad máxima efectiva en todas las localidades. Para las etapas iniciales de crecimiento de la especie, se ubicó el valor en 1,5 m.

Otro parámetro que deberá ser considerado es la velocidad de crecimiento de la zona de expansión de las raíces en el tiempo. El mismo responderá al estrés hídrico, de una forma lineal (fuerte relación de estrés) o más convexa (más resistente al estrés). Bradford y Hsiao (1982) analizan que puede disminuir el crecimiento del dosel a medida que se agota el agua de la zona radical mientras que la profundidad de las raíces continúa sin disminuir. A tal efecto se asignó el factor forma de la curva igual a 5, al ser considerada una especie moderadamente resistente al estrés hídrico (Brown *et al.*, 1972).

La extracción de agua por parte de las raíces sigue el patrón 40 por ciento, 30 por ciento, 20 por ciento y 10 por ciento del agua requerida se absorbe desde el cuarto superior al cuarto inferior de la profundidad efectiva del tapiz de alfalfa, cuando el contenido de agua es adecuado (Walley *et al.*, 2005; Gregory, 2006; Gregory *et al.*, 2009).

4-4-5-8 Evapotranspiración (ET)

4-4-8-8-1 Coeficiente de evaporación del suelo (K_e)

Para el caso de alfalfa, cuando el dosel se encuentra en el momento de ser cortado, no presenta fracciones significativas en la senescencia de las hojas, variable que se cancela. La reducción de la evaporación del suelo (K_e) que ocurre cuando la cobertura del dosel es máxima y se produce el corte, no debería ser alta. El suelo permanece bien cubierto por el dosel verde. El valor será obtenido mediante aproximaciones sucesivas de valores simulados, en la calibración, a partir de la integración bibliográfica existente y los rangos de variación, considerado en otras especies, que analizan Allen *et al.* (1998), Raes, *et al.* (2006); Steduto *et al.* (2012); Terán Chaves (2015), Ruiz *et al.* (2018).

4-4-8-8-2 Coeficiente de transpiración de la especie (K_c)

Se calibró el modelo utilizando el máximo valor K_c presentado por Allen *et al.* (2006) y French y Legg (1979), que corresponde a 1,15. La elección se basó en el siguiente fundamento: como cultivo perenne, la alfalfa puede producir MS durante todo el año si las condiciones ambientales

son favorables. Durante el período de crecimiento más activo desde la primavera hasta el otoño, los valores diarios de ET están impulsados por la interacción del medio ambiente y la defoliación.

Para asignar un factor de ajuste por declinación del canopeo, sistema estructuralmente complejo respecto a valores reportados en la bibliografía en hojas aisladas, y al no existir datos específicos en la especie que pueda orientar el valor, se consideró una declinación de 0,5% día⁻¹ luego de llegar al máximo de cobertura, valor en concordancia a lo analizado por Thomas y Howarth (2000) y Terán Cháves (2015).

4-4-5-9 Productividad hídrica del cultivo normalizada (WP*)

La producción de MS diaria como la acumulada (B), se obtiene de la productividad normalizada de agua de la biomasa (WP *). Ambas resultan afectando esa WP* en la relación de la transpiración diaria del cultivo (Tr) y la evapotranspiración de referencia para ese día (ET_o) (Steduto *et al.*, 2007).

$$\text{Producción MS diaria} = \text{WP}^* \left[\frac{\text{Tr}}{\text{ET}_o} \right] \quad (\text{ecuación 1}); \quad B = \text{WP}^* \sum \left[\frac{\text{Tri}}{\text{ET}_{oi}} \right] \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde

WP* = productividad hídrica normalizada y ajustada (g biomasa m⁻² mm⁻¹)

B_i = biomasa aérea diaria producida en el día i (g m² o Mg ha⁻¹)

Tri = transpiración diaria del cultivo en el día i (mm)

ET_{o,i} = evapotranspiración de referencia para el día i (mm)

La WP* normalizada se fundamenta en poder comparar el uso del agua necesaria para la producción de la MS (diaria y/o acumulada), bajo diferentes ambientes y cultivos. Esa normalización se logra ajustando WP para:

- a- CO₂ en el aire, se considera una concentración promedio equivalente para el año 2000 de 369,41 ppm. Este valor es el observado en el Observatorio Mauna Loa en Hawai (USA).
- b- el clima, se obtiene de la división de la cantidad de agua transpirada (Tr) con la evapotranspiración de referencia (ET_o) y
- c- unidad de producto sintetizado a partir de la ruta metabólica que siguen, los cuales pueden ser C3 o C4 y se han generado tablas de referencia para la mayoría de ellos (Steduto y Albrizio, 2005).

- d- Steduto *et al.*, (2007) y Steduto *et al.*, (2009). Se señala que aquellas especies C3 presentan valores en rangos de 15 a 20 g m⁻² mm⁻¹.

El concepto de la productividad hídrica de la biomasa (WP) es considerada por otros autores como la eficiencia en el uso del agua en los procesos del crecimiento de las plantas (EUA) (Medrano *et al.*, 2007; Salazar-Moreno *et al.*, 2014), definición que será considerada en la discusión de los resultados logrados en la producción de MS en alfalfa por estaciones de crecimiento y localidades. Se seleccionó el valor más bajo (15 g m⁻² mm⁻¹), aunque este valor podría ser aún inferior debido al proceso de fijación biológica de nitrógeno que tiene la especie (Raes *et al.*, 2012; González-Robaina *et al.*, 2019).

4-4-5-10 Estrés

Los estreses abióticos -hídricos y térmicos- pueden tener impactos negativos importantes en el dosel y la producción de biomasa, dependiendo en el momento en que ocurran, su severidad y duración. El estrés por salinidad puede tener un impacto negativo, pero es menos dinámico en términos de velocidad en la respuesta y recuperación. Todas las clases de estrés que describe el modelo utilizan un coeficiente de estrés (Ks), que indica la intensidad relativa del efecto sobre un proceso y una etapa de crecimiento específica. La particularidad del modelo AquaCrop es que Ks es un valor modificado por un parámetro “conceptual” del grado de estrés, por ejemplo sensible, moderadamente sensible, moderadamente tolerante, tolerante y extremadamente tolerante. La elección del parámetro se relacionará con el porcentaje de afectación en la expansión del canopeo, en el cierre de estomas, en la senescencia temprana del canopeo y en el estrés por aireación del suelo.

La proporcionalidad de la respuesta relativa del estrés será considerada por la forma de la curva Ks (lineal o convexa). El modelo determina que el factor de forma puede variar de +6 (fuertemente convexo) a 0 (lineal). Al no existir trabajos en alfalfa que pudiesen orientar el factor forma en cada estrés que el modelo analiza, se calibró con el valor convexo medio, factor=3. Se definirán los niveles de resistencia, en cada tipo de estrés (térmico e hídrico), que requiere el modelo a partir de fuentes bibliográficas.

4-4-5-11 Salinidad

La conductividad eléctrica promedio del estrato de suelo saturado (ECe) de la zona radicular es el indicador que utiliza el modelo para analizar el estrés por salinidad del suelo. En el umbral

inferior el K_s es menor a 1 y el estrés comienza a afectar la producción de la biomasa. El K_s se vuelve cero en el umbral superior para la salinidad y el estrés es muy severo que detiene la producción de la biomasa. Los valores de E_{ce} para alfalfa son dados por diversos autores, quienes consideraron a este cultivo como moderadamente sensible a la salinidad del suelo, la cual incluye el complejo total de sales disueltas en la solución del suelo. Lo anterior indica que la reducción de rendimiento en relación con la CE_{es} , medido en $dS\ m^{-1}$, es de 0% para valores menores que $2\ dS\ m^{-1}$, hasta de 25% de reducción en el rendimiento para valores de $8\ dS\ m^{-1}$ en la zona de exploración radicular (Kovda, 1973; Maas y Hoffman, 1977; Doorenbos y Kassam, 1979; Santamaría *et al.*, 2004). Los valores considerados para la calibración fueron: $2\ dS\ m^{-1}$ (límite inferior) y $8\ dS\ m^{-1}$ (límite superior), respondiendo al atributo moderadamente sensible.

4-5-6 Módulo de condiciones iniciales

Para iniciar la simulación se debe fijar previamente tres variables:

- a- El tamaño inicial del canopeo, como porcentaje de suelo cubierto, en base a la densidad de plantas observadas. Determinación que será evaluada en relación al número de plantas iniciales y la estimación de su cobertura basal.
- b- Calificar el estado del contenido de agua del perfil edáfico (PMP, cc y S o la fracción del agua disponible = TAW). De acuerdo a la presencia o no de restricciones hídricas establecidas, el modelo tiene en cuenta esas humedades para iniciar el crecimiento del cultivo.

Se determinará la condición de la humedad inicial del suelo a partir del conocimiento, por los aportes bibliográficos, del tipo estructural del mismo característico de cada localidad. Para el particular, se considerarán rangos en momentos de déficit o excesos hídricos (capacidad de campo a punto de marchitez). El valor será determinado en el proceso de la calibración.

- c- Determinar la cantidad de biomasa aérea previa (B_i), relacionada al remanente que se dejaría luego de la defoliación. Este remanente es observado en el modelo como cobertura del dosel, se ajusta a las ecuaciones de crecimiento inicial del tapiz y al valor de la evaporación en el estado inicial previo a ejecutar la simulación.

La construcción del valor de la biomasa previa dependerá del corte anterior y de la estación de crecimiento. En general, este valor fluctúa, y debería realizarse estudios a campo, no obstante se encontrará con el procedimiento de evaluar aquellos valores bibliográficos y determinar por el mejor de los ajustes.

4-5-7 Proceso de calibración del modelo Aquacrop

El esquema de trabajo para el ajuste del modelo AquaCrop tiene como punto de partida la definición de los parámetros Conservativos y No Conservativos, los cuales son asignados de acuerdo al uso de los datos secundarios y a la disponibilidad de información científica. Estos juegan un papel determinante en el proceso de la calibración del modelo, pues son el criterio que permite aprobar o desaprobado el ajuste, en tanto que los valores simulados son comparados (haciendo uso de una medida de ajuste apropiada) con los resultados obtenidos de la Red. Si el ajuste obtenido no es el adecuado se procede a cambiar algún/algunos parámetros conservativos y se vuelve a iniciar el proceso de ajuste.

El procedimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de Hsiao *et al* (2012). La calibración del módulo cultivo se inició en la localidad de Marcos Juárez. El mismo requiere de un conjunto de datos mínimos para comenzar la operación de simulación, como ser: modelo de siembra, fecha de siembra, densidad de plantas, si se fertilizará o se regará. Datos considerados a partir de la información de la metodología utilizada por la Red.

Para iniciar la calibración se eligió un conjunto de cortes primaverales, en el primer ciclo de crecimiento y en años húmedos. La biomasa aérea acumulada en cada corte fue el valor que se buscaba contrastar en la corrida del modelo. Se seleccionó cortes en períodos húmedos debido a que el nivel de agua inicial del suelo, previo a cada corrida, condiciona el punto de partida del balance hídrico. El criterio de análisis fue iniciar la simulación sin limitantes hídricas y considerar ese perfil edáfico a capacidad de campo.

Posteriormente, se procedió a simular aquellos parámetros que fueron fijados en la metodología a partir de las fundamentaciones bibliográficas. Los mismos fueron: grados días a la cobertura máxima del dosel, temperatura máxima del aire que limita el crecimiento (umbral superior), grados días en la duración del ciclo de corte, profundidad efectiva de las raíces de alfalfa, coeficiente de transpiración de la especie a máximo dosel.

A partir de este conjunto de parámetros, se inició el proceso de determinar, otro conjunto que también participa en la modelación y que debía ser obtenido específicamente para la especie.

Los parámetros considerados fueron: la cobertura inicial del dosel (CDo), relacionado con la densidad de las plantas por unidad de superficie y la cobertura de la planta (cm^2). Luego de ser calculado, se contrastó los resultados de la cobertura máxima del dosel al momento de corte en P-V y O-I (CCmáx). Se diferenció un índice de cosecha para orientar a la obtención de biomasa como forraje (HI). El modelo utiliza temperatura mínima del aire que limita el crecimiento (T_b), así fue estimado ese valor para los crecimientos de P-V y O-I. Un cuarto parámetro fijado, por aproximaciones sucesivas de valores, fue el de la evaporación del suelo cuando el canopeo se excuentraba en su máxima expresión (K_e). Finalmente, se analizó los niveles de estrés hídrico y térmico que pueden tener impacto sobre la producción de biomasa en la especie. Estos fueron abordados de diferentes formas de acuerdo se presentaban en la literatura.

Se modelaron numerosos cortes de años húmedos de la localidad de Marcos Juárez, luego se probaron cortes de años normales. Un problema detectado fue que no se lograba acercar los valores de biomasa estimada con la biomasa observada, en los cortes de la estación O-I. A partir de ello, se pensó que, como la T_b era un elemento clave en la definición de los grados días en los períodos de corte y sabiendo que gobernaba algunas de las ecuaciones del crecimiento de la cobertura aérea del canopeo en el modelo, podría ser distinta al valor probado en P-V. Asimismo, se apoyó este planteo en base a artículos científicos que discutían considerar un único valor de temperatura base (T_b) en la especie (Sharratt *et al.*, 1986, 1987, 1989; McKenzie y McLean (1980, 1982), Sanderson, *et al.*, 1994). Razón por la cual el valor fue modificado, y se logró mejorar las biomásas en la salidas del modelo.

Finalmente, y sabiendo que la producción de la biomasa se ve afectada por situaciones de sequía, se procedió a probar los parámetros en períodos de cortes caracterizados como secos. Para ello, se ajustó el parámetro inicial de la humedad edáfica, variando el total de agua disponible (TAW) en rangos del 30 al 50% de la capacidad de campo (CC). Por otra parte, el modelo distingue la presencia de una cantidad de biomasa inicial antes de cada período de análisis, variable que se formuló en un rango supuesto de 200, 500 y 1000 kg ha^{-1} .

Se continuó con este procedimiento repetidamente, realizando pequeños ajustes, hasta que los resultados simulados ajustaron con los resultados observados en los cortes de la biomasa aérea en los ensayos de la RED Marcos Juárez a niveles aceptables. Posteriormente se repitió el proceso en las restantes localidades, modificando las variables climáticas, edáficas y profundidad de la napa freática que correspondía a cada una de ellas. En cultivo solo se modificó los grados días en la duración de la fase inicial del crecimiento, máxima cobertura del dosel y

momento de corte. Los restantes parámetros fueron los explorados para la localidad de Marcos Juárez.

4-5-8- Proceso de validación del modelo Aquacrop

Para la validación se usaron todos los cortes que figuraban en la Red, período 2015-2017, en cada localidad. Cada uno de los cortes fue validado a partir de cada variable calibrada. Solo se adecuaba la situación inicial según situación precedente de seco, húmedo o normal y ciclo de crecimiento (1er a 3er. ciclo). Además, en este procedimiento se tuvieron en cuenta las variables de clima y suelo correspondientes para cada localidad. Como criterio de aceptación de la validación se determinó que los indicadores estadísticos estén en un rango de valoración de “aceptables”. Una vez validados todos los cortes se calcularon los estadísticos de ajuste del modelo para todas las localidades.

4-5-9- Indicadores estadísticos en la calibración y validación del modelo AquaCrop

Las variables de salida del modelo se encuentran agrupadas en variables de clima-suelo-agua, perfil de agua en el suelo, salinidad del suelo, balance hídrico y producción. Los primeros grupos presentan gráficas explicativas donde es posible visualizar variables como la transpiración, la cobertura del dosel o la humedad del suelo a lo largo del ciclo de crecimiento de cultivo. De esta información solo se consideró:

- La producción potencial (PP), la cual es reportada en ton ha^{-1} e implica asumir una producción sin limitantes de ninguna índole.
- La biomasa producida como resultado del proceso de modelación del crecimiento de la especie y es la variable inmediata anterior al rendimiento en MS.
- El rendimiento neto es la variable que para el presente estudio será el principal parámetro a analizar y desde aquí será la producción estimada (PE).

El modelo calcula el total de la biomasa producida y separa de ese total el PE como una fracción de cosecha. La calibración fue realizada mediante la comparación entre la serie de PE con la MS acumulada en los cortes secuenciados de los registros disponibles en la Red (PO) para diversos ciclos de crecimiento (primer a tercer ciclo, registrados en el período 2000-2014).

El agrupamiento estacional de las producciones de MS, fueron contrastadas para períodos de déficit, excesos o normales. Estas consideraciones permitieron calibrar el modelo AquaCrop,

con 72 corridas por localidad. Las que surgieron de considerar 12 cortes, en cada período de crecimiento (P-V y O-I), en cada situación hídrica (déficit, excesos y normalidad).

Para la validación se utilizaron los cortes estacionales de 2015-2017, sumando aproximadamente de 12 a 17 corridas más del modelo según localidad.

Los parámetros estadísticos para analizar el grado de ajuste tanto en la calibración como en la validación del modelo fueron:

4-5-9-1- Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) es definido como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. R^2 puede ser también interpretado como la magnitud de la varianza explicada por el modelo comparado con la varianza total observada. El rango de valores que puede tomar se encuentra entre 0 y 1. Cuando R^2 es cercano a 1 indica una buena agregación de los resultados del modelo con los datos observados y, normalmente, valores por encima de 0,5 son considerados como aceptable en las simulaciones (Moriassi *et al.*, 2007). Además se analizaron los límites de confianza (Li (5%), Ls (95%)) de la pendiente y la ordenada al origen de la recta de regresión entre PE y PO obtenida mediante el método de mínimos cuadrados.

4-5-9-2-Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

Es uno de los indicadores estadísticos más utilizados (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Esta variable tiene como ventaja que mide la magnitud media de la diferencia entre los valores observados y los simulados en las mismas unidades, aplicándose para evaluar el rendimiento del modelo. Toma valores desde 0 hasta $+\infty$, indicando un buen ajuste con el primer valor y pobre con el segundo. Sin embargo, no diferencia entre sobrestimaciones y subestimaciones. El criterio impuesto de que la calibración y validación del modelo cumplen en cuanto a este estadístico, se establece, como límite superior, en un $\pm 20\%$ del valor máximo observado de la variable que se analice.

4-5-9-3- Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE)

Debido a que RMSE es expresado en las unidades de la variable de estudio, esto no permite que el modelo sea comprobado bajo un amplio rango de condiciones climáticas (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Por tanto, RMSE puede ser normalizado usando el valor medio de la

variable observada. NRMSE se expresa como porcentaje y es una indicación de la diferencia relativa entre los datos obtenidos por el modelo y las observaciones.

Un NRMSE inferior al 10% puede ser considerada como excelente, buena si se encuentra entre un 10% y un 20%, aceptable para un porcentaje entre un 20% y 30% y mala si es mayor de un 30% (Bannayan y Hoogenbom, 2009; Raes *et al.*, 2012).

4-5-9-4- Eficiencia del Modelo de Nash-Sutcliffe (EF)

La eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe determina la magnitud relativa de la varianza de los residuos comparado con la varianza de los valores observados (Nash y Sutcliffe, 1970; Loague y Green, 1991). Otra forma de ver el estadístico es cómo se ajusta la representación de los datos observados frente a los simulados en la recta 1:1 (Moriassi *et al.*, 2007). Es una medida de la robustez del modelo y cuyo rango va de $-\infty$ a 1. EF de 1 indica una coincidencia perfecta entre los datos observados y simulados, un EF de 0 indica que las predicciones del modelo son tan próximas como el valor medio observado y un EF negativo ocurre cuando la media de las observaciones tiene una mejor predicción de lo que resulta en el modelo (Raes *et al.*, 2012). EF es muy usado pero, al igual que ocurre con el R^2 , este indicador no es muy sensible a las sobrestimaciones o subestimaciones del modelo. El criterio utilizado para este estadístico es que, en la calibración y la validación de los modelos, se obtengan valores de EF superiores a 0 para las variables de estudio.

4-5-9-5- Índice de agregación de Willmott o estadístico “d”

Este estadístico representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial (Willmott, 1982). El rango de este estadístico se encuentra entre 0 y 1, donde 0 indica que no se tiene ajuste alguno y 1 indica un ajuste perfecto entre los datos observados y los predichos por el modelo. La desventaja que ofrece este estadístico es que se pueden obtener valores relativamente altos (sobre 0,65) incluso cuando la robustez del modelo es pobre. Así mismo, este índice no es muy sensible a las sobrestimaciones o subestimaciones sistemáticas (Krause *et al.*, 2005). En este sentido, el criterio establecido es de obtener valores superiores a 0,65 en la calibración y validación de los modelos.

4-5-10- Simulación de otras condiciones hídricas para evaluar la presencia o ausencia de napa freática

Para examinar si la nueva incorporación de la variable NF, en el modelo AquaCrop, mejora las predicciones en las producciones de la biomasa forrajera, se consideró analizar la participación de la presencia o ausencia de la misma en las salidas del modelo y reconocer si se presentan limitaciones en su uso. A tal fin, se tomaron un grupo de cortes observados de biomasa aérea, en cada período climático y localidad, y se corrió el modelo con la presencia o ausencia de la NF. Para identificar patrones que indiquen que el valor de la diferencia de biomasa entre la respuesta del modelo con y sin NF, se relacionaba a la profundidad del nivel freático, en cada período de crecimiento y localidad. Una vez terminado el proceso considerando o no la NF, se establecieron análisis estadísticos (diagramas de dispersión y matriz de correlación), con el fin de evaluar el desempeño del uso de la NF en el modelo.

4-5-11 Comportamiento del modelo respecto a la eficiencia en el uso del agua

Por su condición de especie perenne y presentar distintas estrategias en el uso del agua del suelo, se analizó la producción de MS en función al consumo de agua del sistema suelo-clima-crecimiento (EUA). Este análisis fue considerado en diversas condiciones ambientales de estrés hídrico en cada localidad. Se discutieron los mecanismos de adaptación de la eficiencia de uso del agua a partir de la información que brindaba el modelo AquaCrop y se contrastaron esos valores con valores bibliográficos nacionales e internacionales.

4-6- ÍNDICE DE VALORACIÓN DE LOS CULTIVARES (Iv)

4-6-1- Tipo de información de la producción de biomasa aérea que proveerá al Índice de valoración

Se utilizó información de la Red, referida a producción de MS, GL y resistencia a plagas y enfermedades. La evaluación se realizó durante los ciclos productivos consecutivos del 2000/2001 al 2016/2017. En cada localidad de estudio (Rafaela, Manfredi, Marcos Juárez, Paraná y Concepción del Uruguay), se analizaron 94 cv comerciales con GL corta (GL 8 a 10). La producción de MS acumulada fue expresada en Mg MS ha⁻¹año⁻¹ y surge de la suma de los cortes parciales por años productivos. Solo se consideraron los dos primeros años desde la siembra.

Para analizar el comportamiento de los cultivares en sus rasgos genéticos de resistencias bióticas (plagas y enfermedades), se consideró el GL a los que pertenece cada cultivar y su

comportamiento frente a los pulgones moteado (*Therioaphis maculata*), verde (*Acyrtosiphum pisum*) y azul (*A. kondoi*) y a las enfermedades fitóftora (*Phytophthora megasperma f sp medicaginis*), fusariosis (*Fusarium oxysporum f sp medicaginis*) y antracnosis (*Colletotrichum trifolii*). Los parámetros cualitativos asignados a cada cultivar de susceptibilidad (incapacidad de la planta para restringir la actividad de una plaga), resistencia (capacidad de la planta de restringir la actividad de una plaga) y tolerancia (capacidad de la planta para soportar una plaga, produciendo a pesar del desorden) fueron transformados en valores cuantitativos discretos para poder analizar estadísticamente las cualidades en cada cv.

Las cualidades reconocidas en el descriptivo sanitario de la variedad, clasifica para una plaga o enfermedad determinada, el grado de resistencia en seis niveles: tolerante, susceptible (0 a 5% de resistencia), baja resistencia (6 a 14% de resistencia), moderada resistencia (15 a 30% de resistencia), resistente (31 a 50%) y alta resistencia (mayor a 50% de resistencia). Se realizó la transformación de los referidos niveles en variables cuantitativas discretas, las cuales fueron transformadas desde: tolerante = 1, hasta el nivel de alta resistencia = 6.

4-6-2- Construcción del Índice de valoración

Para la construcción del Iv se utilizó información de la Red, referida a resistencia a plagas y enfermedades. Los pasos y criterios para desarrollar el Iv fueron:

i) Transformar las variables cualitativas resistencia a plagas y enfermedades (resistencia de los pulgones moteados (*Therioaphis maculata*), verdes (*Acyrtosiphum pisum*) y azules (*A. kondoi*) y comportamiento a las enfermedades fitóftora (*Phytophthora megasperma*), fusariosis (*Fusarium oxysporum*) y antracnosis (*Colletotrichum trifolii*) en variables cuantitativas. Para ello se tomó la siguiente escala para la transformación:

- materiales sin registros de resistencias: valor 1,
- materiales susceptibles (0 a 5% de resistencia) se le asignó el valor numérico 2;
- baja resistencia (6 a 14% de resistencia): valor 3,
- resistencia moderada (15 a 30% de resistencia): valor 4,
- resistente (31 a 50%): valor 5 y,
- alta resistencia (mayor al 50%): valor 6

ii) Se realizó un análisis de CP sobre las variables de resistencias genéticas para conocer el aporte de éstas a la estructura de varianzas – covarianzas.

iii) Se determinó que la primera CP representaba el Iv

iv) Se subdividió en terciles Iv, generando tres agrupamientos entre los cv (grupo I mayor resistencia y grupo III menos resistente).

4-6-3- Evaluación del Iv

La evaluación se realizó durante los ciclos productivos consecutivos del 2000/2001 al 2016/2017. En las cinco localidades se analizaron 94 cv de latencia corta. La producción de MS fue expresada en Mg MS ha⁻¹año⁻¹ y surge de la suma de los cortes parciales por años productivos. Solo se consideraron los dos primeros años de la siembra, previo supuesto de homogeneidad de varianzas.

Se analizó la relación lineal entre el Iv y los rendimientos en cada localidad tomando como unidad de análisis cada cultivar. Para ello se utilizó la metodología de correlación canónica (Tabachnick and Fidell, 2013).

En cada localidad se compararon las producciones promedio de cada grupo obtenido, con los valores registrados en años con excesos o déficit de precipitaciones y normales. Para cada grupo se determinó el CV para las tres situaciones hídricas.



RESULTADOS

5- Resultados

5-1- Análisis agroclimático

La marcha anual de los valores de P, T_{máx}, T_{mín} y ETo, se representan sobre un eje de coordenadas ortogonales (figura 1). Las P presentan un patrón estacional en las localidades, definido por valores máximos en el semestre cálido y un mínimo en el semestre frío. El mínimo invernal está más definido en el oeste y es menor la diferencia con los máximos a medida que nos trasladamos hacia el este, en consecuencia el régimen de P se clasifica de oeste a este como un régimen monzónico a semi-monzónico.

Si analizamos la deficiencia potencial de agua, diferencia entre P y ETo, se determina una disminución de la misma desde las localidades más occidentales hacia las orientales, no obstante, el déficit potencial de agua de mayor importancia se produce durante los meses de diciembre y enero en todas las localidades, como resultado de la alta evapotranspiración en esta época del año.

A los fines de profundizar el análisis, reconociendo que en las localidades las P se caracterizan por un régimen consistente en temporadas de P (fin de P-V) y temporadas secas (fin de O-I), se calculó las P promedio (2000-2018) de cada sub-período estacional, sus desvíos y coeficientes de variación (Tabla 8), como así también su evolución temporal durante el período de estudio (figura 2).

Para cada período estacional se observa una significativa variabilidad interanual, con CV que varían entre 20 y 31% en P-V, y 32 a 39% en O-I.

Tabla 8. Precipitaciones promedio y desvíos (mm) y sus coeficientes de variación (CV, %), en los períodos de otoño/invierno (O-I) y primavera/verano (P-V), período 2000-2018.

		Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
Primavera/verano	P (mm)	575,1	566,6	636,5	732,8	744,2
	DES	140,3	114,7	144,6	225	206,8
	CV (%)	24	20	23	31	28
Otoño/invierno	P (mm)	283,8	211,8	384,3	465,8	547,3
	DES	98,9	71,7	127,2	179,5	177,1
	CV (%)	35	34	33	39	32

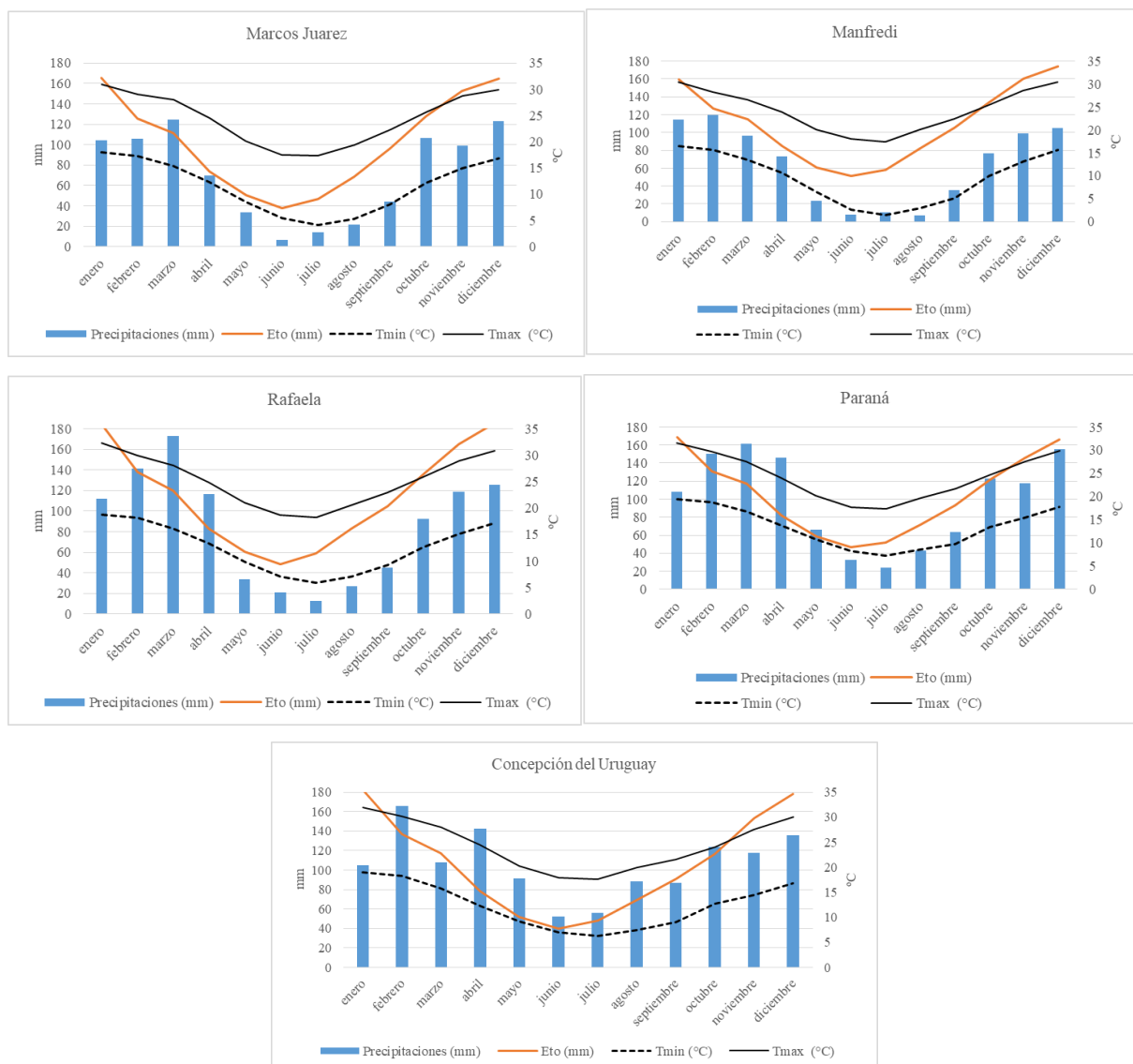


Figura 1. Marcha anual de temperaturas (máximas y mínimas, Tmáx y Tmin, respectivamente), Precipitaciones (P, mm) y evapotranspiración potencial (Eto, mm) en las localidades del estudio.

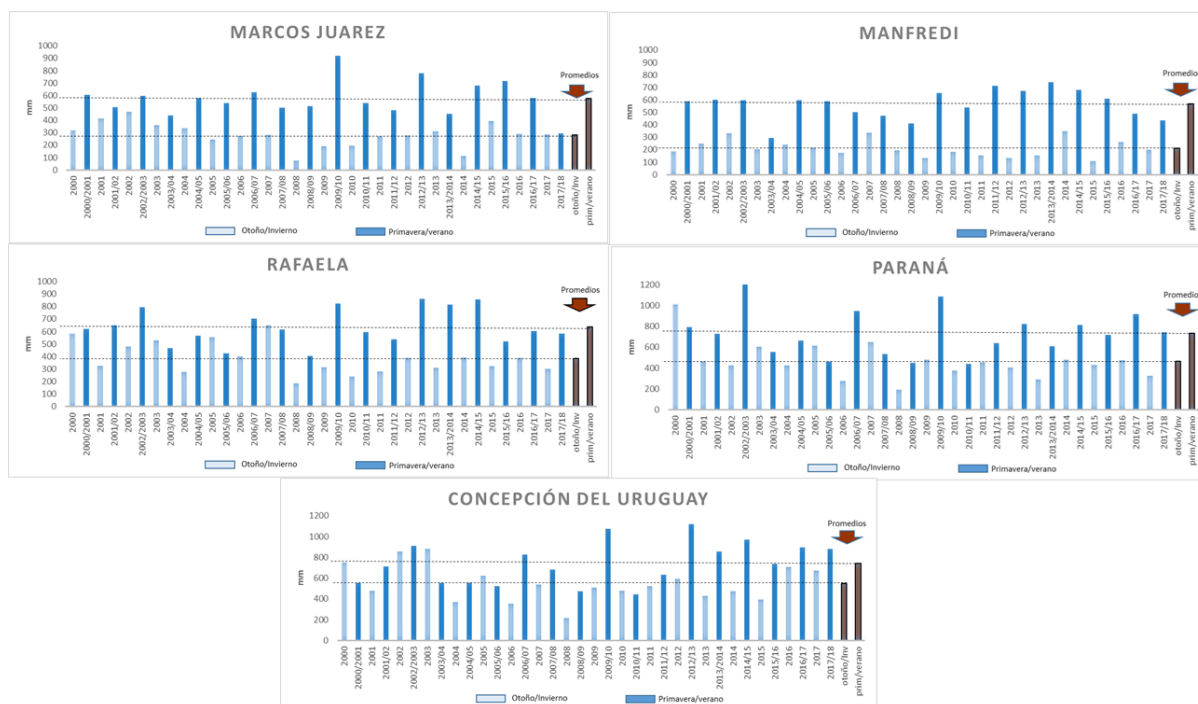


Figura 2. Precipitaciones acumuladas (mm ciclo^{-1}), en los períodos O-I y P-V, en cada localidad y en cada año de evaluación (2000-2018), y valores promedios

Es de destacar, que a la variabilidad temporal, se suma la variabilidad entre localidades, los rasgos de continentalidad aumentan de este a oeste ya que hay una disminución notoria de los montos de P. Así, por ejemplo, en el sector este, Concepción del Uruguay registró valores superiores a los 1120 mm anuales y hacia el oeste Manfredi 744 mm.

Para este estudio y en la serie de tiempo considerada, con el aporte de estos análisis, las P podrían ser el elemento del balance hídrico de mayor variabilidad. No obstante, no solo las P controlan fuertemente la producción de biomasa y sus variaciones entre años y localidades, por ello se exploró el comportamiento de la ETo, a los efectos de determinar su variación entre años. Tal como se observó en la figura 1, la curva descripta por la marcha de ETo, seguía un patrón similar de tendencia en cada localidad. Se observó que, si bien la demanda hídrica anual, entre las localidades, eran diferentes (extremos de 580 a 1552 mm año^{-1} , en Manfredi y Concepción del Uruguay, respectivamente), la ocurrencia temporal de los períodos de mayor demanda (septiembre – febrero) y menor demanda (marzo – agosto) eran coincidentes entre las localidades. Profundizando el análisis, se consideró la variabilidad entre años de ETo respecto al valor medio anual (2000-2018) (figura 3). En cada localidad, se observa una débil variación de los valores de ETo con los registros medios en los períodos climáticos O-I y P-V. Los CV encontrados, en general, oscilaron entre un 3% hasta un 10% (Tabla 9), los cuales equivalen a

rangos de 1,16- 2,36 mm día⁻¹ evapotranspirados. Esta variabilidad temporal de los períodos estacionales de ETo, es significativamente menor a la encontrada para la variable P.



Figura 3. Evapotranspiración de referencia (ET0, mm) en los períodos O-I y P-V, en cada localidad y en cada año de evaluación (2000-2018), y valores promedios

Tabla 9. Evapotranspiraciones de referencia (ET0, mm), desvíos y sus coeficientes de variación (CV, %), en los períodos de otoño/invierno (O-I) y primavera/verano (P-V), período 2000-2018.

		Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
Primavera/verano	ET0 (mm)	827,5	872,5	927,1	831,9	865,1
	DES	43,4	59,6	45,2	28,7	43,9
	CV (%)	5	7	5	3	5
Otoño/invierno	ET0 (mm)	372,8	455,8	463,5	426,8	407,8
	DES	35,2	40,1	45,2	23,5	43,7
	CV (%)	9	8	9	5	10

Por otro lado, la NF es una variable nueva que integra la última versión del modelo AquaCrop, podría suponerse que está relacionada con los eventos locales de las precipitaciones. De manera general y aceptando que en una buena parte del año el cultivo debe recurrir a las reservas de agua almacenadas en el suelo, es importante entender el aporte que realiza, en algunos momentos la NF. Para ello, se analizó su comportamiento graficando las variaciones interanuales de la NF, en cada localidad (figura 4).

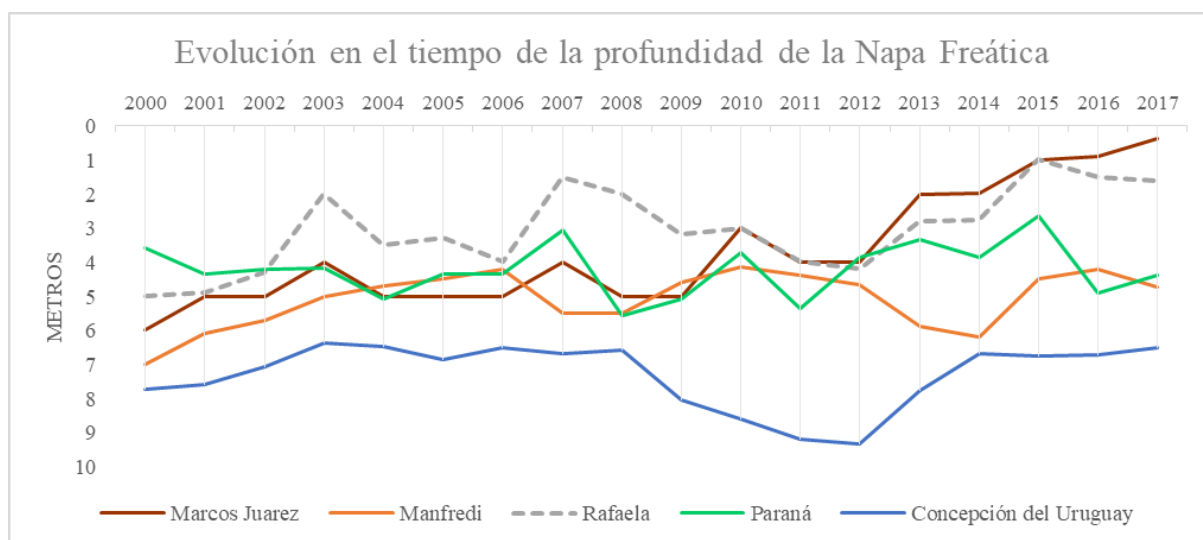


Figura 4. Evolución de la napa freática anual (m), en cada localidad, durante el período 2000-2018.

Se observa que la NF presentó picos de ascensos y descensos de variada intensidad. La determinación de la tendencia lineal temporal pone en evidencia un ascenso persistente en las localidades de Marcos Juárez y Rafaela, un leve crecimiento en Manfredi y fue más estable en Paraná y Concepción del Uruguay (tabla 10).

Tabla 10. Expresión matemática de la tendencia lineal de la NF (variable dependiente) en el tiempo (variable independiente), período 2000-2018.

	a	b	R²
Marcos Juárez	-6,36	0,28	0,80
Manfredi	-4,89	0,08	0,29
Rafaela	-4,34	0,14	0,40
Paraná	-4,31	0,01	0,01
Concepción del Uruguay	-7,23	0,004	0,001

En la tabla 11, se presenta el nivel freático promedio estacional registrado durante el período de estudio (2000 a 2018). Durante los períodos estacionales analizados, el nivel freático de P-V estuvo por encima del registrado en el O-I, con una diferencia máxima de 1,09 m en Marcos Juárez y una diferencia mínima de 0,25 m en Concepción del Uruguay.

Para cada período estacional se observa una significativa variabilidad interanual, en la localidad de Marcos Juárez y Rafaela. La napa freática presentó mucho menos oscilaciones en las localidades restantes.

Tabla 11. Profundidad media de la napa freática (NF, mm), desvíos y sus coeficientes de variación (CV, %), en los períodos de otoño/invierno (O-I) y primavera/verano (P-V), período 2000-2018.

		Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
Primavera/verano	NF (m)	6,89	5,59	4,21	4,36	7,12
	DES	2,35	0,83	1,68	0,83	0,74
	CV (%)	34	15	40	19	10
Otoño/invierno	NF (m)	5,8	5,24	3,91	4,25	7,37
	DES	2,02	1,02	1,97	0,79	0,84
	CV (%)	35	19	50	19	11

En términos generales, el valor medio de las P presenta un gradiente sudoeste - noreste exhibiendo los mayores valores al este de la región en estudio. Con el análisis del nivel de representatividad de las condiciones medias de P y ETo y la integración de ambas variables, se ven reflejadas los años en que la P supera o no a la ETo a lo largo del período analizado, determinando aquellos de excesiva o insuficiente humedad, en cada localidad. La variable NF, analizada a través de su descripción temporal (período 2000-2018), condicionaría indirectamente con su aporte aquellos períodos de déficit o excesos hídricos.

5-2 Relaciones entre cortes de biomasa aérea forrajera y cada variable agroclimática

Se evaluó la relación estadística entre las variables P, ETo y NF, con valores de biomasa aérea de alfalfa a escala temporal más pequeña (tiempo de acumulación de biomasa entre cortes relacionada con las P, ETo o nivel de la NF ocurridas en ese tiempo).

En la figura 5, 6 y 7, los diagramas de dispersión para la serie de tiempo considerada.



Figura 5. Relación entre las precipitaciones acumuladas en cada período de corte (mm) y la biomasa aérea producida en ese corte (Mg MS.ha⁻¹), para cada localidad.

La biomasa aérea acumulada en los cortes solo mostró una respuesta en función de las P para la localidad de Manfredi, una relación positiva del 20% (figura 5). En las restantes localidades si bien las P reflejaron una alta variabilidad en su comportamiento, no se relacionaron en forma significativa con las producciones de MS de alfalfa.

El análisis de la biomasa aérea acumulada en los cortes con los valores de ETo estimados en cada tiempo de acumulación, reflejó una mayor relación en tres localidades (Marcos Juárez, Manfredi y Paraná, figura 6). En los ambientes de Rafaela y Concepción del Uruguay, la MS no se relacionó significativamente con ETo, señalando que otras variables serían las que

participarían en las respuestas. Los R^2 encontrados son mayores que los obtenidos entre P y MS en todas las localidades.

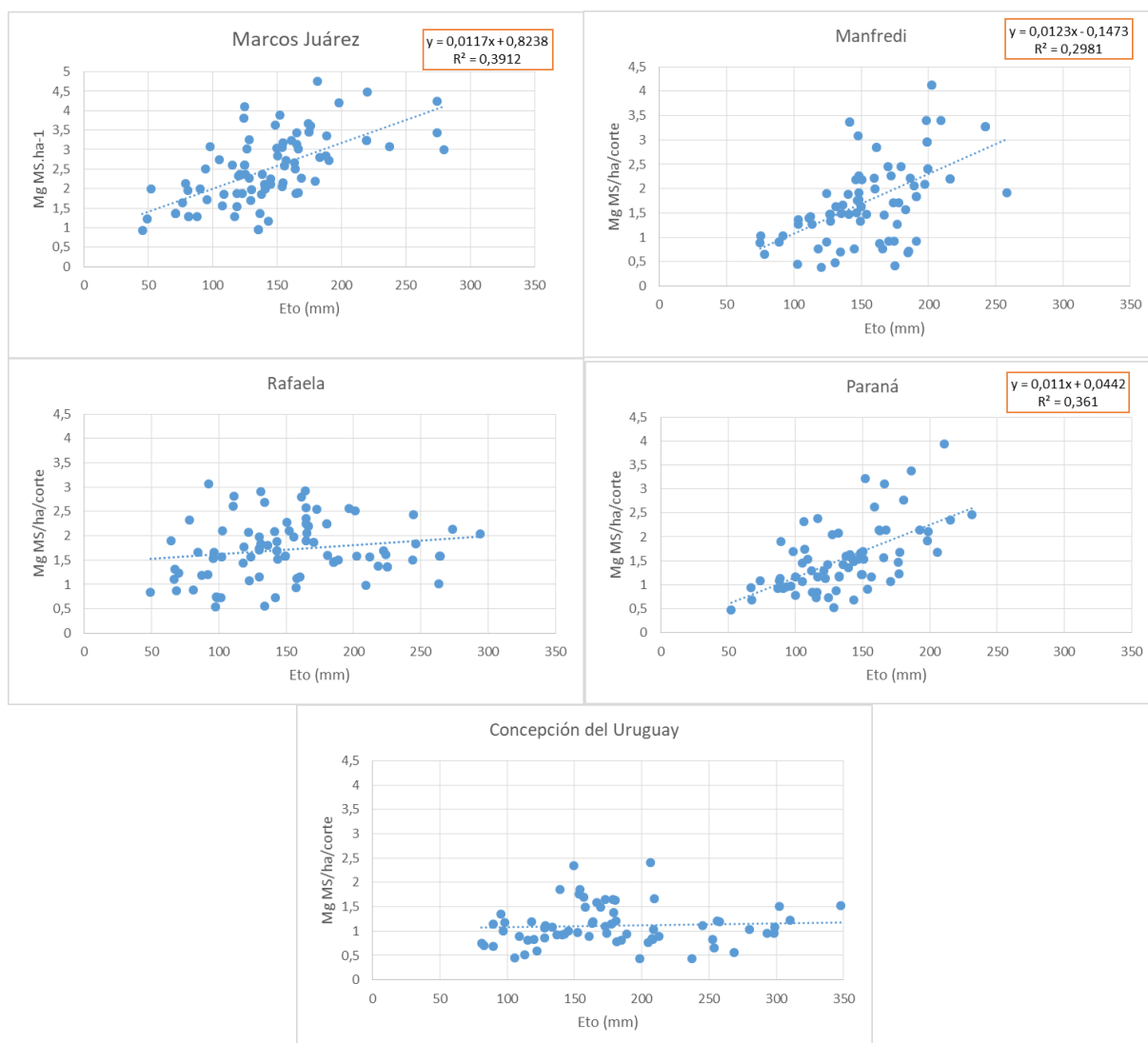


Figura 6. Relación entre ETo en cada período de corte (mm) y la biomasa aérea producida en ese corte (Mg MS ha⁻¹), en cada localidad.

Profundizando el análisis, se destaca la incidencia a través del ascenso capilar, en la respuesta productiva de la MS en la especie. En la figura 7 se relaciona la profundidad de la NF y el valor de la MS.

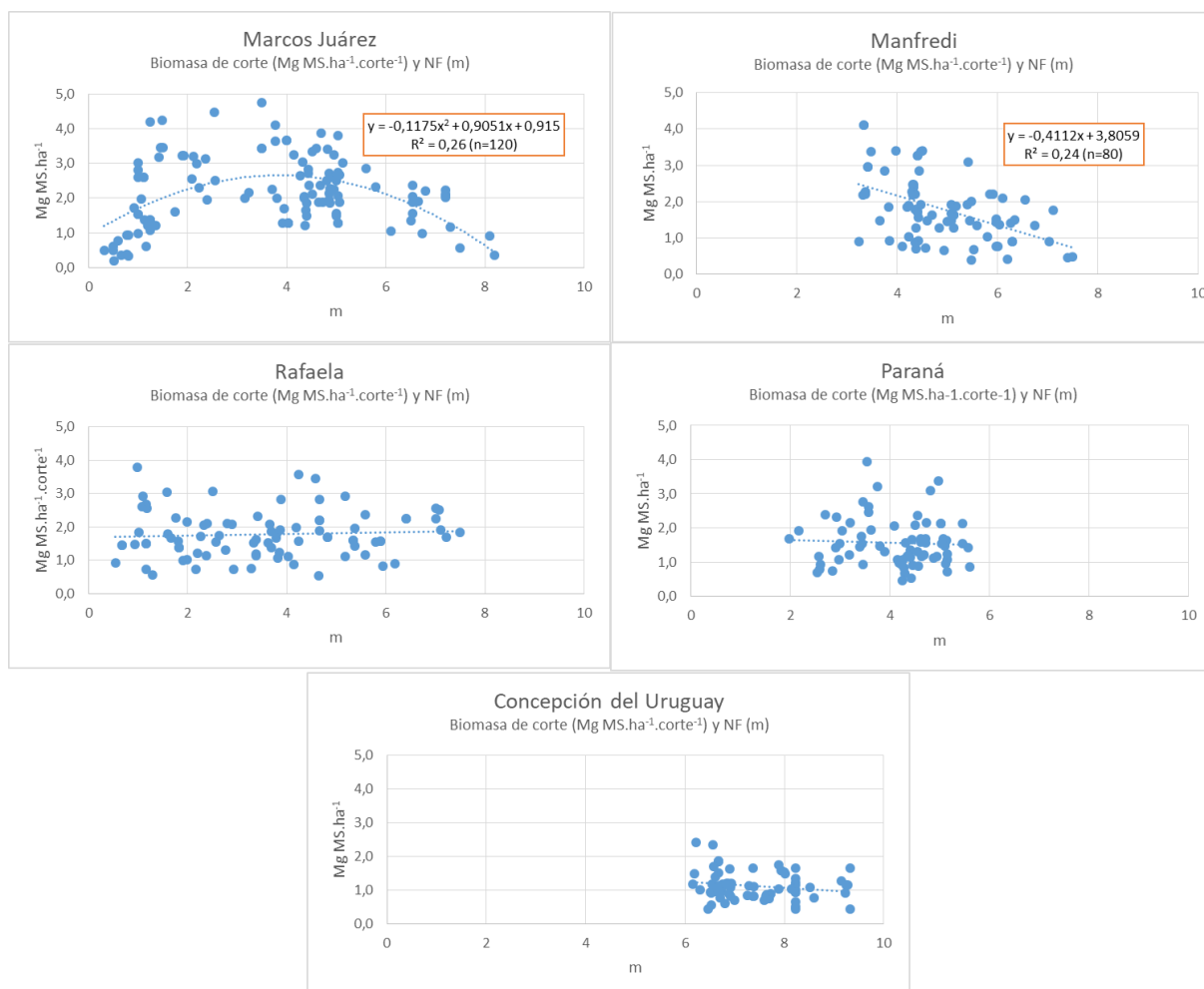


Figura 7. Relación entre los valores de la biomasa aérea en los cortes de la Red y la profundidad de la napa freática, en cada localidad.

Solo la localidad de Marcos Juárez mostró un ajuste cuadrático ($R^2=0,26$; $p<0,0001$) entre estos parámetros. En esta tendencia se observa un rango de profundidad entre 1,5 a 3,5m, en donde se destaca un aumento de la MS, superados esos niveles la misma disminuye.

En Manfredi el ajuste fue lineal, considerándolo aceptable con un R^2 de 0,24 ($p<0,0001$), similar comportamiento fue logrado en Concepción del Uruguay ($R^2=0,13$; $p<0,0015$). En ambas localidades se observa una disminución de la MS a medida que la NF está más profunda. Las localidades de Rafaela y Paraná configuran una situación de indiferencia entre el nivel freático y la producción de biomasa en esos sitios.

5-3- Generalidades del comportamiento productivo en el sector en estudio

La evaluación de la producción de alfalfa de GL corto permitió visualizar tanto la variabilidad estacional, como la interanual, en cada localidad, debido a aspectos relacionados con atributos climáticos, edáficos y morfofisiológicos propios de la especie.

En el proceso de análisis de los datos, provenientes de los cv de alfalfa para 17 ciclos productivos (2000-2001 al 2016-2017), se detectaron relaciones interesantes en la producción de forraje asociada a las localidades estudiadas y a las oportunidades de cortes estacionales de la especie. El análisis de estos comportamientos, para cada una de las localidades elegidas, se presenta a continuación.

5-3-1- Distribución de la producción anual de alfalfa

La producción anual de MS presentó una importante variación entre años y localidades (figura 8). Las producciones anuales de Marcos Juárez tuvieron consistentemente, una mayor tasa de crecimiento que las restantes localidades. Concepción del Uruguay fue la que presentó las menores producciones.

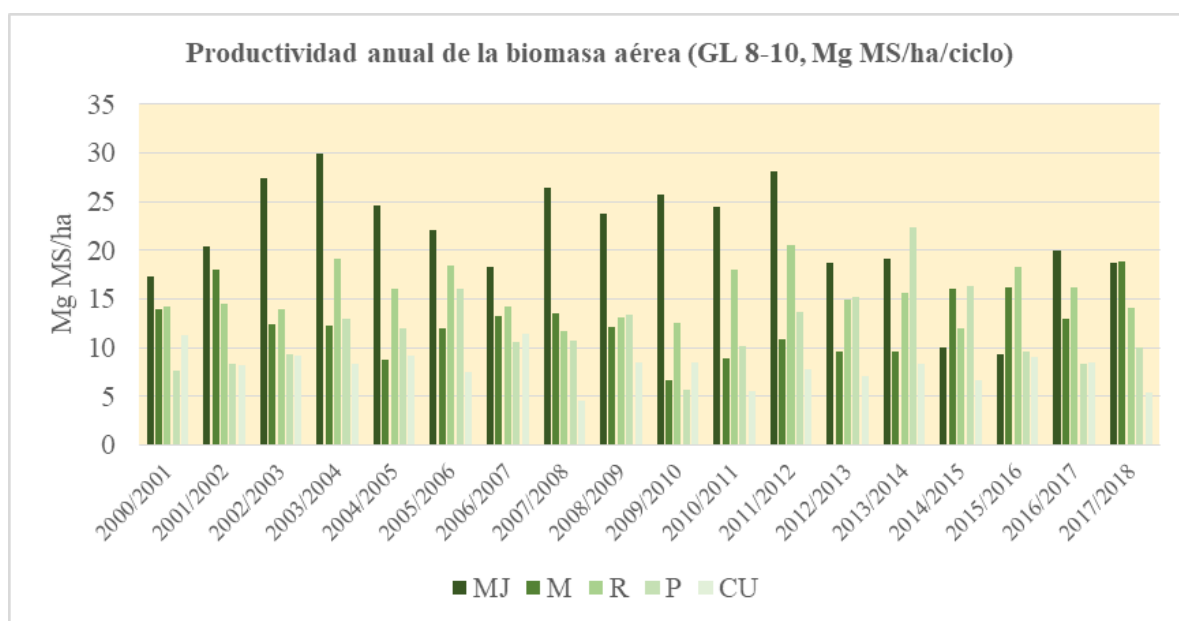


Figura 8. Productividad anual de la biomasa aérea en alfalfa, en las localidades de Marcos Juárez (MJ), Manfredi (M), Rafaela (R), Paraná (P) y Concepción del Uruguay (CU), en el período 2000-2018.

En la tabla 12 se presentan los resultados de la productividad anual de la biomasa aérea en la especie, donde se contrasta si la media de cada localidad difiere significativamente de las

restantes. Existen diferencias significativas entre sus medias para un nivel de confianza del 95 %. Los mayores valores se registraron en Marcos Juárez y los menores en Concepción del Uruguay, mientras Rafaela, Manfredi y Paraná, se ordenan en forma descendente entre ambos extremos.

Tabla 12. Productividad anual promedio de la biomasa aérea en alfalfa ($\text{Mg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), en las localidades, desvío estándar y coeficiente de variación (%), en el período 2000-2018 ($n=19$). (Referencia: letras distintas en la línea de producción de MS, diferencian medias, entre las localidades, determinan diferencias significativas según Test de Tukey, $p<0,0001$)

	Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
Producciones de MS ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	21,34 a	12,54 c	15,40 b	11,79 d	8,03 e
DES	5,68	3,26	2,55	3,96	1,81
CV (%)	27	26	17	34	23

5-3-2- Distribución de la producción anual de alfalfa por año del ciclo total

En la tabla 13 se presenta la distribución de las producciones promedio para cada año del ciclo de crecimiento y sus variaciones. Se observó que a medida que se van sucediendo los años de producción, se registró una disminución de la productividad de MS, en particular en el tercer año. Se aprecia un pico de producción en el primer y segundo año y luego un decrecimiento en el tercer año en los cultivares.

Si bien se observaron, en algunas localidades, diferencias en los valores promedios de la MS acumulada, entre los años de crecimiento (primer al tercer año desde la siembra), las mismas no alcanzaron niveles de significancia ($p<0,05$). En estos ensayos, bajo condiciones de corte, se evaluó la producción conjunta de los cv, por lo que el agrupamiento de las producciones por años está en función del promedio de todos los datos disponibles en el período 2000-2018, de modo que es esperable que disminuya la variabilidad.

Teniendo en cuenta la información lograda, en general, los valores absolutos de la productividad forrajera de los dos primeros años de producción (tabla 10) no difieren significativamente, de manera que serán considerados en el marco del trabajo como repeticiones en algunas determinaciones.

Tabla 13. Producciones promedio de la biomasa aérea como variable dependiente y ciclo de crecimiento como independiente (primero al tercer año, Mg MS ha⁻¹ año⁻¹), n=27, y desvíos estándar (DE) y coeficiente de variación (CV, %) de los valores medios, en cada localidad (Referencia: letras distintas entre ciclos de producción, en cada localidad, determinan diferencias significativas según Test deTukey, $p<0,05$)

	GL corta (8-10)														
	Marcos Juárez			Manfredi			Rafaela			Paraná			Concepción del Uruguay		
	1 ^{er} año	2 ^{do} año	3 ^{er} año	1 ^{er} año	2 ^{do} año	3 ^{er} año	1 ^{er} año	2 ^{do} año	3 ^{er} año	1 ^{er} año	2 ^{do} año	3 ^{er} año	1 ^{er} año	2 ^{do} año	3 ^{er} año
Prom	20,5 a	22,2 a	21,5 a	12,8 a	12,7 a	9,5 b	14,7 a	16,1 a	12,4 b	12,3 a	12,3 a	10,8 a	8,6 a	7,5 a	7,1 a
DE	5,2	6,3	3,8	3,4	3,4	3,3	1,8	3,1	2,9	3,8	4,5	2,9	2,0	1,5	1,7
CV	0,3	0,3	0,2	0,26	0,27	0,35	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2

5-3-3 Distribución estacional de la producción de alfalfa

Se consideraron todos los registros de cortes en cada localidad y años de crecimiento. De esta evaluación resultaron, en promedio, 170 lecturas en GL8-10, en el período enero 2000 a febrero 2018. Se puede observar que se alcanzan las máximas producciones en P-V, luego disminuyen en O-I. En Marcos Juárez se presentan diferencias significativas entre las estaciones del año, en el resto de las localidades este patrón de diferencias no es homogéneo (Figura 9).

Comparando las localidades, Marcos Juárez fue la localidad que más producción de MS lograba, en cada estación de crecimiento y Concepción del Uruguay la que menos producía ($p<0,0001$).

5-3-4 Distribución estacional de la duración entre cortes

El momento óptimo de defoliación teórico fue realizado cuando la cubierta vegetal alcanzó las máximas tasas de crecimiento promedio, momento que se relacionó con el 10% de floración, o cuando los rebrotes desde la corona medían aproximadamente 5 cm. En relación a los días de descanso entre defoliaciones fueron observadas grandes variaciones en los cortes en cada período estacional, particularmente en el período invernal ($p<0,001$). Se detectaron diferencias significativas entre estaciones climáticas, menores en P-V y mayores en O-I y entre localidades de Rafaela, Paraná, Manfredi, Marcos Juárez y Concepción del Uruguay, ordenadas de menores a mayores tiempos, respectivamente (tabla 14).

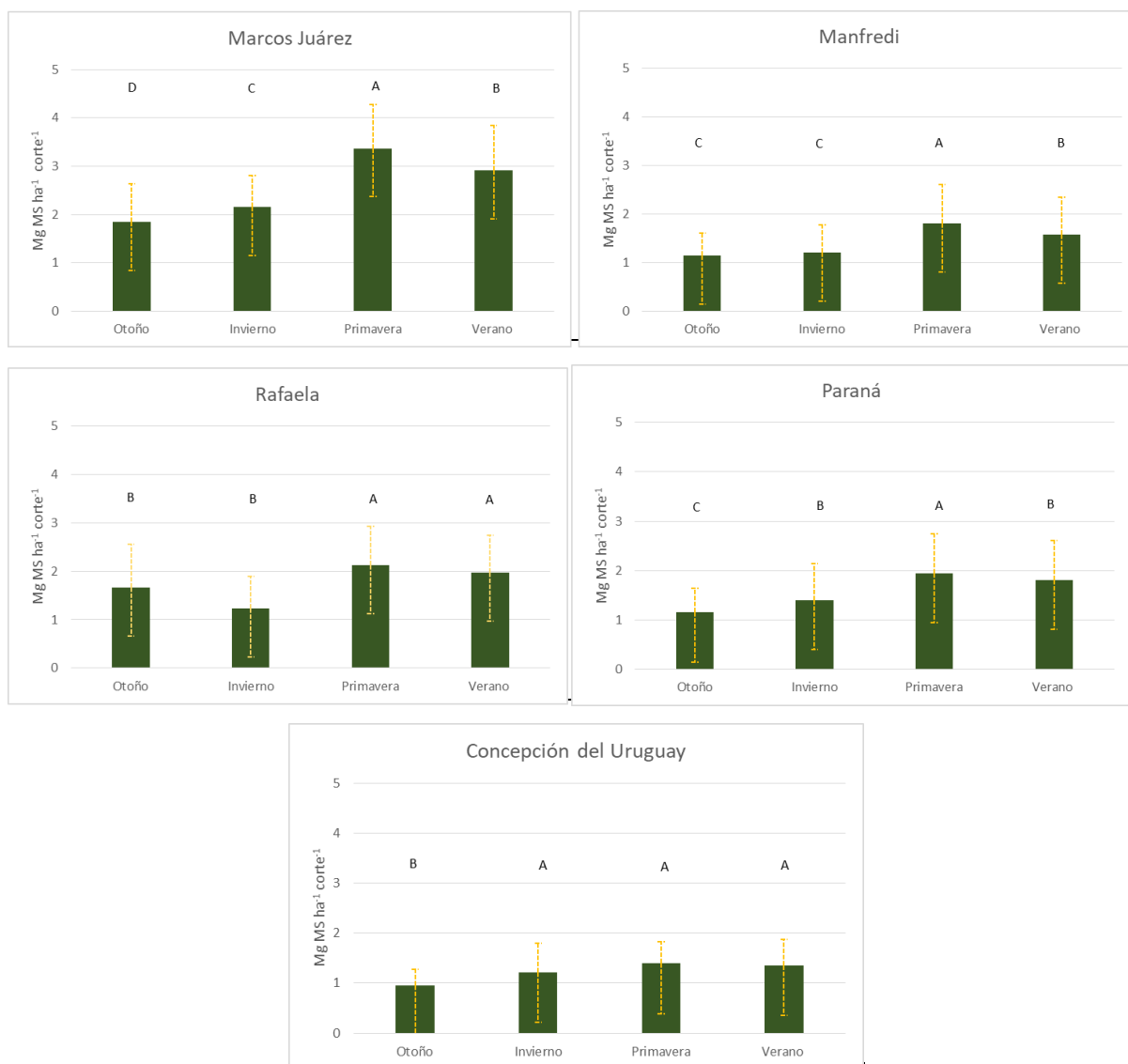


Figura 9. Distribución estacional promedio de la producción de biomasa observada por estación de crecimiento en Mg MS ha⁻¹ corte⁻¹, en cultivares de GL 8-10. (Referencias: letras mayúsculas entre estaciones climáticas (Otoño, invierno, primavera y verano), señalan diferencias según Test de Tukey, $p < 0,05$)

Tabla 14. Días y desvíos estándar entre cortes, en cada localidad y en las estaciones climáticas. (Referencias: letras distintas en cada estación de crecimiento señalan diferencias en los tiempos de descanso en cada localidad, según T de Tukey ($p < 0,05$))

	MJ		M		R		P		CU	
Otoño	46,2±14,5	Bb	39,8±10,4	Cb	42,2±11,5	Bb	46,9±20,5	Bb	57,1±31,1	Ab
Invierno	55,8±18,6	Da	155,3±40,3	Aa	51,5±14,1	Ea	76,8±28,2	Ca	130,7±36,8	Ba
Primavera	37,3±10,7	Bc	31,8±7,9	Dc	33,1±8,9	Cc	33,1±8,8	Cd	39,78±11,4	Ac
Verano	32,2±9,4	Cd	30,1±7,5	Cc	32,6±6,3	Cc	37,5±15,3	Bc	40,7±11,5	Ac
*letras mayúsculas en líneas, entre localidades y en cada estación climática diferencian medias según Test deTukey ($p < 0,05$)										
*letras minúsculas en columna, en cada GL y en cada localidad, diferencian medias según Test deTukey ($p < 0,05$)										

5-4 Modelo AquaCrop: Módulo Cultivo: cálculo y/o determinación de los parámetros

El conjunto de parámetros semiempíricos o conservativos, que no cambian con el tiempo o con las prácticas de manejo, ni en las localidades o condiciones climáticas, fue ajustado con datos bibliográficos de alfalfa en condiciones no limitantes para su crecimiento.

El modelo los utiliza para aplicar las funciones de respuesta al estrés y ofrece alternativas de rangos en cada parámetro para hacer más eficiente la calibración. Basados en numerosos artículos bibliográficos se seleccionaron aquellos valores en los parámetros conservativos y en donde existían rangos de respuestas, se calibró el valor.

5-4-1 Cobertura inicial del dosel (CD_0)

Para este carácter, se realizó la calibración del valor del número de plantas logradas por unidad de superficie (m^2), según los datos bibliográficos de cada localidad (tabla 15).

Para definir la densidad de plantas en el modelo fueron considerados los trabajos de Cornacchione y Pérez (2004) y Romero (2011), quienes registraron una densidad de alrededor de 150 a 200 plantas por m^2 , al momento del primer corte o pastoreo, y analizan que esta cantidad de plantas son normales independientemente de la densidad de siembra inicial y de la zona de uso. Por otra parte, Odorizzi (2015), destaca que el número de plantas que maximiza la producción forrajera del primer año de la pastura de alfalfa, prácticamente duplica al número de plantas en el que la misma se estabilizará a partir del segundo año. Este marco teórico y los sucesivos ajustes de esta variable llevaron a definir, en general y para todas las localidades, que para cortes P-V del primer año de crecimiento, 200 plantas por m^2 era el stand que mejor calibraba la CD_0 ; 150 plantas por m^2 en los cortes del segundo año de crecimiento y 90 plantas por m^2 para el tercer año. En el período O-I, el modelo supone un máximo de 125 plantas por

m², este límite hizo que los valores considerados fuesen de 125, 100 y 60 plantas por m² para el primer, segundo y tercer año, respectivamente.

Tabla 15. Número de plantas de alfalfa por m² que integran la pastura en sus dos primeros ciclos de evaluación (1^{er} y 2^{do} año de la siembra), señalados como “normales” en cada localidad.

Localidad	Número de plantas por m ²		Fuentes de información
	1er ciclo	2do ciclo	
Marcos Juárez	250	150	Rossanigo y Meneghetti, 1991. Alfalfa. Pp. 3-11. Proyecto Ampag. INTA E.E.A. Marcos Juárez (Argentina).
Manfredi	180	150	Romero, 2011. La densidad de siembra y la productividad de la alfalfa. EEA Anguil. http://www.todoagro.com.ar/noticias/nota.asp?nid=18382 . Visitado diciembre 2017.
Rafaela	200	150	Mattera, 2011-tesis; Mattera, Romero, Cuatrín, Grimoldi 2009. Efectos de la distancia de siembra sobre la producción de biomasa y la persistencia de un cultivo de alfalfa. Revista Argentina de Producción Animal 29: 131-140.
Paraná	190	170	Comunicación personal Ing. Agr. Elena Di Nucci de Bedendo Evaluación y Manejo de Forrajeras - Grupo Ecofisiología Vegetal y Manejo de Cultivos - Estación Experimental Agropecuaria Paraná (18-10-18)
Concepción del Uruguay	150-200	100-120	Comunicación personal Ing. Agr. (MSc) Alejo E. Ré Jefe Grupo Mejoramiento y Evaluación de Forrajeras-Área Producción Animal-INTA EEA C. del Uruguay (16-10-18)

5-4-2 Cobertura máxima del dosel verde, CC (%)

Parámetro vacante para el cultivo de alfalfa, que depende de la densidad de siembra y la tasa de crecimiento del cultivo. La misma fue determinada a partir de:

- a- Determinar el desarrollo del follaje a través de la cubierta verde de área de hojas en imágenes fotográficas,
- b- $CC = 1,005 [1 - \exp(-0,6 \text{ IAF})]^{1,2}$ (Hsiao *et al.*, 2009),
- c- $CC = 1 - \exp(-0,416 \text{ IAF})$ (Araya *et al.*, 2016)

En AquaCrop, el desarrollo del follaje puede ser expresado a través de la cubierta verde (CC) como la fracción de la superficie del suelo cubierta por la especie; varía desde cero en la siembra

(es decir, 0% de la superficie del suelo cubierta por el dosel) hasta un valor máximo al finalizar el período de corte tan alto como 1 si se alcanza la cobertura total del dosel (es decir, el 100% de la superficie del suelo está cubierta por el dosel). A manera de prueba se realizaron estimaciones mediante la sistematización de fotografías, tomadas a 1,5 m del suelo, en forma perpendicular, en una pastura monofítica de alfalfa sembrada en marzo del 2017 (20 kg ha⁻¹), de un sector del módulo de producción de Tambo de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR.

Los registros fotográficos fueron realizados en el primer y segundo año de producción (2017-2018), en cada estación climática (6 fotos en primavera, verano, otoño e invierno). El procesamiento de las imágenes fue realizado a través del programa ImageJ, de dominio público, programado en Java y desarrollado en el National Institutes of Health (1997).

Para aplicar las ecuaciones b y c, fue necesario definir el índice de área foliar (IAF). Frente a la complejidad de seleccionar el IAF de referencia para las localidades y para las estaciones climáticas de cada corte, se definió un valor 4,5 para P-V y un valor 2,5 para O-I, basados en la información brindada por diversos autores (Heichel *et al.*, 1988; Mattera, 2004; Guzmán *et al.*, 2007 y Di Nucci de Bedendo *et al.*, 2009).

La ecuación propuesta por Hsiao *et al.* (2009), fue aplicada en algunos cultivos altos como maíz y sorgo, para una amplitud de condiciones climáticas y no dependientes de la variedad o híbrido utilizado en los experimentos, mientras que la ecuación propuesta por Araya *et al.* (2016), fue formulada a partir del IAF de un cultivo no alto (cebada). En la tabla 16, se estimaron los valores de CC, en cada período de crecimiento.

Tabla 16. Porcentaje del parámetro CC (cobertura del canopeo), en alfalfa y en cada período estacional de crecimiento. (Referencia: a=determinación por imágenes fotográficas; b= ecuación propuesta por Hsiao *et al.* (2009) y c= ecuación propuesta por Araya *et al.* (2016))

Metodología	P-V	O-I
a	84%	68%
b	93%	74%
c	85%	65%

Para este parámetro los valores de cobertura logrados en la calibración fueron los obtenidos a partir de la fórmula considerada por Araya *et al.* (2016). Así, se utilizó el 85% de CC, en los cortes de P-V y 65% en los de O-I, esta elección responde a que fue parametrizada, por ese autor, en una especie de bajo porte (cebada, 80 cm), mientras que la ecuación b fue utilizada en

especies altas como maíz. Además presentó menos diferencia con las obtenidas a través de fotografías.

5-4-3 Índice de cosecha (HI)

Para la calibración y bajo el análisis de definir la biomasa aérea como la cantidad de forraje por unidad de área de suelo por encima de los rebrotes de la corona (5 cm, según metodología de los ensayos de corte de la Red), se consideró un valor inicial para ser ajustado del 70%. A partir del mismo, fue necesario realizar simulaciones independientes de esta variable y el mejor valor en la calibración fue del 75%. Valor que fue establecido para las posteriores determinaciones.

5-4-4 Temperatura base (Tb)

A partir de los datos de la biomasa forrajera en cada corte y localidad y considerando las Tb de 0 a 5°C en O-I y 4 a 12°C en P-V, se aplicaron los tres métodos de análisis para determinar la Tb más adecuada en la especie y así calcular los GDA en cada período de crecimiento (tabla 17). En general, hubo respuestas con el método de menor variabilidad, intersección de las equis y pendiente del coeficiente de regresión, en los cortes O-I. Solo Concepción del Uruguay presentó inconsistencia en estos métodos de análisis, en ambas estaciones de crecimiento, mientras que para los cortes de P-V, Rafaela y Manfredi no ajustaron en el método de la intersección de las equis y coeficiente de regresión, respectivamente.

Tabla 17. Temperaturas base según los distintos métodos de cálculo

Métodos de estimación de la Tb O-I	Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
Mínima Variable	2°C	2°C	2° C	4°C	2,5 ° C
Intersección x	0°C	0° C	0° C	0°C	no ajusta
Coeficiente de Regresión (pendiente)	2,5°C	0° C	0° C	4°C	no ajusta
Métodos de estimación de la Tb P-V	Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
Mínima Variable	5°C	6°C	5° C	6°C	5°C
Intersección x	2°C	0°C	no ajusta	0°C	no ajusta
Coeficiente de Regresión (pendiente)	5°C	no ajusta	5° C	5°C	no ajusta

En forma general, se analizaron todos los cortes en las cinco localidades para P-V y no fue considerado Concepción del Uruguay en los cálculos de O-I. La menor variabilidad de estas acumulaciones térmicas, en general para todas las localidades, permitió definir como T_b más adecuadas, 2,5°C en O-I y 5°C en P-V, las que fueron utilizadas para los cálculos de GDA, necesarias en las diversas etapas de los subperíodos de crecimiento del cultivo, en el modelo AquaCrop (tabla 18).

Tabla 18. Promedio general de todas las evaluaciones que incluían cada localidad para la determinación estacional de la temperatura base (T_b).

Analizando todos los cortes y localidades		
Métodos de estimación	O-I (sin CU) (n=250)	P-V (n=469)
Mínima Variable	2,5°C	5°C
Intersección x	0°C	0°C (tendencia lineal) 8,5°C (tendencia 2 ^{do} orden)
Coefficiente de Regresión	2,5°C	5°C

5-4-5 Evaporación (K_e)

En el proceso de ajuste del valor de evaporación del suelo, se construyó el mismo a partir del valor del 50%, propuesto por Allen *et al.* (1998) para cultivos de hojas y dentro de los rangos de ± 5 al 15% de variación según Terán Chávez (2015). A partir de sucesivas aproximaciones, el mejor ajuste fue del 40% y 30% en los períodos P-V y O-I, respectivamente.

5-4-6 Estrés

La alfalfa tiene una estrategia para evitar la sequía al acceder al agua a través de su profundo sistema radicular (Brun y Worcester, 1975 y Cutforth *et al.*, 1991); no obstante, su resistencia a la sequía es deficiente y se ve rápidamente afectada por la escasez de agua, así diversos autores la califican como una especie sensible al estrés hídrico (Sheaffer *et al.*, 1988; Smeal *et al.*, 1991; Grismer, 2001; Grimes *et al.*, 1992; Guitjens, 1993; Saeed y El-Nadi, 1997; Bai y Hao Li, 2003; Moot *et al.*, 2012). Bajo estos antecedentes fue considerado el parámetro moderadamente sensible al estrés por agua.

Por otra parte, el modelo reconoce que si se desencadena una fuerte deficiencia hídrica en el suelo, la senescencia del dosel puede ser desencadenada en cualquier momento del período de acumulación de la biomasa aérea, siempre que el estrés fuese muy severo.

Para calificar la senescencia temprana del canopeo por el déficit hídrico, se analizó las consideraciones de Sinskaya (1950). Este autor, trabajando en alfalfa, expresa que la sequía favorecía la acumulación de productos de asimilación y la especie retardaba la muerte de los tejidos y evidenciaba una rápida recuperación del crecimiento superado este período de déficit. Así, se considera que la senescencia temprana del canopeo en crecimiento es moderadamente tolerante al estrés hídrico.

La alfalfa es menos tolerante al encharcamiento (suelos saturados) que otras especies forrajeras (gramíneas). Las condiciones anaeróbicas por más de 7-14 días provocan la muerte de las raíces e infección por enfermedad secundaria, particularmente de la especie *Phytophthora* (Moot *et al.*, 2012). En la calibración se consideró muy sensible al referido estrés.

5-5 Condiciones iniciales o previas a la simulación

Más allá de haber atribuido variables del cultivo de alfalfa en forma indirecta en la calibración del modelo, claramente se pone de manifiesto la importancia de definir las condiciones previas a la simulación. En primer lugar, el modelo relaciona, de los datos que fueron especificados en la carpeta cultivo, el número de plantas a la siembra y el porcentaje de cobertura que estas pudieran lograr. Otro dato de entrada que se necesita corresponde a la Bi. Teniendo en cuenta valores considerados en otros trabajos (Berone *et al.*, 2017; Terán Chaves, 2015), se estableció para la calibración un rango de 0,200 a 1 Mg de MS ha⁻¹.

Finalmente, y no menor en la incidencia del modelo, fueron las condiciones iniciales de humedad del suelo. Las mismas se estimaron en función de las P ocurridas en cada zona, considerando 15 días previos al inicio de la corrida del modelo. Ante situaciones de escasez hídrica previas, se ensayaron distintas deficiencias de humedad retenida por la matriz edáfica. Las que fueron expresadas como fracciones del agua disponible total en el suelo (TAW, entre un 40 a un 50% a la cc del suelo). Mientras que en situaciones húmedas o normales se ensayaron valores de cc.

En la tabla 19 se aprecia los estimativos en el contenido de humedad del perfil edáfico 15 días antes del inicio de cada período calibrado, para condiciones de déficit, exceso y normalidad

establecidas en esos días. En general, se observa que en situaciones de déficit en el aporte de agua por las P, antes de iniciar las corridas en el modelo, las fracciones de la disponibilidad de agua total en el suelo fueron bajas, entre un 45 a un 50% de TAW. Para las restantes condiciones, se determinó la cc como una buena condición inicial de humedad edáfica.

La asignación de la Bi, respondió en un rango de 0,200 a 1 Mg MS ha⁻¹, sin evidenciar un patrón de comportamiento entre las P previas y localidades. Es pertinente destacar que, para llegar a ajustar este parámetro, sería sumamente necesario ensayos a campo, ya que sus determinaciones evidenciaron importantes variaciones en los valores de PE, entre un 8 a un 19%.

Tabla 19. Condiciones de humedad edáfica previa a la modelación de cada corte, en cada localidad.

Condición hídrica previa	Disponibilidad hídrica del suelo
Marcos Juárez	
Déficit	TAW=45 %
Exceso	cc
Normal	cc
Manfredi	
Déficit	TAW=50 %
Exceso	cc
Normal	cc
Rafaela	
Déficit	TAW=50 %
Exceso	cc
Normal	cc
Paraná	
Déficit	cc
Exceso	cc
Normal	cc
Concepción del Uruguay	
Déficit	TAW=50 %
Exceso	cc
Normal	TAW=50%

5-6 Generación de las variables de cultivo y parámetros para AquaCrop

Como fue analizado precedentemente, para la generación de las variables del cultivo de alfalfa y parámetros de entrada al modelo se utilizó la información disponible en la bibliografía, los mismos se trabajaron con las condiciones edafoclimáticas específicas de cada localidad.

En la tabla 20 se presentan en forma resumida los parámetros conservativos y no conservativos para alfalfa determinados en este trabajo a partir de ecuaciones, de referencias bibliográficas, o sugeridos por el modelo AquaCrop. En algunos casos se disponía de rangos de los parámetros, de manera que el valor final se obtuvo por medio de sucesivos ajustes del modelo cambiándolos por defecto (análisis de sensibilidad ensayando prueba y error).

Si bien no se desconoce que se mejoraría la calibración con experimentos de campo que determinen aquellos parámetros no conservadores de ajuste local., los resultados de este trabajo son el punto de partida para aplicarlo en investigaciones futuras.

Tabla 20. Variables (no conservativos) y parámetros (conservativos), como base para las entradas requeridas por el modelo AquaCrop para alfalfa para el Módulo Cultivo

Selección Módulo Cultivo: "Cultivo de hojas"				
Descripción	Valores Indicativos y/o rangos		Forma de determinación	Tipo
Período de crecimiento	Otoño-Invierno	Primavera-Verano		
Umbrales de Temperaturas del aire				
Temperatura base	2,5	5	Calculado	Conservativo
Temperatura máxima de crecimiento	15	30	Referencia bilbiográfica	Conservativo
Desarrollo de la cobertura del dosel verde				
Número de plantas por m² (densidad)	60, 100, 125	90, 150, 200	Referencia bibliográfica	No Conservativo
Cobertura máxima del dosel (%)	65%	85%	Calculado	Conservativo
Tiempo de siembra a emergencia	5 días	3 días	Referencia bibliográfica	No Conservativo
Tiempo de siembra a inicio de senescencia (senescencia =cobertura máxima=cosecha)=(°GDA)	Calculado para cada corte en función de las temperaturas diarias del período y Tb		Calculado	No Conservativo
Desarrollo de la zona de raíz				
Profundidad mínima efectiva (m)	1,5		Referencia bibliográfica	No Conservativo
Profundidad máxima efectiva (m)	3,5		Referencia bibliográfica	No Conservativo
Factor de forma que describe la expansión de la zona raíz (cm día⁻¹)	5 cm día⁻¹		AquaCrop	Conservativo
Transpiración del cultivo				
Coeficiente del cultivo cuando el dosel es completo pero previo a la senescencia (Kc)	1,15		Referencia bibliográfica	Conservativo

Factor de declinación del cultivo (%/día) como un resultado de la senescencia, deficiencia de nitrógeno, etc. (% día ⁻¹)	5% día ⁻¹ (lenta declinación)	0,225 % día ⁻¹	AquaCrop	Conservativo
Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía (Erel _x)	30%	40%	Calculado	Conservativo
Producción de biomasa y formación de cosecha				
1- Productividad del cultivo por el agua				
Productividad hídrica normalizada para ETo y CO ₂ (WP*) (gramos/m ²)	15 gr m ²		AquaCrop	Conservativo
2- Índice de cosecha				
Índice de Cosecha de referencia (%)	75%	75%	Calculado	No Conservativo
3- Estrés				
Factor de forma para coeficiente de estrés (0= línea recta)	3		AquaCrop	Conservativo
Estrés en expansión del canopeo (%)	moderadamente tolerante (rangos 25 al 60%)		Referencia bibliográfica y AquaCrop	Conservativo
Estrés hídrico	moderadamente tolerante (65% límite superior)		Referencia bibliográfica y AquaCrop	Conservativo
Estrés en cierre de estomas (%)	moderadamente tolerante		Referencia bibliográfica y AquaCrop	Conservativo
Estrés en senescencia temprana canopeo	moderadamente tolerante (65% límite superior)		Referencia bibliográfica y AquaCrop	Conservativo
Estrés por aereación	muy sensible al anegamiento		Referencia bibliográfica y AquaCrop	Conservativo

En la sección Anexo (tabla i), se dispone de las planillas de visualización que se obtiene del modelo, los parámetros del módulo cultivo, su clasificación por tipo, los rangos de máxima y mínima de cada uno; y se señalan aquellos que no corresponderían ser utilizados en este estudio, para la especie.

5-7- Calibración

Para la calibración se utilizaron los datos de cortes de Red, diferenciados en cada estación de crecimiento (O-I y P-V) y en años secos, húmedos y normales, en cada localidad. En la calibración se ajustaron ciertos parámetros del modelo para obtener una buena relación entre los valores PO y PE. El procedimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de Raes *et al.* (2017). Se hicieron las primeras simulaciones y se compararon los resultados simulados con los valores observados. Se continuó con este procedimiento repetidamente, realizando pequeños ajustes, hasta que los resultados simulados ajustaron con los resultados de los cortes.

Como resultado, en la definición de todos los parámetros que integrarían el módulo Cultivo, se presenta sus valores y que fueron desarrollados para la especie, algunos calculados (por ejemplo cobertura máxima de canopeo, temperatura base y grados días en cada corte), otros estimados en base a consulta a expertos o bibliografía respaldatoria (densidad de plantas, resistencias a estreses, profundidad de raíces, etc).

El comportamiento de estos parámetros fue el resultado final de los valores por el modelo en las diferentes localidades. Los resultados del proceso de calibración de AquaCrop en alfalfa se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. Índices estadísticos para evaluar los resultados de la calibración, en cada localidad y condiciones hídricas antecedentes al período de corte.

Marcos Juárez	R ² Adj	Ordenada		Pendiente		RMSE	EF	NRMSE	d
		Li	Ls	Li	Ls				
Períodos secos									
<i>P-V</i>	0,74	0,41	1,31	0,28	0,91	0,35	-0,68	0,21	0,80
<i>O-I</i>	0,9	-0,48	0,31	0,77	1,15	0,26	0,85	0,14	0,93
Período húmedos									
<i>P-V</i>	0,8	-0,13	0,91	0,11	0,66	0,4	0,78	0,18	0,86
<i>O-I</i>									
Períodos normales									
<i>P-V</i>	0,8	-0,16	0,92	0,12	0,61	0,22	0,78	0,10	0,94
<i>O-I</i>									

Manfredi	R ² Adj	Ordenada		Pendiente		RMSE	EF	NRMSE	d
		Li	Ls	Li	Ls				
Períodos secos									
<i>P-V</i>	0,68	0,18	0,81	0,53	0,98	0,37	0,58	0,29	0,84
<i>O-I</i>									
Período húmedos									
<i>P-V</i>	0,52	-0,32	0,77	0,45	1,3	0,22	0,26	0,17	0,91
<i>O-I</i>									
Períodos normales									
<i>P-V</i>	0,81	-0,15	0,49	0,71	1,07	0,29	0,81	0,17	0,93
<i>O-I</i>									

Rafaela	R ² Adj	Ordenada		Pendiente		RMSE	EF	NRMSE	d
		Li	Ls	Li	Ls				
Períodos secos									
<i>P-V</i>	0,64	-0,15	1,22	0,41	1,22	0,31	0,33	0,18	0,85
<i>O-I</i>	0,6	-0,01	1,21	0,4	1,21	0,32	-0,003	0,2	0,82
Período húmedos									
<i>P-V</i>	0,64	0,3	1,06	0,44	0,89	0,35	0,59	0,22	0,86
<i>O-I</i>									
Períodos normales									
<i>P-V</i>	0,72	-0,48	0,4	0,54	1,07	0,45	-5,15	0,28	0,78
<i>O-I</i>									

Paraná	R ² Adj	Ordenada		Pendiente		RMSE	EF	NRMSE	d
		Li	Ls	Li	Ls				
Períodos secos									
<i>P-V</i>	0,86	0,06	0,44	0,64	0,88	0,21	0,86	0,14	0,93
<i>O-I</i>									
Período húmedos									
<i>P-V</i>	0,96	0,24	0,63	0,73	0,91	0,2	0,93	0,1	0,96
<i>O-I</i>									
Períodos normales									
<i>P-V</i>	0,72	0,08	1,04	0,39	0,85	0,37	0,62	0,18	0,83
<i>O-I</i>									

Concepción del Uruguay	R ² Adj	Ordenada		Pendiente		RMSE	EF	NRMSE	d
		Li	Ls	Li	Ls				
Períodos secos									
<i>P-V</i>	0,56	-0,08	0,66	0,38	1,09	0,15	0,54	0,15	0,94
<i>O-I</i>									
Período húmedos									
<i>P-V</i>	0,85	0,3	0,7	0,35	0,66	0,25	0,68	0,2	0,73
<i>O-I</i>									
Períodos normales									
<i>P-V</i>	0,82	0,26	0,65	0,45	0,77	0,18	0,77	0,14	0,75
<i>O-I</i>									

Referencias: Períodos estacionales: *P-V* y *O-I*; coeficiente de determinación ajustado (R^2 Adj); Li (límite inferior) y Ls (límite superior) de la ordenada origen y pendiente de la recta de ajuste. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE); Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE); Eficiencia del Modelo de Nash-Sutcliffe (EF); Índice de agregación de Willmott “d”

El ajuste logrado se estableció con base en la determinación de las variables que se presentaron en la Tabla 20, en donde se establecen las principales variables conservadoras y no

conservadoras del cultivo. Los rangos en los valores que se fueron probando, en todas las posibles combinaciones, para mejorar la calibración, se informan en Anexo Tabla ii.

De acuerdo a los resultados de la calibración, se destaca que la simulación se inicia con la condición hídrica inicial del suelo (TAW) y la Bi. Debido a que fue difícil de estimar indirectamente ambas variables, se tuvieron en cuenta los rangos o límites que señala la bibliografía y se seleccionó aquellos valores más probables en cada localidad, de acuerdo al proceso del análisis de sensibilidad de la respuesta del modelo. No obstante que se ajustaron estas variables, fueron las que presentaron los mayores inconvenientes y requerirían observaciones en campo haciendo los respectivos ajustes.

Las condiciones del clima, fueron las reales ocurridas durante cada período de corte experimental y las características del suelo también se presentaron en forma detallada en la sección 3.3 (tabla 4), las condiciones de manejo se explicaron en la sección 3.4.

Con respecto a los indicadores estadísticos, el coeficiente de determinación (R^2), resultante de relacionar linealmente los valores simulados y medidos, fueron aceptables con valores mínimos de 0,52 en Manfredi períodos húmedos y 0,56 en Concepción del Uruguay en períodos secos. Por otra parte, en los períodos estacionales, secos, húmedos o normales, que presentaron valores superiores a 0,80 el ajuste fue considerado como bueno. En general, analizando el intervalo de confianza de cada unidad de origen y pendiente en la recta de regresión, podemos decir que los datos ingresados y los modelados son consistentes en la relación. Los valores de estimación de NRMSE obtenidos en las simulaciones analizadas variaron en el rango de 10 a 29%, expresando simulaciones buenas y adecuadas, respectivamente. El RMSE proporcionó resultados realistas en diferencias de biomásas simuladas, en todas las calibraciones osciló, en general, entre 0,150 a 0,450 Mg MS ha⁻¹. Los valores de EF, se aproximaron al valor uno, señalado como el valor de mejor eficiencia del modelo y finalmente, el índice de concordancia (d), medida del error relativo del modelo, al aproximarse a 1 evidencia que los valores estimados y observados son idénticos. En líneas generales, el análisis del sistema de los estadísticos utilizados en la calibración, pueden ser suficientes para que este tipo de modelo tenga un nivel de aproximación adecuado para evaluar el comportamiento de los mismos. No obstante, cada uno tiene sus propias fortalezas y debilidades; cuantificación de la dispersión de los datos, la sensibilidad a los valores extremos o la percepción a la sobre estimación o sub estimación; lo que significa que es necesario el uso de un conjunto de diferentes indicadores para evaluar suficientemente el modelo. Por ejemplo, el índice de eficiencia (EF) estuvo más cercana a 1 solo en la localidad de Paraná para todos los

períodos y estaciones de crecimiento y solo en el período seco de O-I en Marcos Juárez, y períodos normales, tanto P-V como O-I, en Manfredi. En el resto de las localidades y situaciones no manifestaron buenas eficiencias.

Se obtuvo un alto ajuste por el índice de coincidencia (d) para el caso de PO y ubicándose en término medio en un valor de 0,86 para el valor simulado.

Estos resultados demuestran que el modelo AquaCrop explica adecuadamente la acumulación de la biomasa forrajera en cada corte de alfalfa, evaluados bajo las condiciones ambientales y edáficas de cada localidad.

5-8 Validación

Los parámetros calibrados del modelo AquaCrop se mantuvieron inalterables, solo se modificó el número de plantas por año de producción y las condiciones previas al inicio de la modelación, en función de si el año es seco, húmedo o normal, y si correspondía al primer segundo o tercer año de producción. Se validó con los datos de corte del período 2015 al 2017. Para analizar la robustez de estos resultados generales, la figura 11 presenta, en cada localidad, la relación entre PO y PE. El modelo AquaCrop permitió una estimación adecuada de la biomasa aérea, en todas las localidades (figura 10) con un R^2 observado-simulado entre 0,70 a 0,91. En general, si bien se observa un buen ajuste se presenta una sobrestimación de los datos simulados a medida que la biomasa de los cortes va aumentando y habría un punto de inflexión de la biomasa real (entre 1 a 2 Mg de MS ha⁻¹) a partir de la cual los valores simulados subestiman con biombras menores a esos puntos de inflexión.

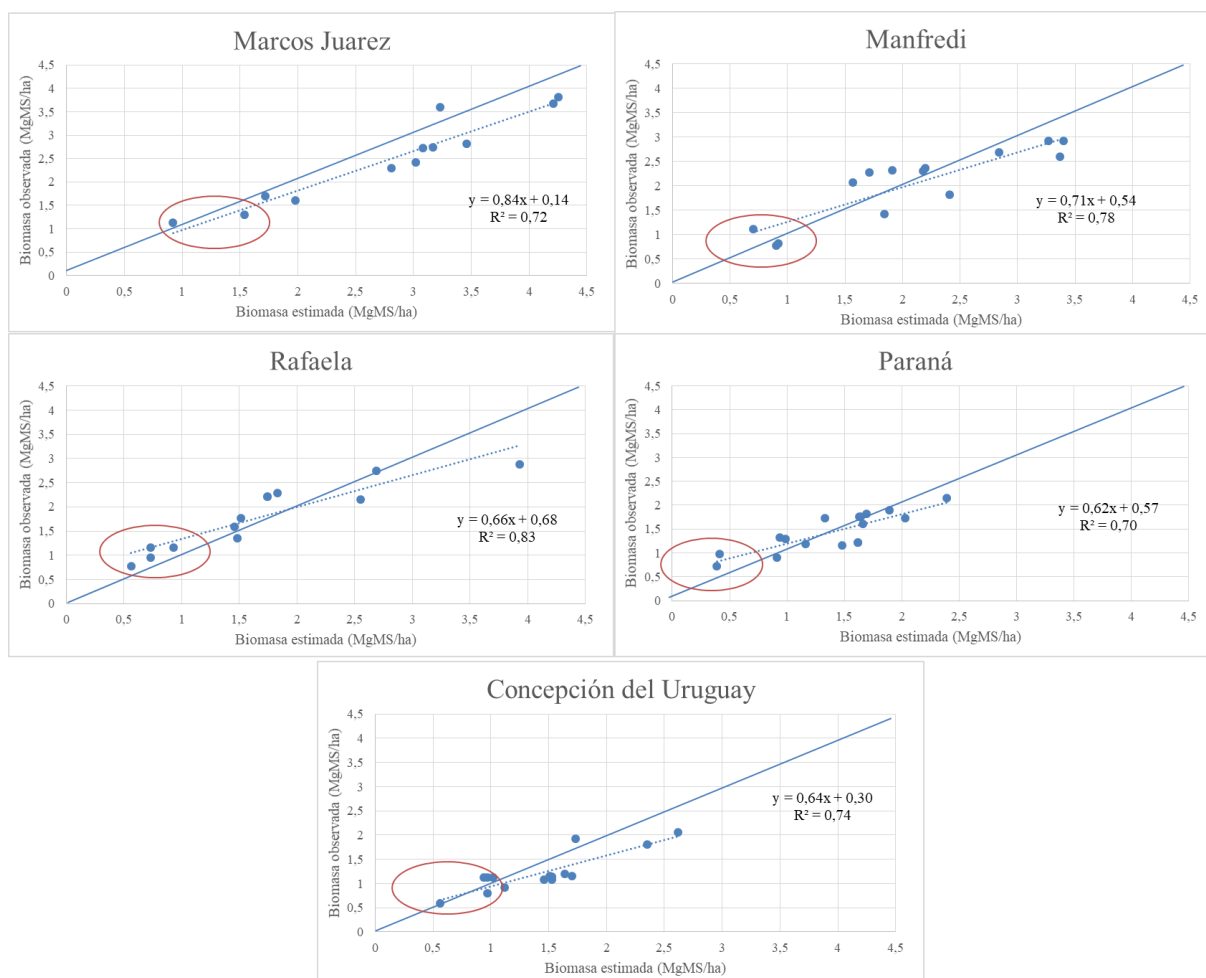


Figura 10. Relación entre valores de la biomasa observados en cada corte y la biomasa estimada a partir del Modelo Aqua crop (Mg MS/ha). En todos los casos, la línea continua corresponde a la recta identidad (1:1) y la de puntos al modelo de mejor ajuste lineal ($p < 0,05$), durante el ciclo 2015-2017, en cada localidad. Los círculos rojos corresponden a las biomases observadas: biomases estimadas en los períodos O-I.

La valoración estadística del comportamiento de los modelos se sintetiza en la Tabla 22. Se puede observar un buen comportamiento del modelo a partir del análisis de regresión lineal entre los valores observados y estimados, se asoció a un alto coeficiente de determinación, a una pendiente de la recta de regresión cercana a 1, como así también la ordenada al origen cercana a cero.

La raíz del cuadrado medio del error (RMSE), medida de la desviación media entre los valores de la biomasa aérea en cada corte y la biomasa simulada, resultaron ser bajos. Los menores errores fueron estimados en Paraná ($0,290 \text{ Mg MS ha}^{-1} \text{ corte}^{-1}$) y los mayores en Marcos Juárez ($0,430 \text{ Mg MS ha}^{-1} \text{ corte}^{-1}$). Concepción del Uruguay presentó errores en las estimaciones del

0,360 Mg MS ha⁻¹ corte⁻¹ y Manfredi y Rafaela igualaron errores en la validación de 0,420 Mg MS ha⁻¹ corte⁻¹.

Los valores de EF fueron altos según los criterios de Krause *et al.* (2005); Moriasi *et al.* (2007), en las localidades de Marcos Juárez, Manfredi y Rafaela y valores aceptables para Paraná y Concepción del Uruguay.

NRMSE fue un parámetro estadístico que permitió considerar la simulación como adecuada (rango de valores entre 15 y 25%).

El índice de concordancia o agregación de Willmott (d), error relativo en las estimaciones del modelo, varió entre 0,85 y 0,89. Cuando el valor es 1 indica que los valores estimados y observados son idénticos. Krause *et al.* (2005) demostraron que cuando d es mayor a 0,65 los ajustes son buenos. Los resultados calculados en cada localidad superaron marcadamente ese valor de referencia.

Tabla 22. Índices estadísticos para evaluar los resultados de la validación, en cada localidad.

Localidades	R ²	Ordenada		Pendiente		p-valor	RMSE	EF	NRMSE	d
	Adj	Li	Ls	Li	Ls					
Marcos Juárez	0,72	-0,62	1,24	0,81	1,38	<0,0001	0,43	0,82	0,15	0,88
Manfredi	0,76	-0,01	1,08	0,47	0,95	<0,0001	0,42	0,77	0,2	0,87
Rafaela	0,81	0,29	1,06	0,46	0,86	<0,0001	0,42	0,78	0,25	0,86
Paraná	0,68	-0,24	0,91	0,4	0,84	<0,0001	0,29	0,68	0,21	0,89
Concepción del Uruguay	0,72	-0,05	0,65	0,41	0,86	<0,0001	0,36	0,55	0,25	0,85

Referencias: Coeficiente de determinación ajustado (R² Adj); Li (límite inferior) y Ls (límite superior) de la ordenada origen y pendiente de la recta de ajuste. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE); Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE); Eficiencia del Modelo de Nash-Sutcliffe (EF); Índice de agregación de Willmott “d”

Como síntesis de estos resultados, se logró utilizar el modelo AquaCrop en la estructuración del continuo suelo-cultivo-atmósfera, en cada localidad, incluyendo: el suelo, con su balance de agua; la planta de alfalfa, con sus procesos de crecimiento; el clima, con las temperaturas, precipitaciones, la demanda de evaporación y la concentración de CO₂. Las variables respuestas en cada corrida fueron: evaporación del suelo y transpiración del cultivo, cantidad de agua escurrida, infiltrada y drenada en el perfil del suelo dentro de la zona radicular, en función de las lluvias ocurridas, aporte de la napa freática, proporción de estreses ocurridos en el dosel del cultivo, uso consuntivo del agua, producción potencial y estimada de la biomasa aérea. La información que se obtuvo en la salida de cada corte, por estación de crecimiento y localidad, y en cada situación de períodos seco, normal o húmedo (n=270), será integrada analíticamente

en la sección de discusión del trabajo. En Anexo iii, se presenta un ejemplo en la salida del modelo. En relación a la calibración y validación lograda, a continuación, se analizarán algunos de las respuestas obtenidas a partir del modelo AquaCrop: producción de biomasa aérea y brecha de rendimientos, comportamiento del modelo considerando los niveles de la napa freática y la eficiencia del uso del agua en alfalfa.

5-9 Productividad forrajera de alfalfa

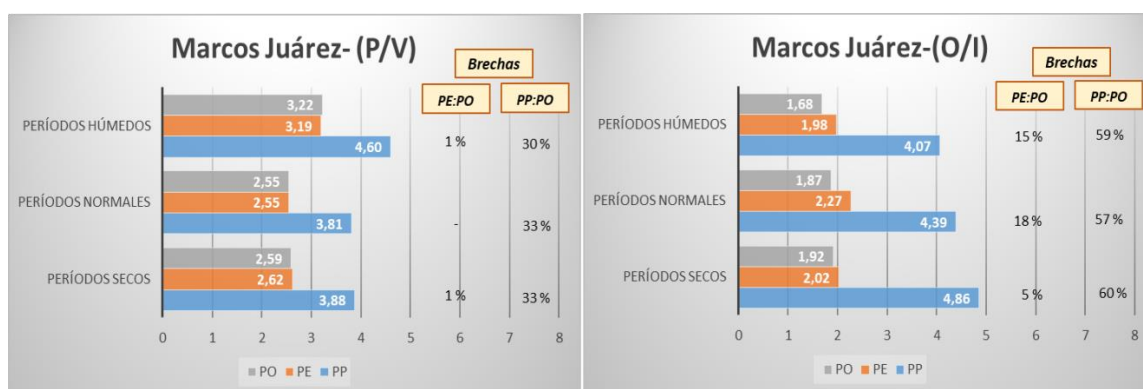
5-9-1 Producción de biomasa aérea y brecha de rendimientos

Debido a las variaciones en la biomasa aérea en alfalfa en años climáticamente contrastantes y su comportamiento en las localidades analizadas, la aplicación del modelo permitió conocer la brecha de producción existente entre PP, PE y aquellas que resultaron de los cortes reales en la Red (PO) (figura 11).

Las PP son aquellas que se logran cuando los factores reductores han sido controlados y no existen limitaciones en la disponibilidad de agua y nutrientes, salinidad, ni competencia con plagas ni malezas. Es decir que los rendimientos estarán sólo limitados por la radiación, el régimen térmico, la densidad de plantas (éstas últimas gobiernan la tasa de desarrollo del canopeo) y la eficiencia de cosecha de la biomasa aérea producida (HI).

El PO es el que obtienen los responsables del ensayo en Red de las producciones de cultivares de GL corta de alfalfa, donde la pérdida de producción se debería a un insuficiente abastecimiento de agua, ya sea de P o por aportes de la NF.

Los valores medios de PE y PO fueron similares, tal como lo respaldó la calibración y validación de la producción de biomasa aérea en el modelo AquaCrop. La variación de la brecha entre PP y PO siempre fue mayor en la estación de O-I. En general, en todas las localidades se presentó consistentemente altas brechas de rendimientos entre PP y PO, variando entre 30% a 85%. La localidad de Concepción del Uruguay presentó los mayores valores.



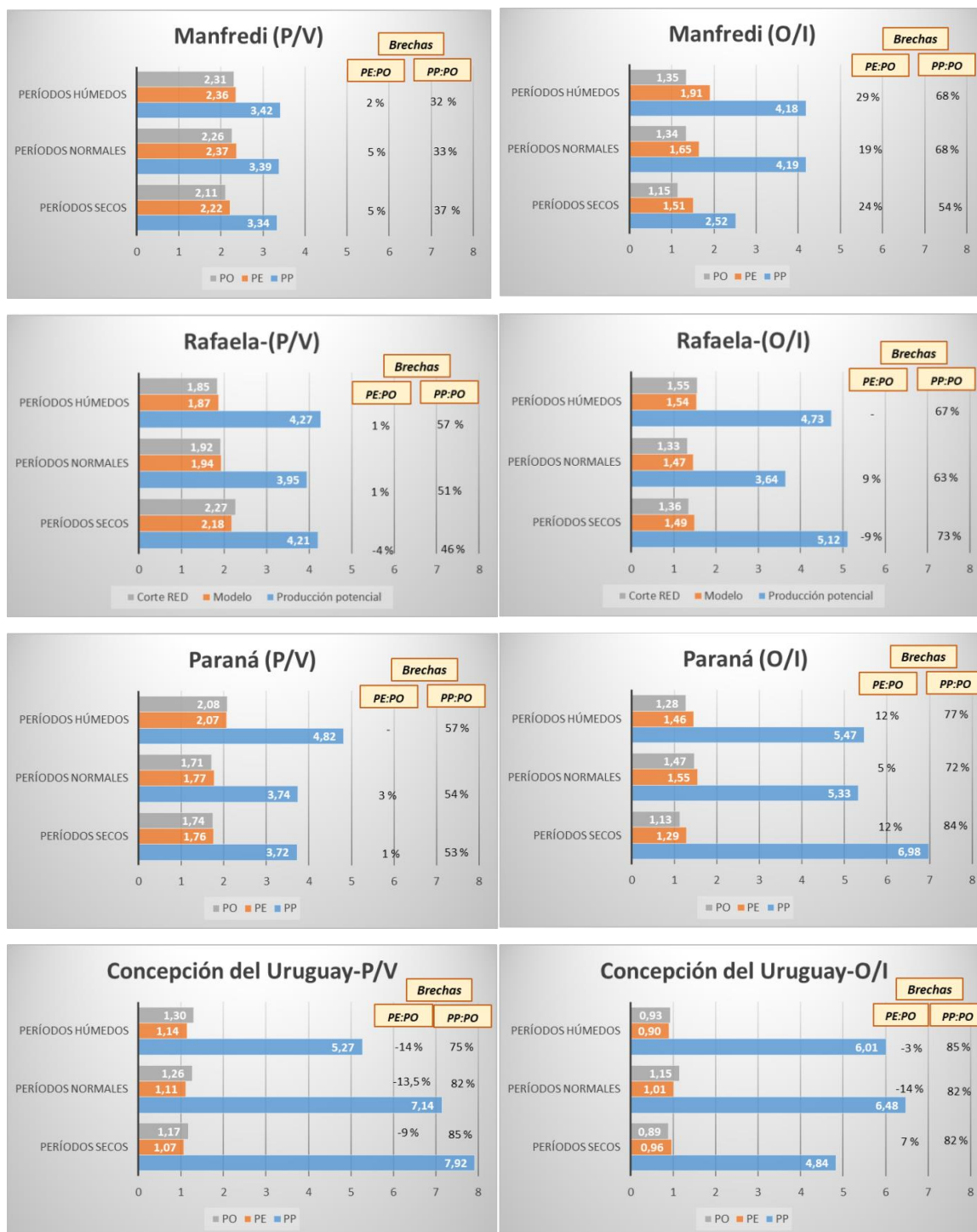


Figura 11. Valores promedio de la producción potencial (PP), producción estimada como salida del modelo (PE) y producción observada en los ensayos de corte de la Red (PO) y brechas en la producción estimada:observada (PE:PO) y potencial:observada (PP:PO).

5-9-2- Comportamiento del modelo AquaCrop considerando los niveles de la napa freática

La tabla 23 muestra los valores estadísticos calculados para cada sitio. En general, la diferencia entre valores estimados por el modelo para la predicción de la biomasa forrajera en cada corte, considerando la profundidad de la NF tiene un buen ajuste. Según los criterios definidos anteriormente, el ajuste de R^2 , RMSE y NRMSE fue bueno a muy bueno para la mayoría de las localidades.

Los valores de la PE obtenidos sin considerar la NF, siempre fueron menores comparándolos incluyendo la NF. Los coeficientes de determinación lineales, no serían válidos para lograr una buena respuesta en el modelo. En Marcos Juárez, en O-I, el ajuste observado-esperado fue no muy bueno ($R^2 = 0,11$), y bajos en el resto de las localidades. En el período P-V, las relaciones mejoraron aunque aún no fueron válidas para explicar la proporción de variabilidad de los datos. Se lograron valores de RMSE entre 62 a 733 Kg/ha, y un 4 a 43% de diferencias en los valores de biomasa observadas en los cortes de la Red (NRMSE). Solo en la localidad de CU, se observó que no existe una relación estadísticamente significativa del modelo, al considerar la presencia o la ausencia de la NF.

Tabla 23. Relaciones estadísticas entre las biomásas observadas (BO, Mg MS/ha) y biomásas estimadas (BE, Mg MS/ha) considerando la napa freática (NF) y sin considerarla.

Período O-I	PO	PE con NF	PE sin NF	Con NF			Sin NF		
				R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE
Marcos Juárez	1,85±0,57	1,98±0,56	2,10±0,61	0,75	0,101	0,050	0,11	0,519	0,280
Manfredi	1,17±0,51	1,54±0,56	1,57±0,55	0,66	0,242	0,206	0,64	0,268	0,228
Rafaela	1,35±0,45	1,42±0,44	1,61±0,76	0,74	0,059	0,044	0,48	0,591	0,438
Paraná	1,25±0,52	1,43±0,43	1,48±0,47	0,77	0,074	0,056	0,65	0,119	0,090
Concepción del Uruguay	0,94±0,34	0,95±0,27	0,95±0,27	0,62	0,042	0,044	0,62	0,042	0,044
Período P-V	PO	PE con NF	PE sin NF	Con NF			Sin NF		
				R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE
Marcos Juárez	2,95±0,91	2,19±0,84	2,18±0,88	0,80	0,172	0,058	0,41	0,577	0,196
Manfredi	1,96±0,84	2,019±0,73	2,09±0,78	0,89	0,091	0,045	0,75	0,204	0,100
Rafaela	1,89±0,62	1,88±0,59	2,49±0,84	0,96	0,015	0,008	0,47	0,733	0,389
Paraná	1,32±0,52	1,43±0,43	1,48±0,47	0,97	0,021	0,033	0,91	0,062	0,033
Concepción del Uruguay	1,24±0,42	1,10±0,28	1,10±0,28	0,87	0,052	0,042	0,87	0,052	0,042

Referencias: Coeficiente de determinación ajustado (R^2 Adj); raíz del error cuadrático medio (RMSE) y raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)

Con el objetivo de abordar el tema desde una perspectiva distinta, en la figura 12, se representan diagramas de dispersión para corroborar visualmente las relaciones observadas. Se pueden identificar algunos patrones de comportamiento entre Δ Biomasa - profundidad de NF.

En Marcos Juárez, en el período de crecimiento de O-I, el modelo con niveles de NF menores a 1,5 m de profundidad, presenta sobre o subestimaciones en los valores de la biomasa y en P-V, se repite ese comportamiento en el rango de 0,5 a 4 m de profundidad, y a partir de este último valor se estabilizan las diferencias en la biomasa estimada en ambas estaciones de crecimiento.

Los valores señalados muestran que napas más cercanas a la superficie se relacionaron, en algunas oportunidades, con menores producciones de biomasa forrajeras (ej: letra a que corresponde al período de corte O-I del 17-4-17 al 2-6-17) y en otras con mayores producciones de biomasa (ej: letra b, corresponde al período de corte 27-2-09 al 26-3-09). En P-V, también se observó un comportamiento similar, relacionados con la profundidad de la NF y lluvias ocurridas próximas a esos cortes (letra a corresponde al período de corte 11-1-17 al 2-2-17; letra b al período 23-1-09 al 27-2-09 y la letra c al período 8-11-07 al 7-12-07).

En Manfredi, para O-I y a partir de los 4 m de profundidad y un poco antes en P-V (3,5 m), se observan, en general, disminuciones en los valores de producción de la biomasa, y profundidades mayores a esos límites las producciones de biomasa se acercan a los valores observados. Como consecuencia de períodos de lluvias que exceden a los valores promedios de la localidad el ascenso del nivel freático se relacionó negativamente con la biomasa en algunos cortes modelados (ej letra a en O-I corresponde al período de corte 14-2-17 al 13-3-17 y al período en P-V del 12-10-05 al 10-11-05), mientras en otros tuvo un efecto positivo en la producción de biomasa (ej: letra b en P-V corresponde al período de corte 20-10-10 al 11-11-10).

Para Rafaela y en la estación climática de O-I, napas que fluctúen hasta los 4,2 m pueden sobre o sub estimar las producciones. Para P-V, si no se considera la NF siempre sobre estimaría las producciones. A partir del límite analizado (4,2 m) no existirían diferencias al considerar o no la NF en el modelo.

En Paraná, la NF poco profunda y hasta los 3 m, las producciones son más bajas, independientemente de la estación de crecimiento, para luego estabilizarse. Los puntos señalados en cada estación de crecimiento en la figura 12, señalan cortes realizados en períodos muy húmedos (ej: 26-3-10 al 28-7-10, en O-I y 15-9-10 al 28-7-10, en P-V).

Concepción del Uruguay presenta una NF tan profunda que resulta indiferente considerarla o no en el modelo.



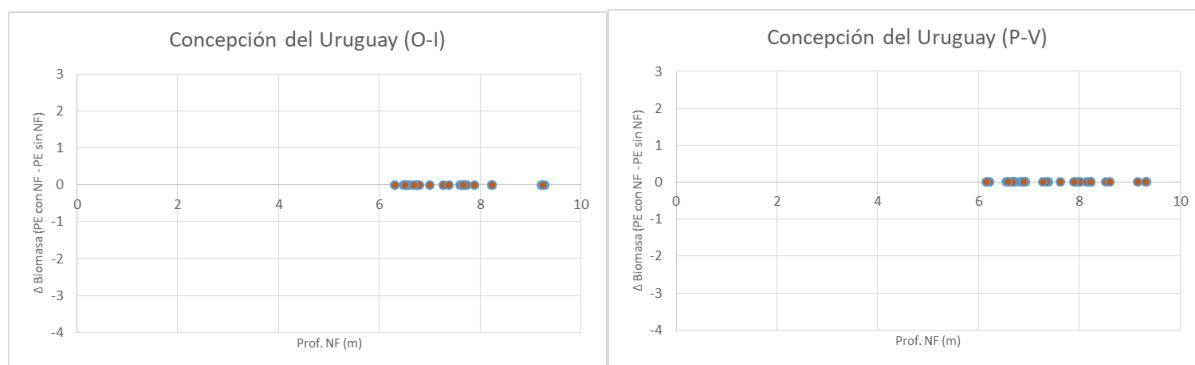


Figura 12. Diagrama de dispersión entre la diferencia entre producción estimada con y sin napa freática (Mg MS/ha) y la profundidad de la napa freática (NF, m). Las letras y flechas señalan períodos de cortes modelados).

Un aspecto particular se relaciona a la fluctuación del aporte por ascenso capilar que realiza la NF, dependiendo del tipo de suelo local y de cada situación climática (tabla 24). Los valores promedios que muestra el modelo fluctuó entre localidades, y se registraron importantes variaciones en cada valor medio. Se destaca la localidad de Concepción del Uruguay, el modelo no registró aportes en ninguna de las situaciones climáticas. Caso contrario es la localidad de Rafaela, el modelo registra altos valores, en especial en el período O-I y en situación climática definida como normal (99,83 mm). Marcos Juárez es la segunda localidad que presenta aportes elevados, mientras que en Manfredi y Paraná se muestran valores entre 1 a 6 mm aproximadamente.

Tabla 24. Valores promedio y desvíos en los aporte de la napa freática (mm), según cálculos del modelo AquaCrop, en 10 cortes por estación de crecimiento, condición hídrica y localidad.

		Marcos Juárez	Manfredi	Rafaela	Paraná	Concepción del Uruguay
P-V	Seco	21,27±38,95	4,85±0,86	55±69,87	4,48±11,83	0
	Normal	14,36±50,26	4,64±0,68	20,55±19,98	5,99±17,19	0
	Húmedo	38,12±45,19	4,36±0,74	39,75±25,83	2,83±5,67	0
O-I	Seco	51,56±52,01	5,48±1,01	54,54±38,11	4,81±7,5	0
	Normal	19,05±31,14	5,52±1,12	99,83±106,44	0,99±1,45	0
	Húmedo	22,13±33,97	4,88±1,71	53,76±84,2	3,95±8,48	0

5-9-3 Eficiencia del uso del agua en alfalfa (EUA) obtenida por el modelo AquaCrop

La calibración ha ofrecido resultados bastante exactos en la producción de la biomasa aérea en los cortes, desde esta perspectiva se analizó los valores en la EUA obtenidos por el modelo en las muestras de cortes consideradas en el estudio.

En la tabla 25 se observan las relaciones de las EUA, considerando las estaciones de crecimiento, independientemente de las condiciones del año, para diferenciar localidades. La localidad de Marcos Juárez, fue la que mostró las mayores eficiencias, en contraste con la localidad de Concepción del Uruguay, en cada período de crecimiento. Rafaela fue muy eficiente en el período P-V, no diferenciándose en O-I con Paraná y Manfredi. Estas últimas localidades tuvieron similares eficiencias en el período de P-V.

Tabla 25. Diferencias entre la eficiencia del uso del agua (EUA, Mg MS m³) en cada estación de crecimiento y localidad (*Referencia: letras distintas, por localidad, diferencian EUA en alfalfa entre estaciones de crecimiento, según T de Tukey (p<0,05).*)

Localidad	EUA (P-V)				EUA (O-I)			
	medias	Dif.	p-valor	gl-error del Modelo	medias	Dif.	p-valor	gl-error del Modelo
Marcos Juárez	2,31	a	0,0004	205	2,96	a	<0,0001	205
Manfredi	1,91	ab			1,91	b		
Rafaela	2,31	a			2,14	b		
Paraná	2,08	ab			2,01	b		
Concepción del Uruguay	1,68	c			1,35	c		

Con el fin de analizar con mayor detalle la EUA en cada localidad, se graficaron los valores de la biomasa producida por m³ de agua evapotranspirada, por estación de crecimiento (figura 13). La EUA en alfalfa presentó valores que variaron de acuerdo a las estaciones de crecimiento y períodos climáticos contrastantes (secos, normales o húmedos), sin embargo no evidenciaron diferencias con significancia estadística, con excepción de Marcos Juárez. Los resultados mostraron que alfalfa tuvo mejor performance en esta localidad, el valor más alto se alcanzó en los períodos secos de crecimiento O-I con 3,59 Mg MS m⁻³ de agua evapotranspirada, valor que superó significativamente las productividades del resto de las localidades.

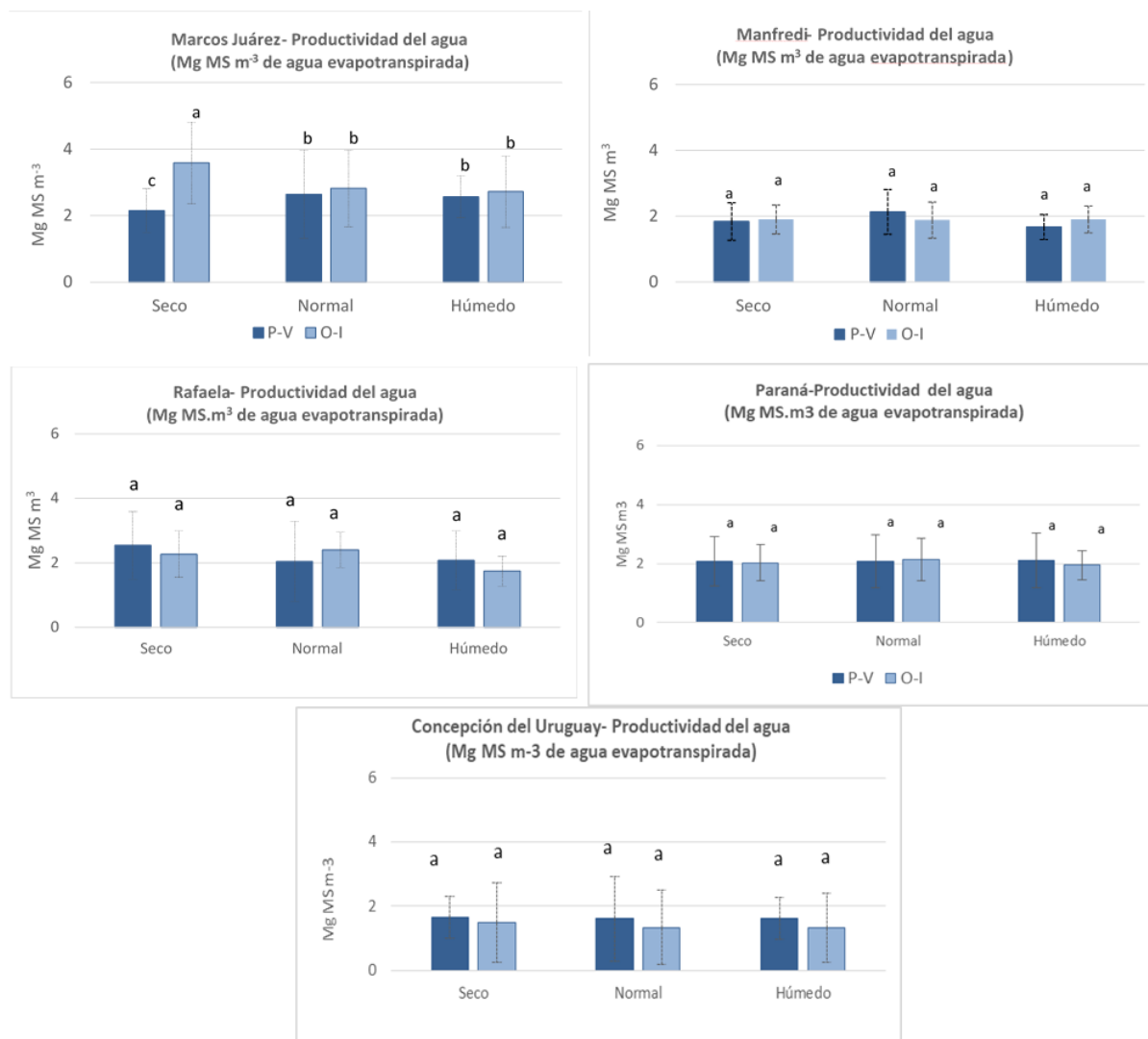


Figura 13. Eficiencia del uso del agua (EUA, kg MS m⁻³), en cada estación de crecimiento (P-V y O-I) y años secos, normales y húmedos, en cada localidad de estudio. (Referencia: letras distintas, por localidad, diferencian EUA en alfalfa entre estaciones de crecimiento y condición climática, según T de Tukey ($p < 0,05$)).

5-10 Índice de valoración de cultivares (Iv)

Para explicar la variabilidad de los cultivares comerciales de alfalfa con respecto a todas las niveles de resistencias a plagas y enfermedades intervinientes en cada uno de ellos y determinar las correlaciones entre ellas, se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) suman el 52 % de la variabilidad debida a interacción cultivar * resistencia. Esto significa que de la variación debida a la interacción, más del 50% se puede observar con estas dos primeras CP (ejes horizontal y vertical) (Figura 14). En cuanto a la asociación positiva de cultivares con resistencia se observa que, por ejemplo,

Baralfa 926, WL 903, Superstar se asocian a Fitóftora, menor asociación presentaron WL 818, Target 990, Uro Alfa, WL 903, entre otros. De esta manera se observan cv muy asociados a la resistencia en cada plaga o enfermedad.



Figura 14. Biplot generado por el análisis de componentes principales de los cultivares comerciales en estudio (n=94), para el promedio de las resistencias bióticas evaluadas.

Los autovalores se relacionan con la varianza explicada de las componentes principales y permite determinar la proporción de varianzas explicadas por cada componente (tabla 26). En el caso de valores que el modelo determinó el número de componentes principales está dado por aquellos autovalores mayores que uno. En este caso, solamente habría un dos componente principal correspondiente a lambda ($\lambda = 1,88$ y $1,14$) que contienen casi toda la información; sin embargo, para este análisis se trabajará con todos los componentes ya que se busca integrar todas las resistencias. También se destaca la expresión de cada componente en términos de autovectores, la formación de la matriz de vectores en la figura 14 se formó con los autovectores seleccionados en las columnas e1 y e2 de la tabla 26.

Tabla 26. Autovalores y autovectores de las componentes principales generadas.

Autovalores				Autovectores	
Variable	Valor (λ)	Proporción	Prop Acum	e1	e2
Moteado	1,88	0,31	0,31	0,45	0,54
Verde	1,14	0,19	0,5	0,35	-0,5
Azul	0,95	0,16	0,66	0,43	0,28
Fitóftora	0,79	0,13	0,79	0,55	0,14
Fusariosis	0,73	0,12	0,91	0,28	-0,38
Antracnosis	0,51	0,09	1	0,34	-0,47

A nivel de la CP1, que explica por sí sola casi 32 % de la variabilidad total, se aprecia la alta diferenciación entre dos agrupamientos en cultivares. En la tabla de correlaciones (tabla 27), uno de los resultados de la salida del análisis de CP, se observa que las resistencia a pulgón moteado, pulgón azul y fitóftora, exhibieron la mayor inercia y tendieron a correlacionarse positivamente. Existieron varios cv que presentaron los mayores valores para esos caracteres (ej: se puede observar la formación de dos grandes grupos de cv con similar comportamiento respecto a las variables).

La CP2 muestra asociaciones negativas con la resistencia a pulgón verde, fusariosis y antracnosis. Se observa una clara contraposición de la correlación de las variables, evidenciando que el grupo de resistencias bióticas son formuladas de forma diferente por los cultivares comerciales. Se destaca que los cultivares Lacta 820, Suprema y ZZ 809 S se apartan de estos agrupamientos, son los cv que presentan los menores valores en la jerarquización de la variabilidad de la CP1.

Tabla 27. Correlaciones con las variables de resistencia

Variables	CP 1	CP 2
Moteado	0,61	0,57
Verde	0,47	-0,53
Azul	0,59	0,30
Fitóftora	0,75	0,15
Fusariosis	0,38	-0,41
Antracnosis	0,47	-0,50
<i>Correlación cofenética = 0,839</i>		

La CP1 fue utilizada como un valor categórico o índice de valoración (Iv), que integra la dimensión del conjunto de resistencias incorporadas en cada cultivar. A partir de esta jerarquización, se aplicó un análisis de correlación canónica que proporcionó resultados respecto a la posibilidad de validar la fortaleza del índice. Se analizó la relación existente en la

producción anual de materia seca en cada cultivar, como promedio de los años del período 2000-2018, en cada localidad, y el valor generado en la CP1 (Iv).

Se diseñó una matriz de datos para cada cultivar o unidad de análisis, se asignaron dos conjuntos de variables. El primer conjunto formado a partir de la producción anual de la biomasa en cada localidad ($\text{Mg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y el segundo formado por el Iv.

En la tabla 28 se observan los resultados de este análisis. La relación entre el conjunto de variables de la producción y el Iv fue positiva y de 0,68. Se observa que existe un 46% de variabilidad en los rendimientos de biomasa anual explicado por el Iv, el otro 59% estaría explicado por otras condiciones ambientales de la región.

Tabla 28. Resultados obtenidos por el análisis de correlaciones canónicas

Correlación canónica	
R	0,68
R ²	0,46
Lambda	31,44
gl	5,00
p-valor	7,7E-06

Posteriormente el Iv fue subdividido en terciles, con el objetivo de definir tres categorías en la integración en las resistencias. Así cada categoría incluye el 33,33% de los datos. El tercil inferior corresponde a la categoría “bajo” (Iv III), el tercil central a la categoría “medio” (Iv II) y el tercil superior a la categoría “alto” (Iv I). En la tabla 29 se agrupan los cultivares según la valoración propuesta para el Índice.

Tabla 29. Cultivares agrupados por cualidades de resistencia bióticas, según el Iv).

Iv I	Cultivares	Iv II	Cultivares	Iv III	Cultivares
1,24	5939 p	-0,69	SALINA PV	-4,86	LACTA 820
1,24	BACANA	-0,6	BRAVA GS	-4,06	ZZ 809 S
1,24	G 909	-0,59	ARMONA	-2,61	SUPREMA
1,24	LPS 8500	-0,51	VERDOR	-2,43	PRO INTA CARMINA
1,24	MAGNA 804	-0,34	SW 10	-2,33	PATRIARCA
1,24	MIREYA	-0,3	MARICOPA	-2,32	DK 189
1,24	PF 9000	-0,26	SORAYA	-2,32	DK 194
1,24	WL 903	-0,04	FRANCA	-2,07	RD 69
1,37	TARGET 990	-0,04	MONARCA SP INTA	-2,04	BAR PAL 149
1,37	URU ALFA 9	0,09	TRAFUL INTA PV	-1,88	VILLA
1,37	URU ALFA 10	0,12	EBC 90	-1,84	SW 9628
1,42	810+ (Gapp)	0,17	CW 127	-1,72	CATALINA (SW)
1,54	BARALFA 85	0,17	YOLO	-1,36	ESP G 10
1,54	CW 1010	0,22	BARBARA SP INTA	-1,36	PRO INTA MORA
1,54	EXP.LT 58-39	0,26	MILONGA II	-1,19	CAUTIVA
1,54	FGA Exp. 9T1	0,39	CW 194	-1,19	GITANA
1,54	GATEADO	0,44	BAR VRD	-1,11	SOFÍA
1,54	LPS 9500	0,47	MEDINA	-1,11	TIGRESA
1,54	MAGNA 801	0,64	GALIA	-1,05	ACA 903
1,54	P5939	0,64	MAGNA 901	-0,94	PRO INTA MONARCA
1,54	PANALFA 90	0,69	969+ (Gapp)	-0,94	SUPERSONIC
1,54	WL 919	0,69	G 969	-0,85	ESTANZUELA CHANA
1,84	FULANA	0,69	NEO ALFA	-0,83	MAGNA 4N900
1,84	MAITENA	0,76	EXP 1048	-0,77	SALTANA
1,84	MECHA	0,76	SUPERSTAR	-0,77	SW 9215
1,84	MILONGA	0,86	CW 194 Premium	-0,76	LIMAY INTA PV
1,84	WL 1058	0,86	RUANO	-0,72	BAR PAL 10
1,84	WL 818	0,89	ZAINO	-0,72	SARDI 10
		0,9	BAR PAL 139		
		0,9	CW 809		
		0,9	CW830		
		0,9	QUEEN 910		
		0,94	BAR 814		
		0,94	BARALFA 9242		
		1,07	DK 191		
		1,12	MAGNA 868		
		1,16	MARTINA		
		1,16	RIO GRANDE		

Posteriormente, a cada categoría y según el cv se le fue asignando valores de producción de biomasa forrajera anual en base a una segunda clasificación: años húmedos, secos y normales. Teniendo en cuenta lo anterior fueron consideradas estas matrices de datos en todas las localidades.

Con el objetivo de comprobar si las producciones de MS, en cada grupo de cv (I, II y III), en los años con excesos o déficit de P o en normales (definidos en el punto 3-1), mostraban un comportamiento diferencial, se aplicó diferencias de medias apareadas con la Prueba t de Student para muestras apareadas (tabla 30). El análisis estadístico seleccionado respondió a que el tamaño de la muestra era pequeño debido a que en el período 2000-2018, ocurrieron, en general, pocos años extremos secos y húmedos disponibles (n=5 a 8, según localidad).

En general, hubo diferencias significativas entre cv que pertenecían al grupo I con los grupos II o III (valores $p < 0,01-0,07$), en años normales, excepto en Concepción del Uruguay. Esta característica se mantuvo en años lluviosos en las localidades de Manfredi, Rafaela, Paraná y Concepción del Uruguay, no así en Marcos Juárez. Por otra parte, en años secos, las diferencias entre grupos, sólo se observó en Rafaela y Paraná.

Tabla 30: Producción de materia seca en alfalfa (MS, Mg MS ha⁻¹año⁻¹), coeficientes de variación entre los cultivares (CV, %) y pruebas de medias apareadas (T-Student, $p < 0,05$), por Índice de valoración (I, II y III), en años normales y con excesos o déficit de precipitaciones, en cada localidad.

Marcos Juárez			
<i>Mg MS ha⁻¹ año⁻¹</i>	Exceso	Déficit	Normal
Iv I	19,1	12,96	22,15
Iv II	18,41	12,32	20,85
Iv III	17,96	12,21	21,5
<i>CV (%)</i>			
Iv I	8	10	5
Iv II	11	11	4
Iv III	12	14	8
<i>Prueba T apareadas (p-bilateral)</i>			
Iv I/Iv II	0,18	0,16	0,00
Iv I/Iv III	0,22	0,32	0,07
Iv II/Iv III	0,54	0,89	0,01

Manfredi			
<i>Mg MS ha⁻¹ año⁻¹</i>	Exceso	Déficit	Normal
Iv I	14,7	5,55	12,08
Iv II	14,15	5,57	11,15
Iv III	13,68	4,74	10,95
<i>CV (%)</i>			
Iv I	19	34	20
Iv II	20	30	20
Iv III	26	45	21
<i>Prueba T apareadas (p-bilateral)</i>			
Iv I/Iv II	0,01	0,92	0,01
Iv I/Iv III	0,17	0,17	0,00
Iv II/Iv III	0,40	0,23	0,15

Rafaela			
<i>Mg MS ha⁻¹ año⁻¹</i>	Exceso	Déficit	Normal
Iv I	11,38	17,5	17,84
Iv II	10,52	13,66	15,97
Iv III	10,21	12,43	16,7
<i>CV (%)</i>			
Iv I	11	15	15
Iv II	12	17	18
Iv III	8	33	14
<i>Prueba T apareadas (p-bilateral)</i>			
Iv I/Iv II	0,13	0,10	0,00
Iv I/Iv III	0,05	0,10	0,05
Iv II/Iv III	0,53	0,38	0,03

Paraná			
<i>Mg MS ha⁻¹ año⁻¹</i>	Exceso	Déficit	Normal
Iv I	11,31	9,89	12,47
Iv II	10,67	9,23	11,9
Iv III	10,14	8,5	11,47
<i>CV (%)</i>			
Iv I	6	15	8
Iv II	11	21	11
Iv III	14	21	12
<i>Prueba T apareadas (p-bilateral)</i>			
Iv I/Iv II	0,00	0,05	0,01
Iv I/Iv III	0,18	0,08	0,01
Iv II/Iv III	0,45	0,26	0,14

Concepción del Uruguay			
<i>Mg MS ha⁻¹ año⁻¹</i>	Exceso	Déficit	Normal
Iv I	8,50	4,67	7,83
Iv II	8	4,64	7,88
Iv III	8,04	4,66	8,02
<i>CV (%)</i>			
Iv I	7	12	16
Iv II	6	12	11
Iv III	7	10	6
<i>Prueba T apareadas (p-bilateral)</i>			
Iv I/Iv II	0,05	0,94	0,13
Iv I/Iv III	0,06	0,96	0,51
Iv II/Iv III	0,77	0,97	0,84

En Marcos Juárez, Rafaela y Paraná, los cv del grupo I, calificados por sus mejores resistencias, presentaron las mayores producciones de MS (4% al 17%, en promedio, más que II y III, respectivamente) y las menores dispersiones relativas dentro del grupo (CV), mostrando una mayor estabilidad frente a situaciones hídricas contrastantes. Manfredi presentó altos coeficientes de variación, en cada situación hídrica. Concepción del Uruguay, en general presentó poca dispersión en los valores de productividad entre situaciones hídricas.



DISCUSIÓN

6- Discusión

La influencia de las condiciones edáficas y de las variaciones estacionales e interanuales de las condiciones climáticas de la región en estudio, son importantes ya que influyen en los valores de la productividad de los cultivos, y en alfalfa en particular.

Las tendencias actuales en investigación se centran en analizar las interacciones del sistema planta-clima-suelo, detectar y definir los factores del suelo y del clima que limitan la producción agropecuaria. Así también, poder predecir los rendimientos de los cultivos y los posibles futuros comportamientos de las variables que pueden afectar positiva o negativamente al mismo. Teniendo en cuenta la complejidad de estas relaciones, la mejor forma de analizarlas es a través de modelos de simulación.

En esta tesis se ajustó la productividad de alfalfa a través del modelo de simulación AquaCrop. Este modelo permite, con aproximaciones teóricas llegar a analizar algunos de los procesos dinámicos naturales que ocurren en el ecosistema. Como fue mencionado AquaCrop utiliza la ecuación original de Doorenbos y Kassam (1979) como punto de partida para calcular la biomasa del cultivo, en base a la cantidad de agua transpirada, y el rendimiento del cultivo como la proporción de biomasa que se concentra en las zonas cosechables. Además, la escala de tiempo diaria que utiliza en las estimaciones representaría mejor la dinámica de la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua.

Como no se disponía de ningún punto de referencias para correr el modelo en alfalfa y a modo de una evaluación diagnóstica, fue necesario un análisis previo del comportamiento productivo en la región en estudio, considerando las localidades de Marcos Juárez, Manfredi, Rafaela, Paraná y Concepción del Uruguay.

En principio, en un período de 18 años, se analizaron aspectos climáticos y productivos de alfalfa de GL corta, para encontrar respuestas a este panorama complejo y analizar todas las posibilidades de utilizar el modelo, es decir: considerar la producción acumulada del período anual de crecimiento, o desde siembra al primer corte, o evaluar cada corte individual o consecutivos, o bien agrupados por estaciones de crecimiento, etc. Estos análisis definieron que se tomarían cortes individuales independientes, agrupándolos por estaciones de crecimiento (O-I y P-V), en situaciones climáticas diferentes (déficit, excesos o normalidades en las precipitaciones). Luego se evaluó la relación estadística entre cada variable del balance hídrico, P, ETo y NF, con las productividades de alfalfa, mostrando una variabilidad regional en el

comportamiento, lo cual indicó la complejidad del aporte de agua en el cultivo de alfalfa, fundamentando aún más el uso del modelo de simulación AquaCrop.

6-1 Calibración y validación de Aqua Crop en alfalfa.

AquaCrop es un modelo de gran funcionabilidad para el cálculo del rendimiento de cultivos herbáceos, simula la respuesta en el rendimiento de acuerdo al agua transpirada por el cultivo, según el volumen de agua disponible en el suelo, estimado a partir de datos de P y el aporte que pudiera hacer la NF (Stedutto *et al.*, 2009; Toumi *et al.*, 2016).

Para la generación y cálculo de las variables y parámetros de entrada al modelo, en el módulo cultivo, se utilizó la información disponible en la bibliografía, ya que no se disponía de datos de campo propios. Solo se pudo contar con el dato final de acumulación de MS en cada corte realizado en la Red (PO) y se los contrastó con las PE del modelo, resultando que la integración con los datos reales de las variables climáticas, de suelo y de NF, logran una buena calibración. La resultante final del modelo es la EUA en alfalfa. En este trabajo fue analizada solo como dato orientador del balance hídrico. No obstante, como será discutido más adelante, los valores que estima el modelo son cercanos a resultados publicados por otros autores en la especie (López *et al.*, 1997; Collino *et al.*, 2007). Lo interesante en este estudio, es que permite conocer la lógica que respalda a las relaciones entre crecimiento-clima-suelo para lograr el balance hídrico en cada corte, e interpretar algunos componentes de esas “cajas negras” en los procesos.

En este marco el primer parámetro que se debe determinar es CC, valor que se encuentra altamente relacionado con el índice de área foliar (IAF). Relación que fue documentada por Hsiao *et al.* (2009); Hsiao *et al.* (2012) y Montoya Sevilla (2013). Estos autores señalan que cuando el IAF es mayor a $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, los valores de CC son superiores al 90%, precisando que cuando valoran entre 4,5 a $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, la CC es del 95% o superior. Utilizando métodos indirectos y ecuaciones se calibró con menores valores de CC (85% en P-V y 65% en O-I).

La correcta simulación de la cobertura foliar es fundamental para la representación del modelo; porque afecta la tasa transpiratoria y en consecuencia la acumulación de biomasa (Farahani *et al.*, 2009). Así, los ajustes que pudiesen ser realizados en ensayos a campo mostrarían más exactitud en el modelo, en ellos la densidad y distancia en líneas de siembra en alfalfa juegan un rol importante en las determinaciones del IAF. El trabajo realizado por Mattera (2004), confirma importantes variaciones en el IAF al distanciar las líneas. En cuanto al valor de

densidad de plantas, el modelo los asocia con porcentajes de cobertura inicial. Si se cambia solo la densidad y permanece constante el resto de las variables “no conservativas”, los valores de PE se van modificando con una variación que no superan el 4% al utilizar la máxima y la mínima densidad de alfalfa que el modelo permite (200 a 60 plantas m^2).

Para cada simulación, se debe tener en cuenta que el modelo asume un crecimiento lineal hasta los 60 días, esto se debe a que no puede explicar los complejos procesos ambientales (fundamentalmente las variaciones de temperatura y velocidad del viento) y fisiológicos que ocurren en la planta y sus impactos en la producción de biomasa (Guendouz *et al.*, 2014; Amiri, 2016). Para Steduto *et al.* (2009), en la simulación de la biomasa ese modelo lineal fue altamente contrastado con numerosas especies, entre las que alfalfa no estaría considerada. Pese a ello, se consideraron adecuados los parámetros del crecimiento lineal. Afirmación que se fundamenta considerando el momento óptimo de defoliación aplicado según la metodología de corte de los ensayos de la Red. Estos determinan que los cortes se realizan siguiendo criterios fenológicos (porcentaje de floración o altura del rebrote basal sin realizar evaluaciones de biomasa intermedias durante un rebrote). Tal criterio corresponde cuando la cubierta vegetal alcanza las máximas tasas de crecimiento promedio (Parsons y Penning, 1988), que coincide con una intercepción de la radiación solar aproximada del 90-95%. Los valores promedios de los días entre cortes, en cada localidad y estación climática (tabla 14), muestran que solo la estación de crecimiento invernal logra superar los 60 días, no obstante a ello, se siguió observando aceptables ajustes entre PE y PO en esa estación.

Es importante remarcar que en la etapa inicial de la modelación, la humedad previa presente en la superficie del suelo, así como la fracción del mismo cubierta por la vegetación precedente o B_i , influyen sobre el valor final de PE. La etapa inicial contempla por un lado, la cobertura del canopeo, relacionada a la densidad de plantas, asignándoles valores mínimos del 3% (equivalentes a 60 plantas m^{-2}) y máximos del 10% (equivalente a 200 plantas m^{-2}), como fue mencionado oportunamente. Por otro lado, también es importante la B_i , entendida como remanente de biomasa del corte anterior. No se pudo definir un valor único para cada localidad, ya que este valor es altamente dependiente de la cantidad de MS del corte precedente, y como los cortes tienen una gran variabilidad en cuanto a su cantidad de MS no se logra conseguir un valor de B_i único. En este estudio y para calibrar el valor del parámetro, se fue probando diferentes B_i hasta comprobar los mejores valores con el resto de los parámetros del modelo ya fijados. Los mismos fluctuaron entre 0,200 y 1 Mg MS ha^{-1} , valores tomados como lógicos

según la bibliografía considerada para definirlo. Al respecto, Berone *et al.* (2017), calibrando el modelo McCall en alfalfa en GL 8-10, también debió considerar una biomasa previa verde, utilizando el valor de 0,2 Mg de MS ha⁻¹ (altura de corte = 5 cm). Por otra parte, Terán Cháves (2015), aplicando AquaCrop en gramíneas forrajeras, determina que Bi en *Lolium perenne*, era casi igual al valor del corte de la producción de MS previa (más de 2 Mg MS ha⁻¹).

No se desconoce que el remanente después del corte, dado por la presencia de rebrotes de corona, sumado a la cantidad de carbohidratos y nitrógeno de reserva en la raíz para la producción de nuevos tallos y hojas, tienen un efecto positivo en la producción de la MS acumulada para el corte siguiente (Meuriot *et al.*, 2004; Martiniello y Texeria da Silva, 2011). Para lograr una mayor robustez en el modelo, en especies que son defoliadas recurrentemente, es necesario valorar a campo el remanente del corte. Este aspecto, aún no habilitado en el modelo de cortes secuenciados en el tiempo, sería importante ya que el efecto, según la estación del año, está relacionado con una mayor capacidad de interceptación y absorción de radiación afectando la acumulación de la biomasa forrajera del corte siguiente. Se pudo determinar que el ajuste de la Bi, lograría modificar la calibración del modelo entre un 8 a un 19%.

Otra variable a destacar es la humedad inicial del suelo, la misma puede ser definida como cc, PMP, % de TAW o S (Allen *et al.*, 1998) y fue predicha comparando las P ocurridas 15 días previos al inicio de cada modelación, con el valor histórico (2000-2018) de esos días, para definir el estado hídrico inicial del suelo. Cuando se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, teniendo libertad de movimiento y pudiendo ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que resulta en una dificultad de extraer agua por el cultivo (Allen *et al.*, 2006). Estos estados iniciales condicionan el paso diario de transpiración del cultivo. Así, el valor de Kc inicial será alto cuando el suelo se encuentre húmedo debido a excesos de P y será bajo cuando la superficie del suelo se encuentre seca por déficit de P. El modelo inicia el balance con esos valores de humedad y luego acompañan la evolución de la humedad retenida en relación a los eventos posteriores que humedezcan o no al perfil (P y/o NF), en el período de corte que se considere. Las recomendaciones para manejar el intervalo entre cortes en alfalfa que usa la Red, como fueron mencionadas, se han basado en aspectos de desarrollo del cultivo. De esta manera, se estableció que cuando se manifiesta el estado reproductivo (floración), la alfalfa debiera ser cortada cuando se logra el 10% de floración, mientras que ante la ausencia de floración, el inicio

del corte debiera ocurrir cuando los rebrotes basales alcanzan 5 cm de altura. Si bien se ha establecido que el 10% de floración suele compatibilizar producción y calidad nutritiva del forraje, lo determinante en esta recomendación es precisar correctamente el valor, ya que la floración se presenta, en general, muy desuniforme en las plantas y se hace difícil determinar el óptimo estado de crecimiento para realizar el corte.

Por otra parte, cortando en ese momento, la pastura en las parcelas siguientes continúa creciendo, pero lo hace a expensas de la acumulación de tallos y de material muerto más que de hojas (Romero *et al.*, 1987). Las parcelas subsiguientes, se empiezan a “pasar”, es decir, acumulan más biomasa, más tallo y están mucho más florecidas, especialmente durante la época de temperaturas altas y ascendentes (P-V). Por ello, se recomienda considerar los GDA, determinación que se basa utilizando una T_b para el cálculo (Sardiña *et al.*, 2015a).

La precisión con la que un modelo de GDA puede predecir el desarrollo de un cultivo o momento de corte en este caso, dependerá de la exactitud de la determinación de la T_b . La calibración realizada en el período O-I, puso en evidencia que utilizar T_b de 5°C para calcular los GDA en los cortes de O-I, no permitía un buen ajuste del modelo. Por tal motivo se estimaron las T_b , aplicando los métodos propuestos por Arnold (1959), para los períodos O-I y P-V en forma separada, resultado una T_b de 2,5°C en O-I y 5°C en P-V. Estos valores permitieron obtener GDA de 662 en O-I y 592 en P-V, y reducir significativamente los CV de esos GDA, como promedio en la región de estudio (8% y 11% de CV en O-I y P-V, respectivamente).

Este resultado se diferencia a lo utilizado por diversos investigadores en los modelos fisiológicos actuales de alfalfa, ya que la mayoría, si no todos, emplean una T_b de 5°C para todo el ciclo. La justificación para usar la temperatura de 5°C se basa en el crecimiento de la hoja de alfalfa en ambientes totalmente controlados (cámaras de crecimiento) (Wolf y Blaser, 1971; Brown *et al.*, 2005) y por otro lado en que es la temperatura mínima de crecimiento. En la bibliografía internacional se evidencian autores que revén este valor de T_b , por un lado señalan que la T_b derivada en cámaras de crecimiento carece de verificación de campo donde las interacciones dinámicas de la planta y el medio ambiente pueden conducir a una relación diferente de planta/temperatura (Wang, 1960; Larcher, 1980). Por otro lado, Sharratt *et al.* (1986, 1987, 1989) expresan que el uso de una T_b constante es controvertido ya que las plantas de alfalfa responden de manera diferente a la misma temperatura dependiendo de la etapa de crecimiento alcanzado, indicando que la T_b de la alfalfa cambia con el tiempo y no sería

correcto definir solo una para todo el ciclo. Sus estudios fueron realizados en cámara de crecimiento y experimentos de campo, obteniendo que la mejor estimación de T_b en el período de crecimiento de primavera era $3,5^{\circ}\text{C}$, significativamente menor que el valor de 5°C utilizado actualmente, y para los períodos de los veranos posteriores, las estimaciones de T_b fueron de $7,5^{\circ}$ y 10°C , siendo significativamente más alta que el valor de 5°C .

Posiblemente estudios específicos a campo, determinen que otros factores como el fotoperíodo, las relaciones hídricas y el microclima del cultivo, que no se consideran en los ensayos de cámaras de crecimiento, podrían ser importantes para determinar el valor preciso de la T_b en cada estación de crecimiento. En síntesis, si bien los valores de T_b encontrados en esta tesis están avalados por bibliografía y por la metodología de Arnold (1959) y por el mejor ajuste del modelo AquaCrop, se destaca la necesidad de profundizar estudios sobre la validez de estas T_b en cada etapa del ciclo de alfalfa, a partir de ensayos regionales con materiales genéticos de uso frecuente en ambientes de climas templados.

Para concluir, los ajustes en la fase de calibración fueron buenos teniendo en cuenta los valores de los parámetros estadísticos aplicados. Se observa más desviaciones en períodos húmedos que durante períodos secos o normales, entre los valores observados y estimados. Respuesta relacionada a que el modelo fue desarrollado para lograr determinar valores de la productividad del agua en ambientes con limitantes hídricas, en concordancia con lo encontrado por Heng *et al.*, (2009), Hsiao *et al.*, (2009) y Raes *et al.* (2011).

En la validación, las condiciones del clima, fueron las reales ocurridas durante cada período de corte, las características del suelo también se presentaron en forma detallada según cada localidad, las condiciones de manejo de la defoliación fueron iguales en cada período considerado y no hubo limitantes en la fertilidad del suelo. La validación se desarrolló tomándose como base las variables del cultivo de alfalfa, obtenidas en el proceso de calibración, para cada uno de los cortes que ocurrieron en el período 2015-2018, establecidos en la Red para cada localidad.

Los estadísticos obtenidos en la validación del modelo, mostraron buenos ajustes entre las PO y PE, con coeficientes de determinación elevados ($R^2=0,68$ a $0,84$), bajos errores en la cantidad de MS (RMSE= $0,29$ a $0,43$ Mg MS ha^{-1}), el NRMSE fue aceptable (15-25%) y los valores de EF variaron entre $0,55$ a $0,85$ y d, sus valores fueron altos entre $0,85$ a $0,89$. Valores que fueron considerados como aceptables por otros autores en diversas validaciones del modelo, por

ejemplo: en frijol (Olivera *et al.*, 1916); en soja (Moriassi *et al.* 2007); en papa (Montoya *et al.*, 2016); en cebada (Araya *et al.*, 2010), en avena y raygras (Terán Cháves, 2015), entre otros.

En resumen, si bien no se tienen datos propios de campo, los resultados logrados reconocen el buen comportamiento del modelo para representar, la variabilidad interestacional e interanual de la productividad y la buena aptitud para reproducir la MS producida en diferentes localidades y diferentes condiciones hídricas.

No obstante, AquaCrop sobrestimó las producciones de MS acumulada en los cortes que superaban los 1-2 Mg de MS ha⁻¹, caso opuesto con valores menores a la referida producción, resultado también observado por Geerts *et al.* (2009) en quinua.

Se destacan como elementos más sensibles para lograr mejores predicciones, la medición de la CC como variable modular en la interacción entre la planta y la atmósfera y, en base a ella se estructura la dinámica de crecimiento, consumo de agua y productividad del cultivo. Además, la medición de la progresión de la cobertura del canopeo y de la biomasa desde el inicio del período de acumulación de MS hasta el corte, precisar el índice de cosecha en el tiempo, determinar en el terreno las condiciones hídricas del suelo y Bi del corte anterior, como así también el número de plantas de alfalfa por unidad de superficie o bien su porcentaje de cobertura basal en el momento de inicio de la modelación.

En el modelo AquaCrop versión 6, no se ha desarrollado aún el uso en especies forrajeras, las que son perennes en su mayoría, sujetas a defoliaciones frecuentes. El hecho de que no se hayan calibrado para estas especies se ha considerado como una oportunidad más que una limitación.

En la metodología del estudio se consideraron diversos escenarios climáticos (excesos o déficit hídrico o situaciones de neutralidad), en cada localidad y estación de crecimiento, sumado a las condiciones hídricas iniciales del suelo, ya comentadas. Estos resultados podrían ser considerados para proyectar posibles condiciones hídricas, así las simulaciones que surjan en esa variabilidad permitirían predecir, con menos incertidumbres la producción de MS esperada.

6-2 Variabilidad espacial e interanual de las productividades, condiciones edafoclimáticas y modelo AquaCrop.

Para el período analizado 2000-2018, las productividades estacionales estuvieron expuestas a condiciones climáticas dinámicas, años secos, normales o húmedos. Las relaciones de los factores climáticos con los procesos metabólicos que intervienen en el crecimiento y desarrollo

son los que encausarían esas respuestas en acumulaciones de biomasa variables (Bula and Massengale, 1972; Khaiti y Lemaire, 1992; Brown *et al.*, 2006).

Alfalfa presentó, variabilidad en la producción de la biomasa aérea bajo distintas condiciones de crecimiento, los rendimientos fueron fluctuantes en todas las localidades. Marcos Juárez registró las mayores producciones de MS total y Concepción del Uruguay los menores valores. Rafaela se diferenció de Manfredi y ésta de Paraná (figura 8 y tabla 12). Ante condiciones de secano, la eficiencia con la que capturan los recursos radiación y agua para la producción de biomasa aérea explicarían esas diferencias (Collino *et al.*, 2007). La producción potencial de forraje requiere de una disponibilidad no limitante de agua para satisfacer la transpiración del cultivo. Esos requerimientos hídricos dependen de la pérdida evaporativa, regulada por factores ambientales (temperaturas, vientos, humedad relativa) y morfológicos (número y tamaño de estomas, área foliar, estructura de la planta).

-En Marcos Juárez, el ascenso de la NF constituyó, en general, una oportunidad para la producción de alfalfa. Esa producción, comparativamente con el resto de las localidades, solo fue afectada en los años con mayores P para la localidad (2015 a 2017). Si bien en el ciclo 2009-2010 también fue un período de excesos de P, la producción fue considerablemente mayor debido a que el suelo heredaba condiciones previas de déficit hídrico históricos para la zona (sequías del 2007 a mediados del 2009) (Serio y Vich, 2010).

Para la condición climática normal y seca, la NF se mantuvo siempre en niveles equilibrados de 4 a 5 m, actuando como una importante fuente de agua para la especie y así mitigar los períodos de sequía que se producían (figura 7). En cambio, en los períodos húmedos, cuando el ascenso superaba el metro de profundidad, fue una limitante para el crecimiento de la especie, pudiendo ocasionar pérdidas por anoxia radicular. Al respecto, los trabajos realizados por Cisnero *et al.* (1999, 2011 y 2013) señalan que en esa región napas a menos de 1,5 m configura una situación de alto riesgo y baja productividad potencial del sitio.

-Para analizar el comportamiento de la especie en la localidad de Manfredi, se considera lo planteado por Dorenboos y Kassam (1979), autores que señalan que el máximo potencial de producción de alfalfa se alcanza con 1.200 mm anuales de precipitación, situación que se aleja de la localidad. En ellas se registraron P medias anuales de 744 mm distribuidas según un régimen estacional de tipo monzónico, con un déficit hídrico manifiesto en el período de O-I, impactando en las producciones de MS.

Se destaca que la P fue el elemento del balance hídrico de mayor variabilidad cuando se analizó la serie cronológica del período 2000-2018. La misma fue relacionada positivamente con la biomasa aérea forrajera de las PO. Bowman *et al.* (2004), encontraron una mayor proporción en esa relación ($R^2 = 0,84$), probablemente porque fueron registradas en ambientes más secos que Manfredi. En este estudio, fue la única localidad que presentó una relación positiva con las P ($R^2 = 0,20$, figura 5), si bien en períodos con altas P no compensaban la demanda de evapotranspiración, lo que le confiere ser una localidad con características limitantes para la mayoría de las variables meteorológicas de interés en el crecimiento de la especie. En este sentido, se observaron años marcadamente secos, una NF muy profunda y, a la vez, un incremento de la temperatura media del aire provocando un mayor consumo de agua por las plantas. Si bien la alfalfa puede resistir largos períodos de sequía, esta situación la obliga a reducir la expansión de las hojas, lo que afecta la fotosíntesis y como consecuencia provoca que la producción de MS se reduzca rápidamente (Moot *et al.*, 2008).

En estas condiciones la producción, en general, disminuyó en valores del 5 al 10% respecto a las acumulaciones logradas en períodos normales o húmedos. Los resultados son menores a lo señalado en otros estudios (Kisselbach *et al.*, 1929; Lucey y Tesar, 1965; Brown y Tanner, 1983; Grimes *et al.*, 1992), en los que se encontró que un estrés por agua en el suelo de Tex gruesa, provocaba una disminución en el crecimiento de alfalfa muy variable, entre un 14 a 24%.

El modelo reveló que se presentaron disminuciones en la expansión del canopeo del orden del 14% y más del 50%, en los períodos secos de P-V y O-I, respectivamente. Valores que se relacionaban con deficiencias en las P del orden del 35% y 62%, en esos períodos.

Podemos sugerir, como resultado del promedio de 12 corridas en el modelo que, en las situaciones de déficit, se registraron evapotranspiraciones en P-V de $116,22 \pm 4,08$ mm y solo ese suelo infiltraba $57,26 \pm 15,5$ mm. No es menor disponer de estas estimaciones a los efectos de lograr obtener una buena comprensión de las fluctuaciones en los requerimientos de agua que tiene alfalfa en la zona.

En síntesis y a diferencia de Marcos Juárez, en Manfredi el crecimiento de la alfalfa dependió exclusivamente de la "precipitación efectiva", fracción de la P que estuvo realmente disponible para satisfacer, al menos, parte de las necesidades de agua de las plantas de alfalfa. El suelo Haplustol éntico posee una matriz edáfica con poca capacidad de retención de agua, la profundidad de la NF contribuye en el balance hídrico cuando se aproxima a 4 m, a diferencia

de Marcos Juárez, sitio más húmedo, con suelo de mayor capacidad de retención y aportes de la NF a menor profundidad.

-En la localidad de Rafaela, centro de Santa Fe, no se manifestaron relaciones significativas entre la producción de MS, las P y el nivel de la NF (figuras 5 y 7). Se presume que, las lluvias, ya sean previas (que aseguren la recarga del perfil) o durante el ciclo del cultivo, determinarían esas biomásas. Aunque, se la destaca como localidad que produce importantes rindes de MS por año y en cortes individuales luego de Marcos Juárez. Para profundizar en estas respuestas, se documenta que la radiación solar que incide sobre el crecimiento de alfalfa posee escasa variación entre localidades de la región estudiada. Por el contrario, a lo largo del año la radiación tiene una elevada variación, con valores bajos en junio (6-10 MJ m⁻² d⁻¹) y altos en diciembre (22-24 MJ m⁻² d⁻¹). Collino *et al.* (2007), han obtenido producciones anuales en biomasa que indican una adecuada captura de radiación bajo esas variaciones a lo largo del año, destacando a esta localidad como aquella en que la mayor parte del ciclo de crecimiento se realiza con temperaturas próximas a las óptimas (18,65°C en temperatura media, comparativamente con 21,3°C como valor crítico).

Estas informaciones ponen en evidencia que el potencial de producción y por ende parte de las fluctuaciones interanuales a la que está sometida la localidad, son dependientes de los factores ambientales (radiación y temperaturas), por lo que la respuesta a la oferta hídrica está condicionada a ellas. Esa oferta se relacionaría con las propiedades hidráulicas de los suelos Argiudoles típicos de la localidad. El agua almacenada en el suelo puede ser una fuente importante de abastecimiento, sumado a considerar los aportes de la NF, que en la zona se la describe como un mosaico de profundidades bastante complejo de unidades menores (Iriondo, 2010).

Pese a la indiferencia comentada entre NF y la producción de MS (figura 7), en el modelo y en algunas situaciones de cortes, se observaron los efectos negativos de las P y el aporte de la NF, al limitar la infiltración de los excedentes hídricos y favorecer las condiciones de saturación del perfil (períodos de excesos), pero también, ambas variables, se constituyeron en recursos hídricos de relevancia, especialmente en los últimos años y en condiciones de déficit.

Se destaca, a diferencia de las localidades de Manfredi y Marcos Juárez, que en los períodos de déficit, el modelo evalúa que la disminución en los rendimientos se asociaba al cierre de estomas (valores que afectan el crecimiento en un 62%, promedio de ambas estaciones climáticas) como respuesta a una disminución en el contenido hídrico edáfico. Condición que

no afectaría la mortandad de los individuos y que los mismos se repondrían si las condiciones hídricas del suelo mejorasen. Conceptos que fueron analizados en detalles por Blackman y Davies (1985) y Davies y Zhang (1991). Más adelante se retomarán estas premisas y se los relacionarán con los resultados del capítulo Índice de valoración de cultivares.

-En Paraná, la producción de la MS en los cortes en escenarios secos y húmedos, fue similar. Se considera que en esta localidad las P previas permitieron mantener adecuadas condiciones de humedad edáfica. Esto concuerda con los resultados encontrados por Caviglia y Andrade (2010) y Quiroga *et al.* (1996), la cantidad de agua disponible está en parte, relacionada con las P en el momento de la recarga. Así, la eficiencia con que el agua de las P queda almacenada en el perfil de suelo, permite la poca variación de PO de los cortes, aun cuando en los períodos de déficit la especie esté asociada a importantes pérdidas por evaporación, escurrimiento y drenaje en profundidad (ejemplo: en períodos secos de primavera: 44,7 mm, 24 mm y 9 mm o los de verano: 58,5 mm, 30 mm y 15 mm, en evaporación, escurrimiento y drenaje, respectivamente). En líneas generales se observó que no hubo un efecto sostenido sobre el desecamiento del suelo ni sobre el consumo durante gran parte de los cortes sucesivos.

Un concepto que podría también estar relacionado a estos resultados es el que formula Caviglia (2007), donde el régimen de P de la zona durante el invierno, caracterizado por P de bajo milimetraje, pero reiteradas, favorecería a la recarga en las situaciones de P-V más secas.

Los resultados sugieren la existencia de sostenidas P en el tiempo y buena retención de ellas en la matriz del suelo (como ejemplos del modelo, primaveras secas registran infiltraciones del 78 mm y en verano de 128,5 mm). Podríamos suponer que, si bien el régimen hídrico de Paraná permite que se produzca una recarga del perfil, las condiciones de esos suelos (franco arcillo limoso en los niveles superiores y arcillo limoso en los inferiores), no logran que toda el agua útil esté disponible para la especie, como fue documentado por Severina, (2011). El suelo de Paraná es un suelo con mayor contenido de arcilla y menor contenido de arena (40% de arcilla, 58% de limo y 2% de arena) (Passadore y Wendler, 2011). En períodos secos la compactación natural del mismo dificulta la penetración del agua y por tanto, reduciría la capacidad de infiltración. El modelo detectó una reducción del 25% del agua infiltrada respecto a los períodos húmedos, con una variación del orden del 14%, variación que pone en evidencia la complejidad en la oferta del agua para la especie

En períodos húmedos, al ser ésta una zona baja es esperable que, durante eventos de mayores P, el suelo prolongue en el tiempo adecuadas retenciones de agua en su matriz edáfica. De esta

forma se observó, comparativamente, que alfalfa logra PO superiores en este período que en los secos (16% y 12% más en P-V y O-I, respectivamente).

Sin embargo, en situaciones de excesos hídricos, el modelo evidencia que el estrés por cierre de estomas, casi en un 55%, prevalezca al mecanismo que realiza el canopeo para superar ese exceso, es decir, disminución del mismo en un 9%. Podría suponerse que la ocurrencia de P en forma frecuente para esta localidad, da como resultado posibles encharcamientos u horizontes saturados del suelo y la presencia de constante nubosidad con elevada humedad relativa del aire. Esto provocaría baches en la intercepción de la radiación, que al ser más o menos frecuentes, resultan en mayores pérdidas totales de intercepción de radiación para los períodos de tiempo y como consecuencia menores acumulaciones de biomasa aérea, efectos documentados por distintos autores (Collino *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2006; Odorizzi, 2015). Consecuencias que aleja las PO de sus valores potenciales, lo que discutiremos al analizar las brechas productivas.

Se destaca que sería importante realizar comprobaciones a campo en la localidad referente a la estructura del tapiz, ya que la evapotranspiración en períodos de déficit o excesos fueron similares (94 mm y 95 mm, respectivamente en P-V). Lo que hace pensar que los controles internos de la planta juegan un papel en esta restricción de la transpiración, reflejados por diferentes porcentajes en los estrés de disminución de canopeo y cierre de estomas entre los períodos comentados. Comportamiento que puede deberse en parte a los niveles de radiación, pero es probable que también resulten de la resistencia foliar y su variación en la altura del canopeo, que condicionan la transpiración en la mayoría de las situaciones, particularmente importantes cuando se desarrolla en condiciones de estrés hídrico.

-La localidad de Concepción del Uruguay presentó las menores PO, los mayores tiempos de descansos para lograrlas y las menores EUA (16 kg mm^{-1}). Las mayores P anuales respecto a las restantes localidades ($1291,45 \text{ mm año}^{-1}$), tuvieron poca o relativa significancia debido al tipo de suelo. Las restricciones físicas de los Vertisoles están relacionadas al tipo de arcillas dominantes (esmeclitas) y al régimen hídrico, acompañado de ciclos de expansión–contracción. Si bien pueden almacenar cantidades importantes de agua, la infiltrada efectivamente para su aprovechamiento en el crecimiento es muy baja (Cerana *et al.*, 2005). En este estudio se registraron valores similares de infiltración, tanto en períodos secos como húmedos ($71,17 \pm 5,6 \text{ mm}$) y fueron 56% menores a aquellos que infiltraba en los suelos vérticos de Paraná.

Cuando ocurre la P, el agua penetra por las grietas, humedeciéndolo superficialmente y en profundidad, siendo muy plástico, adhesivo y mantiene una baja permeabilidad en esa condición húmeda. En situaciones secas esas grietas pueden ser de más de 2 cm, llegando normalmente hasta la base del epipedón (Boschetti *et al.*, 1999; Pascale *et al.*, 1999; De Battista, 2004). Algunos trabajos analizan la duración en que las grietas permanecen abiertas y cerradas, para distinguir los regímenes de la humedad del suelo (De Petre y Stephan, 1998). Calidad de interés que puede ser utilizada para calibrar, en ensayos a campo, ese aspecto del modelo en la localidad.

Resumiendo, en Concepción del Uruguay, la matriz edáfica y sus condiciones hídricas tanto de excesos como déficit, generan estrés. El modelo detectó reducciones importantes en la conductancia estomática, provocando cierres de estomas que superaron el 80%. Se destaca que el mecanismo fisiológico de resistencia al estrés hídrico más inmediato es el cierre de estomas, estructuras responsables de la pérdida de agua por transpiración (Taiz y Zeiger, 2006). Esta situación provoca directamente la reducción de la producción de biomasa y, por ende, la disminución del rendimiento, confirmando lo señalado por Steduto *et al.* (2012).

6-3 Desempeño de AquaCrop. Brechas en las producciones potenciales y en las producciones alcanzables.

El rendimiento potencial, es entendido como aquel obtenido por un cultivo determinado que crece sin limitantes hídricas, ni nutricionales y libre de malezas, plagas y/o enfermedades, bajo la implementación de buenas prácticas agronómicas (Evans, 1993, Van Ittersum y Rabbinge, 1997). El modelo AquaCrop, determina el rendimiento máximo alcanzable o producción potencial (PP) cuando el cultivo logra crecer sin limitantes nutricionales, de agua, sin daños por malezas, plagas y enfermedades y con un 100% de eficiencia en la recolección del producto cosechable, utiliza la mejor combinación de insumos y tecnología, pero merced a las limitaciones genéticas de la especie, a la radiación solar y a la temperatura (Lobell *et al.*, 2009). La PO en cada localidad fue, inevitablemente menor que el PP, en todos los casos de manera significativa, porque lograr el potencial requiere un manejo casi perfecto del cultivo y el aporte de nutrientes y agua necesarios durante los días que transcurre el ciclo de crecimiento de la especie.

Para explicar esas diferencias analizaremos conceptos morfofisiológicos en el crecimiento de alfalfa. El rendimiento de la alfalfa está directamente relacionada a la cantidad de radiación

solar interceptada por el dosel del cultivo durante cada ciclo de rebrote (Gosse *et al.*, 1984). Esta intercepción de luz se encuentra modulada en AquaCrop por la cobertura del dosel (Steduto *et al.*, 2009). Asimismo, el modelo considera otras variables que afectan el crecimiento y rendimiento final de los cultivos, ellas son: la temperatura, el estado nutricional y la humedad del suelo (Robertson *et al.*, 2002). Sin embargo, es la humedad del suelo la variable más relevante y, por lo tanto, la limitante más importante en la determinación del rendimiento para la mayoría de los años (Doorenbos y Pruitt, 1975, 1977; Andriani *et al.*, 1991; Dale, 1995).

En las localidades de estudio, cuando la humedad del suelo se acerca al rango considerado óptimo, resultado de la dinámica hídrica generada principalmente por la recarga por lluvias y la descarga por consumo evapotranspirativo, durante la etapa de acumulación de biomasa en alfalfa, presentan respuestas productivas máximas, cercanas al potencial genético de las plantas (Génova *et al.*, 1998, Génova, 2011). En las localidades estudiadas, frecuentemente los eventos de las P que ocurren en otoño son fuente de recarga de agua en el perfil (Kruse y Zimmermann, 2002). Esta particularidad explicaría, en parte, las mayores producciones potenciales en el período O-I, donde el agua pocas veces es limitante. Otra posibilidad sería considerar que el modelo no puede distinguir el proceso de almacenamiento y la removilización de asimilados hacia o desde la corona y raíces. De esta forma, considerando que la partición a raíces y corona aumenta hacia el final del verano (Khaiti y Lemaire, 1992; Brown *et al.* 2006), es factible que el peso aéreo a fines del verano se vea reducido por una mayor partición de biomasa hacia órganos subterráneos dando lugar, comparativamente a una PP similar al período O-I, o que las PP de éste estén sobrestimadas. También se podría argumentar que la indiferencia estacional en las PP se debe a que, el modelo trabaja con un paso temporal diario, los menores descansos que ocurren en el período P-V, respecto a los del O-I, hacen que tengan menos tiempo para aprovechar las condiciones lumínicas y térmicas, se reduciría proporcionalmente, la cantidad de intercepción de luz y la síntesis total de la materia seca del tapiz. En este sentido, los ensayos realizados por Brown *et al.* (2006), confirman que largos ciclos de rebrote permiten aprovechar las temperaturas favorables y la radiación entrante en el canopeo, en las diferentes épocas del año y, por lo tanto, producir altas acumulaciones de biomasa. Se suma en las consideraciones que, en el período estudiado, se dieron condiciones medioambientales óptimas para el crecimiento de la alfalfa ya que durante los O-I la temperatura promedio fluctuó en rangos que no afectaban la acumulación neta de alfalfa, de acuerdo a lo reportado por Muslera Pardo y Ratera García (1991).

No se dispone de investigación nacional que establezca cuáles serían las PP para las condiciones de producción de las localidades analizadas. Teóricamente los cultivos con un balance de agua positivo tendrían cubiertas sus necesidades hídricas. La división significativa generada por esta variable podría deberse a que más importante que el volumen de agua aportado por las P es la frecuencia de las mismas en el período de corte (Grimes *et al.*, 1992 y Allen, 2006), o que la presencia de la NF interviene significativamente en este balance (Jobbágy y Nasetto, 2009). Por otra parte, si bien, los ensayos de corte se realizan en suelo sin limitantes de nutrientes (Spada, 2000-2014, Arolfo y Odorizzi 2015-2018), los niveles de ellos y la forma que estarían disponibles en cada momento del crecimiento podrían también explicar la variación entre PP y PO.

En concordancia con lo descripto por Degioanni (1998), las comparaciones entre las PP y las PE simuladas y las PO según los valores de Red, indicaron, en primer lugar, que es posible lograr los niveles de producción reales próximos al PE (brechas que no superan el 14%, figura 12), en segundo lugar, que los valores de PP pueden considerarse como referentes de la capacidad productiva de los ambientes de la región.

-Para argumentar esta última afirmación se observó que la PP estimada por AquaCrop en Marcos Juárez, varió entre 3,81 y 4,86 Mg de MS ha⁻¹, por corte. Estos valores parecen razonables dado que existen algunos registros observados que los superan, los que fueron obtenidos en ensayos comparativos de rendimientos de la Red (en 16 oportunidades de 245 cortes realizados entre los años 2000 y 2018).

Podría ser considerada la capacidad del sistema radical para utilizar el agua disponible en la NF, que fue relativamente superficial en esta localidad. En la región pampeana se ha observado que el cultivo puede aprovechar con efectividad el agua proveniente de NF ubicadas entre 2,25 y 6 m de profundidad (Collino *et al.*, 2007). Esta fuente de agua puede suplir las necesidades diarias en la especie para calcular la PP, en mayor proporción que las restantes localidades. Particularidad que evidencia las menores brechas entre PP:PO, en Marcos Juárez.

-En la localidad de Manfredi, los resultados demuestran que el modelo AquaCrop explica adecuadamente el crecimiento de alfalfa (PE:PO), evaluados bajo las condiciones edafo climáticas de esta localidad.

Comparativamente con Marcos Juárez, presenta menores producciones, tanto potenciales, estimadas como observadas (figura 12). La PO fue variable entre las estaciones climáticas y períodos húmedos, normales y secos, lo que está asociado con la incertidumbre de las

condiciones climáticas de la zona, especialmente por la irregularidad en la distribución y volúmenes relativamente bajos de lluvias (Lovera *et al.*, 2012). A esta consideración se suma el tipo de suelo (Haplustol éntico de la serie Oncativo), como ya fue oportunamente comentado, son suelos con poca capacidad de retención de agua, causado por tener predomios de arena o partículas minerales mayores a 0,02 mm de diámetro, muy permeables, con una velocidad de infiltración que va de 13 a 20 mm h⁻¹, por su predominancia de macroporos (Del Valle Rivarola, 2009; Zaballo, 2006; Bricchi y Degioanni, 2006). Cualidades que determinan una capacidad de almacenaje de 80 mm de agua útil por cada metro de profundidad del suelo (Severina y Salinas, 2012). Continuando con la comparación con Marcos Juárez, Rodríguez *et al.* (1981), observan en Inta Manfredi una muy baja frecuencia de excesos y una muy alta de deficiencias, superando éstas en casi todos los meses el 50%. El balance hídrico negativo predomina ampliamente sobre el positivo.

En síntesis, la combinación de la oferta hídrica y la capacidad de almacenaje de agua del suelo inciden en la producción forrajera. Sin embargo, alfalfa tiene una estrategia para evitar la sequía al acceder al agua a través de su profundo sistema radicular, sumado a que los coeficientes de la tasa de extracción de agua por la raíz son bajos en comparación con otros cultivos (Dardanelli *et al.*, 1997), de modo que la alfalfa prolonga el uso del agua del suelo a la que tiene acceso, principalmente porque sus raíces profundas amplían el depósito de suministro. Pese a estas estrategias, su resistencia a la sequía es deficiente y se ve rápidamente afectada por la escasez de agua (Sheaffer *et al.*, 1988). El modelo revela para O-I, menores PP en períodos secos, comparativamente con los húmedos o normales en esta localidad, tendencia que se repite, aunque no tan evidente en P-V (figura 11). No se observó ninguna contribución de la NF durante el crecimiento de alfalfa. Dardanelli y Collino (2002), reportaron que en la localidad, se excluye la contribución de la NF en el crecimiento de la especie, probablemente debido a que el sistema radical no logra ser suficientemente profundo para la captación de agua de la misma.

-Para Rafaela la brecha PP:PO fue alta y similares, tanto en períodos húmedos, secos o normales y en los grupos estacionales de crecimiento (51% y 68%, promedios períodos húmedos, normales y secos, en P-V y O-I, respectivamente). La variabilidad en las P y las características del perfil edáfico permitirían responder a estas diferencias. En períodos secos se presentaron brechas productivas de 46% y 73%, en P-V y O-I, respectivamente (figura 11). Bajo la influencia de este fenómeno, el cual afectaría el adecuado desarrollo y producción de la biomasa acumulada en alfalfa, no se observaron reducciones de la expansión del dosel foliar, sólo el

cierre de estomas en un 50% y 73%, en los períodos P-V y O-I, respectivamente. Respuesta asociada a los trabajos de Murata *et al.* (2007), quienes observaron que alfalfa es tolerante a la sequía, su fotosíntesis no disminuye hasta que la humedad del suelo baje al 35% aproximadamente de la cc concepto que discutiremos más adelante.

Es interesante recordar que la posibilidad de satisfacer los requerimientos hídricos de la planta no radica exclusivamente en la cantidad de agua almacenada en el suelo. Depende además de la habilidad que tenga su sistema de raíces de absorber la solución del suelo en contacto, como así también de la habilidad que presenta el suelo de transmitirla y suministrarla a las raíces a una tasa que permita satisfacer los requerimientos de transpiración. Por lo tanto aspectos del cultivo como la profundidad y densidad de las raíces, y del suelo, como la Tex que regula la energía con que el agua es retenida y transmitida, gravitarán en la proporción del agua almacenada que puede ser utilizada (Porta Casanellas *et al.*, 1999; Micucci *et al.*, 2002).

Del análisis del régimen hídrico de los suelos de Inta de Rafaela que realizaron Álvarez *et al.* (1979), surge que existen diversos períodos de acumulación e insuficiencia de agua y que además estos son alternativos y nunca duran más de dos meses. Estos autores señalan que los meses de acumulación de agua en el suelo o de P mayores que la evapotranspiración, son marzo, junio y octubre y los meses de insuficiencia de humedad en el suelo son enero, febrero, mayo, julio, setiembre y noviembre. Abril, agosto y diciembre tienen valores similares en cuanto a P y evapotranspiración, por lo cual no se producen acumulaciones ni deficiencias. También destacan que a profundidades de más de 1 m, profundidad que involucra el horizonte argílico Bt, el contenido de agua se mantiene siempre con valores muy próximos al PMP o 35% de la cc. En este trabajo y similar a esta afirmación de los autores, en condiciones de períodos secos, los valores calibrados de la humedad inicial del suelo que mejor respondió al balance fue de 50% de la cc, considerando una profundidad inicial de 1,5 m. Las PO se aproximaron a las PE (4% y 9% de diferencias en P-V y O-I, respectivamente, figura 11). También se observó que la declinación del crecimiento fue exclusivamente producida por el cierre estomático, indudablemente por las condiciones de suelo y variables del cultivo que pide el modelo, la especie responde con el cierre estomático antes de cualquier cambio detectable en el potencial agua del sistema.

Otra posible variable a considerar en el comportamiento productivo es el aporte de la NF en el balance. En los valores de PE, en períodos normales o húmedos, el aporte que pudo hacer la NF no fue consistente en los resultados, tampoco se observó una relación entre el nivel de la NF y

las PO (figura 7). En el centro santafesino en donde se encuentra la localidad, el nivel de la NF se destaca por su movilidad en el tiempo, tanto ascendente como descendente, el sector presenta un relieve muy plano y pobres redes de escurrimiento superficial. Esa fluctuación depende fundamentalmente del agua de lluvia que se infiltra migrando a la zona de saturación. Como consecuencia de las P en los meses de febrero y marzo la NF mantiene su ascenso (Villar, 2003). Los valores a mediados de abril de 0,50 a 1,25 m de profundidad se registran en amplias áreas de la región (Sapino *et al.* 2019). Estudios de Villar (2014) en Rafaela, pone en evidencia un ascenso persistente de la NF en el período 1970-1981 y una segunda etapa de fluctuaciones entre los dos y los cinco metros de profundidad, con picos de ascensos de variada intensidad en el período 1982 a la fecha.

Por lo expuesto la PO fue producto de períodos de crecimiento con buena disponibilidad hídrica, sin que el suelo exceda su cc, o de períodos más restrictivos de humedad en el perfil edáfico. Toma importancia las “irregularidades” en la magnitud y distribución diaria de las P de la zona. Si bien se logró un buen ajuste entre PE y PO, permitiendo analizar las producciones según los balances hídricos del modelo, existe una importante brecha, como fue señalado, con las PP. Esta podría ser explicada por el nivel inicial de agua almacenada, la infiltración efectiva, la capacidad de retención hídrica del suelo, el nivel de la NF y el momento específico del estrés hídrico relativo al periodo de determinación de la biomasa forrajera. No obstante, los valores en la PP podrían ser razonables dado que existió un registro observado en el período de crecimiento del 22-11-12 al 19-1-12, que lograba los 4,79 Mg de MS de acumulación. Estos resultados llevarían a formular que el manejo del agua será el factor principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas de producción.

-La localidad de Paraná presentó importantes brechas de producción de biomasa (PP:PO), variando en más del 50 % en el período P-V y superando el 70 % en O-I. Las brechas entre PE y PO, a igual que en las restantes localidades, presentaron bajas variaciones (1,3 % y menos del 10 %, en promedio de los períodos húmedos, normales y secos, en P-V y O-I, respectivamente). No se observa un comportamiento contrastante entre períodos húmedos, secos o normales en las PE o PO. Este comportamiento puede deberse a que el suelo Argiudol ácuico, característico de la localidad, posee limitaciones al ingreso de agua. Si bien puede almacenar cantidades importantes de agua, el rango aprovechable es escaso y presenta problema de aireación, resistencia a la penetración y, en general escasa profundidad efectiva de enraizamiento. Su horizonte superficial presenta una estructura laminar, la misma se forma por fisuración por

humedecimiento-secado de una estructura masiva subyacente. La distribución de macroporos y la estabilidad de los mismos, afectan la microfisuración (Sasal *et al.*, 2006). Como consecuencia de esto, las raíces crecen lateralmente y aumenta la exploración de la capa superficial del suelo, su profundización se ve limitada por poseer capas más profundas de densidades aparentes crítica ($>1,44 \text{ Mg m}^{-3}$) (Caviglia, 2007; Novelli *et al.*, 2010 y Aramburu Merlos, 2016). La estructura laminar altera el patrón de drenaje y aumenta el escurrimiento superficial en función de su proporción en el perfil del horizonte A. Luego de este horizonte (22 cm de profundidad), yace directamente el B21t, generando un límite casi abrupto con más de 30% de arcilla. Cualidades que generan una permeabilidad lenta a muy lenta y una NF muy profunda que no realiza ningún aporte en el perfil edáfico. Es así que, luego de producida una P, la recarga en el perfil es más baja que en las localidades analizadas anteriormente. En síntesis, la producción de forraje estará condicionada principalmente por la captura de los recursos agua en el suelo, se destaca sus limitantes para lograr una máxima infiltración de agua en el perfil, a pesar de recibir altos aportes por P (465,78 mm y 732,75 mm, promedio estacional, en O-I y P-V, respectivamente, tabla 7).

-Las estimaciones realizadas en Concepción del Uruguay, superan significativamente al resto de las localidades en las diferencias entre PP:PO (rangos entre 75% a 85% en las brechas). No obstante, se destaca la buena calibración del modelo ya que los valores relativos PE:PO presentaron magnitudes menores al 15%. El trabajo de Morasi *et al.* (2007) realizado sobre evaluaciones de las estadísticas en los modelos, en términos de la precisión de los datos simulados en comparación con los valores observados, permiten calificar esas magnitudes como buenos resultados al estar dentro del 10% al 15% de los datos estimados:medidos, en esta localidad los valores se ubicaron en un mínimo de 3% y un máximo de 14%, entre PP:PO.

Bajo este contexto, resulta interesante analizar las brechas de la PP. El modelo realiza la suposición que el agua y los nutrientes, requeridos diariamente en el crecimiento máximo de la especie, se puedan agregar a través del manejo (que, por supuesto, no es práctico o rentable en casos donde las principales limitaciones del suelo, como las barreras físicas para la proliferación de las raíces, son difíciles de superar). Por lo tanto, las grandes limitaciones en esta localidad sería el suelo. Los valores seguramente están asociados a los parámetros hidráulicos del mismo. Este es de Tex extremadamente arcillosa, se destaca en ellos un contenido entre el 40-50% de arcilla, sobre todo del tipo de las esmectitas (más del 50% sobre el total de arcillas). El material es muy expansible, se contrae cuando están secos, formando grandes grietas que se cierran en

húmedo. Este cambio según su grado de humectación, provoca movimientos en masa dentro del perfil. Son suelos oscuros y se caracterizan por poseer un buen nivel de materia orgánica (De Petre y Stephan, 1998).

Este suelo tiene una permeabilidad lenta en el estrato superior y extremadamente lenta en los horizontes subsuperficiales, salvo después de períodos secos cuando la infiltración es mayor, aunque sólo sea por un breve lapso. En inviernos con lluvias suaves, después de cierto tiempo es común encontrar la superficie prácticamente saturada y el subsuelo seco y aún con grietas. Como parte del agua escurre superficialmente, existe una estrecha relación entre el drenaje del suelo y el relieve en que se encuentra.

En síntesis, si bien estos suelos pueden almacenar cantidades importantes de agua para las plantas, el rango aprovechable es muy corto debido a los problemas de aeración, resistencia a la penetración y la escasa profundidad efectiva de enraizamiento que pueden alcanzar (Wilson y Cerana, 2004). El contenido de humedad de los suelos disminuye gradualmente desde más del 50% en los 20 cm de la capa superior al 30% a 50 cm de profundidad. Bajo los 100 cm, el contenido de humedad del suelo permanece casi invariable durante todo el año (Fontanini *et al.*, 2003; Cerana *et al.*, 2005). Los valores de infiltración son muy variables, dependerá del estado hídrico del suelo, registrándose unidades que oscilan entre $> 17 \text{ mm min}^{-1}$ a 0 mm min^{-1} (Nyamudeza *et al.*, 2001). El modelo simuló en los cortes, infiltraciones entre 20 mm a 175 mm (períodos promedios secos y húmedos, respectivamente), este último se considera como valor lógicos por ser similar a lo observado por Gvozdenovich *et al.* (2010), quienes, en ensayos a campo, registraron promedios de 172,37 mm de humedad acumulada a la siembra de trigo en Entre Ríos.

La porosidad efectiva es baja a nivel superficial y tiende a ser nula en los horizontes subsuperficiales (Heredia, 2000), determinada fundamentalmente por procesos físicos y físico-químicos (De Petre, 2000). En general, la mayor proporción de las raíces se encuentra en el horizonte Ap, debido a las mejores condiciones físicas impuestas por el suelo y es muy estrecho el rango en el horizonte B22, afectado por el aumento de la resistencia a la penetración de las mismas y fundamentalmente por la baja macroporosidad (Wilson y Cerana, 2004).

Todos los parámetros referenciados en estos suelos determinan que existan problemas de difícil resolución para disminuir las brechas existentes entre las PP y las PO.

-Concluyendo, de todo lo analizado se destaca la localidad de Marcos Juárez, como la que presentó las menores brechas en PP:PO. Este comportamiento se debería al aporte constante de

humedad de la NF, contribuyendo al aumento de las producciones de MS en alfalfa, aún en períodos secos. Investigaciones desarrolladas por Baigorri *et al.* (1995), Baigorri y Martini (2004), Garnero y Quiroga (2003) confirman esta conclusión. En general, fue muy buena la respuesta del modelo para simular un amplio rango de producciones de MS; en general, ajustó adecuadamente las PE:PO. Las PP calculadas por AquaCrop exceden significativamente a las producciones más altas logradas en la Red.

6-4 Comportamiento del modelo AquaCrop considerando los niveles de la napa freática

El nivel freático se define como la superficie que limita las zonas de aireación y de saturación del suelo (Jobbágy *et al.*, 2007), ésta última corresponde al acuífero libre o freático. Este nivel se destaca por su movilidad en el tiempo, tanto ascendente como descendente y con un relieve plano y pobres redes de escurrimiento superficial, como las zonas de Marcos Juárez, Manfredi, Rafaela y Paraná. Esa fluctuación depende fundamentalmente del agua de lluvia que se infiltra migrando a la zona de saturación. Como consecuencia de las lluvias el nivel asciende, y caso contrario ocurre cuando existen períodos secos.

Las oscilaciones de la napa freática tomada como promedio anual del período 2000-2018 (figura 4 y tabla 10), evidencia un ascenso en el período, principalmente en Marcos Juárez y Rafaela. Se considera que los movimientos verticales (evaporación, transpiración, infiltración, intercambios en la zona no saturada y la capa freática), prevalecen sobre los movimientos horizontales (superficial y subterráneo), adquiriendo importancia las variaciones de almacenamiento superficial y subterráneo. Así, la zona de ascenso y descenso de la NF, se relacionaría a las fluctuaciones climáticas (excesos y déficit en las precipitaciones) y a las condiciones texturales de la matriz edáfica (Kruse y Zimmermann, 2002; Degioanni *et al.*, 2006 y Cisneros *et al.*, 2011).

Lo interesante del modelo es la integración del efecto de las variables edáficas y climáticas, junto con el comportamiento de la napa freática, para simular la producción en respuesta al agua en el sistema suelo-planta (Geerts *et al.*, 2010). En sus algoritmos y procedimientos de cálculo modelan la infiltración del agua, el drenaje fuera de la zona radicular, el ascenso capilar por acción del nivel freático, la evaporación y la tasa de transpiración, dando como resultados un balance de agua en el suelo (Raes *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009). El modelo fue evaluado asignándole o no la presencia de la NF, en todas las localidades, con el objetivo de contar con una herramienta de apoyo en el estudio de la influencia de la NF.

En general, se observó asociaciones estadísticamente significativa (R^2 , $P < 0,05$) con las biomásas ajustadas por la acción de la profundidad de la NF. Las mismas variaron entre localidades y estaciones de crecimiento, Rafaela y Paraná presentaron las mayores asociaciones ($R^2 = 0,96$ y $0,97$, en P/V, respectivamente). La simulación también mostró un alto grado de ajuste al considerar los errores medios cuadráticos (RMSE), con una diferencia de 15 a 242 kg ha⁻¹ de biomasa observada y simulada (tabla 23).

El trabajo realizado por Morla y Giayetto (2012), en la región centro sur de Córdoba, utilizando el modelo AquaCrop arrojó resultados de simulaciones en presencia de NF fluctuantes, que presentan un alto nivel de ajuste a los valores observados para los cultivos de maíz, trigo y soja en condiciones de producción potencial, similares al estudio realizado. Si bien el modelo fue evaluado contrastando un gran número de observaciones, la frecuencia de observaciones oscilo entre diarias y mensuales, según los datos que se lograron en las localidades, con lo cual una mayor frecuencia de observaciones podría permitir resultados más precisos ya que el modelo trabaja con un paso temporal diario.

Dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la napa freática tendría un efecto positivo, a partir del aprovisionamiento de agua, negativo por anegamiento, o neutro, sobre las biomásas estimadas por el modelo (Nosseto *et al.*, 2009).

Se logró determinar que profundidades en orden de 1 a 1,5 m afectan las producciones de la biomasa, por efecto de anegamiento en la zona de raíces. Al respecto, Baigorri y Martini (2009), relevando diversas texturas en suelos, señalaron que el espesor del perfil de humedecimiento de suelos arenosos, por la influencia de la NF, oscila entre 80 y 90 cm y 120 cm en suelos de textura más fina. Este último, en napas superficiales llegaría a sumar más mm a la fracción de agua infiltrada desde el aporte de las precipitaciones y generar una condición de anegamiento. Comportamiento que también fue observado en diferentes especies de cultivo y ambientes edáficos (Cisneros *et al.*, 1997; Daes y Deproost, 2003; Cisneros *et al.*, 2013).

Si bien NF poco profundas constituyen un factor de riesgo, también representan una fuente adicional de agua, efecto que se vio registrado en la localidad de Marcos Juárez (tabla 24) y observado por otros autores en la localidad (Cisneros *et al.*, 1999; Dardanelli y Collino, 2002 y Nosetto *et al.*, 2009). Rafaela presenta un ambiente muy plano y de escaso escurrimiento superficial (Degioanni *et al.*, 2006), esta situación hace que eventos de lluvias sean los que se relacionen al nivel freático (Cisneros *et al.*, 2011) (figura 12), destacándose que NF someras deprimen la producción en alfalfa.

En la localidad de Manfredi, ambiente semiárido con suelos arenosos, profundos y napas de baja salinidad, Racca et al. (2001) y Cisnero et al. (2013), observaron que el cultivo de soja tuvo una respuesta positiva a la influencia de la NF al alcance de las raíces. Si analizamos los resultados obtenidos a partir del modelo, con NF hasta los 4 m en O-I y un poco antes en P-V (3,5 m) las respuestas fueron negativas. Como sería esperable la cantidad y frecuencia de las precipitaciones sumado al aporte realizado desde la NF saturarían al ambiente edáfico, convirtiéndolo en un medio estresante para la especie. Pudo observarse que a partir de los 4 m la NF no realizar ningún aporte en el balance hídrico del modelo.

Las variaciones entre localidades en el comportamiento de la producción de la biomasa respecto a la NF (tabla 23 y figura 12), serían explicadas por las diferentes propiedades físicas en cada suelo relacionadas a la variabilidad en la porosidad de los horizontes. Tal porosidad determina la mayor o menor facilidad para que ocurran los flujos hídricos entre horizontes (drenaje y ascenso capilar). Aquellos con textura franco o franco arcillosos tendrían mayor ascenso capilar por aporte de la NF respecto a suelos arenosos (Raes et al., 2006 y Cortés et al. 2013). En el caso de las texturas muy arcillosas, como las que se presentan en los suelos de Concepción del Uruguay, el ascenso capilar se vería impedido. Díaz, et al (2003) señalan que los suelos Vertisoles de Entre Ríos, poseen bajos valores de conductividad hidráulica saturada, cualidad que refleja restricciones al flujo del agua cuando asciende la NF, el elevado contenido de humedad produce el hinchamiento de las arcillas, disminuye significativamente la cantidad de mesoporos en el perfil del suelo y evita el ascenso capilar.

No obstante a estos resultados, el comportamiento de la NF es sistémico, dinámico y complejo, el modelo detectó respuestas de gran variabilidad en los aportes que realiza en el perfil del suelo (tabla 24). Existe una aparente causa de su ascenso temporal por los eventos en las precipitaciones, aunque aún no se conocen los procesos que aportan espacialmente a la NF. Asimismo, se reconoce que el nivel freático está fuertemente relacionado a aguas superficiales (lagunas) o subterráneas, por lo que debe ser tratada como una sola unidad, aún no existen estudios hidrológicos de mayor escala para la ecoregión pampeana analizada.

Como conclusión, en los ambientes estudiados, se describió un alto grado de ajuste entre los valores observados y esperados al considerar el nivel de la NF. Existió una tendencia a que NF superficiales limiten la productividad en la especie y NF entre 3,5 a 4 m sean indiferente a ella.

6-5 Eficiencia del uso del agua en alfalfa (EUA)

Con el fin de analizar las alternativas agronómicas para disminuir las brechas productivas, y debido a que AquaCrop fundamenta los valores de productividad en balances hídricos, se plantea conocer la respuesta de la EUA en alfalfa. Para este análisis se define la EUA, como aquella que expresa la cantidad de MS que se produce por unidad de agua evapotranspirada. Habitualmente, se hace dificultoso, en registros de campo, conocer cuál es la proporción de agua de la evapotranspiración que se pierde por transpiración y por evaporación desde la superficie del suelo (Collino *et al.*, 2007). AquaCrop es un modelo que contempla ambas fracciones, utiliza la ecuación original de Doorenbos y Kassam (1979) como punto de partida para calcular la biomasa del cultivo, en base a la cantidad de agua transpirada. Como ya fue comentado, usa una escala de tiempo diaria, a fin de representar de mejor manera la dinámica de la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua.

En este estudio, si bien se consideraron diferentes localidades, estaciones de crecimiento (P-V y O-I) y condiciones de P (períodos secos, húmedos o normales), en general no se observaron diferencias significativas. Por ejemplo, en Manfredi el valor promedio fue de $1,88 \text{ kg m}^{-3}$, en Rafaela $2,18 \text{ kg m}^{-3}$, en Paraná $2,06 \text{ kg m}^{-3}$. Las menores EUA fueron registradas en Concepción del Uruguay con $1,51 \text{ kg m}^{-3}$ como valor promedio. Solo se destaca un comportamiento diferencial en Marcos Juárez. La EUA fue mayor comparativamente con las restantes localidades (32%, 21%, 25% y 45%, más que Manfredi, Rafaela, Paraná y Concepción del Uruguay, respectivamente). En períodos secos el modelo determinó significativas diferencias en P-V y O-I ($2,5$ y 3 kg m^{-3} , en P-V y O-I, valores promedios, respectivamente, figura 13).

Los valores citados por la bibliografía estiman consumos en alfalfa similares a los obtenidos por el modelo, destacan $1,0$ - $2,6 \text{ kg m}^{-3}$ (Grimes *et al.*, 1992), $2,1 \text{ kg m}^{-3}$ a $0,4 \text{ kg m}^{-3}$ inmediatamente después de la defoliación (Asseng y Hsiao, 2000), $2,9 \text{ kg m}^{-3}$ (Brown *et al.*, 2005) o $0,6$ a 3 kg m^{-3} considerando cortes individuales (Guitjens, 1990). Asimismo, valores de eficiencia obtenidos en condiciones de riego de $1,1$ y $2,3 \text{ kg m}^{-3}$ fueron encontrados en otros trabajos (Kisselbach, *et al.*, 1929; Bogler y Matches, 1990; Yu *et al.*, 2006), o los valores de $1,37$ a $1,79$ comentados por Donovan y Meek (1983).

Una consideración que será analizada es lo formulado por Collino *et al.* (2007) y Steduto *et al.* (2012), quienes señalan que la EUA es mayor en primavera que en verano, aun cuando en primavera la temperatura media está ligeramente por debajo del valor crítico, y ambas estaciones mayores que otoño e invierno.

El forraje producido resulta no sólo de los fotosintatos generados a partir de la radiación interceptada sino también de aquéllos provenientes de la removilización desde la corona y la raíz. La baja EUA en otoño e invierno son producidas por limitaciones de temperatura y por la movilización de fotoasimilados hacia los órganos de reserva. Al respecto, se han registrado variaciones entre 1,29 y 2,54 kg m⁻³ (López *et al.*, 1997), 0,9 y 2,54 kg m⁻³ (Collino *et al.*, 2005) para otoño y primavera, respectivamente. En los valores observados de la EUA, en función del agua evapotranspirada en alfalfa, se considerarán diversos aspectos, algunos propios del modelo y otros que responden al comportamiento morfofisiológico de la especie en cada localidad. Los altos valores observados en la estación de O-I, podría deberse a que el modelo, en la sentencia “cultivos vegetales foliares”, no integra los crecimientos aéreos y radicales. Esta selección permite evadir la complejidad e incertidumbres asociadas con los procesos de partición, los cuales continúan siendo los más difíciles de modelizar, en especial en especies perennes (Collino *et al.*, 2007).

En AquaCrop, la raíz cumple solo la función de crecer y proveer de agua a la especie. El ritmo de profundización de las raíces se desacelera mediante una función empírica, una vez que el estrés se convierte lo suficientemente severo para iniciar un cierre estomático parcial de la parte aérea (Steduto *et al.*, 2009). Podría suponerse, que los valores de EUA durante O-I obedecen a la no diferenciación de la distribución de biomasa aérea - radical, lo cual podría sobrestimar este parámetro durante esta estación del año. Esta afirmación podría ser explicada por la siguiente relación teórica.

La partición de asimilados durante el ciclo de crecimiento de la alfalfa ha sido bien estudiada (Khaiti y Lemaire, 1992; Volenec *et al.*, 1996; Li *et al.*, 1996; Avice *et al.*, 1997), determinándose que la principal fuente de carbono son los fotoasimilados producidos en las hojas a través de la fotosíntesis y los principales destinos son las regiones meristemáticas de los órganos vegetativos en crecimiento, de los nódulos de fijación de nitrógeno y de los tejidos de reserva en raíz y corona. En alfalfa, el carbono (C) y el nitrógeno (N) se almacenan y se vuelven a movilizar de las coronas y las raíces principales para apoyar el crecimiento de los brotes. Se destaca que en otoño los asimilados, en diferentes magnitudes, tienden a ir preferentemente, a los órganos perennes (corona y raíz) en ese momento (Khaiti y Lemaire, 1992). Esa asignación preferencial de MS ocurre a partir de mediados del verano hasta otoño, independientemente del tratamiento de defoliación (Teixeira *et al.*, 2007). Se considera que la partición durante el otoño, se debe, probablemente, en respuesta a fotoperiodos cortos y/o bajas temperaturas (Gosse *et al.*,

1984; Khaiti y Lemaire, 1992). Aunque aún los mecanismos fisiológicos que controlan los cambios en la partición de MS en las raíces de alfalfa no están claros, puede ser una respuesta directa de los procesos morfogénéticos, a las señales ambientales y a los cambios consiguientes en las relaciones fuente/destino (Durand *et al.*, 1991). Por ejemplo, Brown *et al.* (2005) observaron que el filocrón de alfalfa (es decir, la acumulación de tiempo térmico requerida para la aparición de una hoja del tallo principal) fue mayor en otoño que en P-V y se relacionó con el fotoperíodo. Los estímulos ambientales en otoño pueden activar genes responsables de la asignación preferencial de asimilados en compuestos de reserva (Noquet *et al.*, 2003). Según estos análisis y como se comentó anteriormente, es de esperar que los valores de la EUA en el período O-I sean menores a los resultados del modelo.

Para valorar con mayor exactitud estos resultados podríamos considerar la siguiente información: durante la primavera, la mayor parte de la biomasa se retiene en los tallos y menos del 5-15 % se distribuye por debajo del suelo. Desde mitad del verano hasta finales del otoño, más del 50-60% del total de carbono asimilado se puede distribuir a los órganos perennes debajo del suelo para mantener el crecimiento del cultivo (Teixeira *et al.*, 2008). Si el modelo AquaCrop permitiese diferenciar los porcentajes de biomasa aérea y radical, sería esperable que los valores de EUA se acerquen a los citados en la bibliografía para O-I (Grimes *et al.*, 1992; López *et al.*, 1997; Collino *et al.*, 2005).

A fin de analizar posibles causas de la homogeneidad de la EUA durante períodos secos y húmedos se discutirá sobre el comportamiento de alfalfa frente a estas situaciones extremas. En el modelo la capacidad de adaptación a la sequía de alfalfa está estrechamente relacionada con la exploración de la raíz condicionada por el tipo de perfil edáfico y la capacidad de extraer agua de ese perfil (Tavakol y Pakniyat, 2007; Poorter *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2015).

La disponibilidad de agua en el suelo determina la mayor o menor dificultad que tienen las raíces para absorberla, de acuerdo al potencial hídrico total. A medida que el suelo se seca, el potencial se hace más negativo (el agua está más retenida) y aumenta la dificultad de las raíces para absorber agua. Se destaca que la alfalfa tiene una estrategia para evitar la sequía al acceder al agua a través de su profundo sistema radicular; no obstante, Sheaffer *et al.* (1988) argumentan que la resistencia de alfalfa a la sequía es deficiente y se ve rápidamente afectada por la escasez de agua. Las tasas relativas de expansión del área foliar disminuyen de su punto máximo a un umbral entre 15-20 % por debajo de la cc, hasta llegar a ser insignificantes cuando la humedad total disponible del suelo disminuye cerca del 30 % de la cc (Allen *et al.*, 2006). Aunque, se

documenta que las raíces de alfalfa extraen la humedad del suelo por debajo de la tensión de 1,5 MPa, que normalmente se supone que es el límite inferior del agua disponible para las plantas de cultivo o PMP (Cutforth *et al.*, 1991).

Para el modelo, la respuesta del uso de agua en alfalfa es lineal (Hanks *et al.*, 1977; Bauder *et al.*, 1978; Retta y Hanks, 1980; Sammis, 1981). El alto grado de linealidad fue definido porque no hay evidencia que indique que la alfalfa es más sensible a estrés hídrico en algunas etapas de crecimiento estacional que en otras (Downey, 1972). Podríamos suponer que la relativa homogeneidad observada entre estaciones (P-V y O-I) y períodos húmedos, secos o normales, en las localidades, respondería a ese planteo.

Otra interpretación a la supuesta indiferencia en la EUA en cada situación de P, en y entre localidades, serían los diversos mecanismos de activación que posee alfalfa para lograr la EUA en situaciones adversas, tanto déficit como excesos hídricos. Como se comentó, posee un sistema de raíces caracterizado por una buena capacidad para penetrar en suelo severamente compactado, incluso cuando la resistencia a la penetración supera los 4 MPa (Glab, 2011), y aún en aquellas situaciones de insuficiencia de agua en algún horizontes del perfil edáfico se observó un estímulo en el desarrollo y alargamiento de las raíces (Wen Ming y Ling, 2003). Se suma a este comportamiento los resultados observados por Hamblin *et al.* (1987), quienes al examinar los patrones de agotamiento de agua en los suelos encontraron para alfalfa, que las raíces más profundas fueron más efectivas para extraer agua que las más superficiales. Aquellas tenían valores más altos de absorción diaria de agua por longitud de raíz. Otros investigadores llegaron a conclusiones similares en diferentes cultivos (Taylor *et al.*, 1973; Bland y Dugas, 1989; Acebedo, 2013).

Monteith (1986) reportó valores bajos de consumo de agua por las raíces de $0,015 \text{ día}^{-1}$ en suelos Vertisoles, como los de Concepción del Uruguay, a 75 cm de profundidad. Este valor puede ser causado por la resistencia de esos suelos a la liberación de agua o por una distribución no uniforme de las raíces. Supuestos que explican, en parte, las menores EUA que se observan en esa localidad. La alfalfa demostró tener estrategias más conservadoras en el uso del agua. Se destaca su persistencia usando el agua disponible en el suelo a tasas muy lentas de absorción durante sequías prolongadas (Loomis y Wallingas, 1991).

Otros autores señalan que la capacidad de adaptación a la sequía de las plantas está estrechamente relacionada con la asignación de biomasa entre sus componentes (Tavakol y Pakniyat 2007; Poorter *et al.* 2012; Xu *et al.*, 2015). Así, su exposición al estrés por sequía

pueden mejorar la productividad del agua y la eficiencia en el uso de nutrientes al disminuir la producción de biomasa y contribuir con más biomasa a la raíz, lo que resulta en una mayor relación raíz-brote.

El ajuste osmótico que desarrolla sus hojas, ha sido considerado como un mecanismo importante de tolerancia al estrés para mantener la turgencia. Reduce sus potenciales osmóticos bajo condiciones de sequía. La osmorregulación se logra con la sobreproducción de iones y solutos orgánicos compatibles tales como prolina, azúcares solubles, proteínas solubles, ácidos orgánicos, glicina, betaína, etc. (Calamassi *et al.* 2001; Kocheva y Georgiev, 2003; Farooq *et al.* 2009 y Kang *et al.*, 2011), sustancias que mantienen la integridad de la estructura del cloroplasto y la función fotosintética en la especie (Paknejad *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2009). Por otra parte, se destaca que alfalfa percibe señales del estrés muy anticipadamente y activa reacciones de defensa tempranas (Apel y Hirt, 2004; Bhargava y Sawant, 2013), coordina la producción de antioxidante enzimático y no enzimático y los va acumulando aun cuando el déficit es moderado (Kholová *et al.*, 2011).

Al respecto, es interesante analizar los planteos de Hainaut *et al.* (2016), quienes consideran la creciente necesidad de desarrollar servicios basados en la biodiversidad y opciones de gestión del agua asociadas a las predicciones de eventos de déficit que señala el IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático). Estos autores mostraron claramente que en alfalfa, existe una fuerte variación en términos de respuesta de la transpiración a eventos de sequía y demostraron, particularmente, que habría variación genética para la resistencia en la especie. Considerando estos aspectos teóricos, podemos resumir que alfalfa generalmente tolera la escasez de agua con bastante éxito, utiliza diversas estrategias para el uso sostenible del agua, basadas en rasgos fisiológicos, los que se deberían profundizar en programas de mejoramiento. Los resultados en el modelo, de la producción de MS, en condiciones de sequía, no se alejan a las consideraciones de ser muy eficiente en el uso del agua.

-Si analizamos los períodos húmedos, por su sistema radical profundo, en suelos bien estructurados sin limitantes, también maximizará la extracción de agua almacenada en el perfil, dando una mayor EUA. Así lo confirman ensayos realizados en la Universidad de Lincoln, Nueva Zelanda, con alfalfa, en secano cultivada en un suelo franco limoso profundo con alta capacidad de almacenamiento de agua. La EUA fue de 40 kg de MS ha⁻¹ mm⁻¹ (Moot *et al.*, 2008), mientras en este trabajo, en aquellas localidades donde el aporte de la NF fue significativo, siendo de 26,45 y 19,05 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹, como promedio de períodos húmedos

de P-V y O-I, en Marcos Juárez y en Rafaela, respectivamente. Estos valores respondían a un aumento en la MS de cada corte del 5% en Marcos Juárez y 22% en Rafaela si considerábamos la NF, en períodos húmedos. Al respecto, Henry *et al.* (1987) la describe como una especie con gran capacidad para la extracción de agua del suelo, por lo que podría ser considerada como una especie depresora del nivel de la NF cuando se presenta poco profunda.

Otros autores señalan que cuando la NF crea condiciones saturadas dentro de la zona de la raíz, las producciones caen bruscamente (Mueller *et al.*, 2005; Nosetto *et al.*, 2009, Aragón *et al.*, 2011). Aun así, se destaca que en Marcos Juárez, con NF poco profundas, la disminución en la EUA fue baja. Presumiblemente debido a estrategias que posee la especie para enfrentar esas condiciones hídricas del suelo. Experiencias realizadas en Australia y América del Norte, en grandes llanuras y niveles de NF altas, muestran que especies perennes son más efectivas que las anuales para reducir la recarga y bajar los niveles de la NF (Black *et al.*, 1981; Keating *et al.*, 2002; Pannell y Ewing, 2006). Black *et al.* (1981) concluyeron que alfalfa fue la especie capaz de agotar mayor cantidad de agua del suelo comparada con melilotus, cártamo y girasol, todas de raíces profundas. No obstante, existe una disminución de la fotosíntesis en estas condiciones de suelo saturado, Brown *et al.* (1972) señalaron que sometida a 8 días de inundación, la fotosíntesis de alfalfa disminuyó un 30%, sin llegar a morir. Jung y Larson (1972) y Dobrenz *et al.* (1969) analizaron el requerimiento hídrico en alfalfa y expresan que está relacionado significativamente con la cantidad de agua transpirada, con la proporción de folíolo-pecíolo y folíolo-tallo, con el área foliar y el porcentaje de proteína en las hojas, no así con el grosor de las hojas y la densidad de los estomas en las hojas. Observaron grandes diferencias entre variedades de alfalfa y más aun dentro de ellas.

Sin duda, los estudios analizados confirman que en suelos saturados, la respiración de las raíces se ve dificultada, los macroporos donde normalmente existía aire están ocupados por agua. Al principio las raíces consumen el aire atrapado por el agua del suelo, el cual no es expulsado totalmente, así mismo utilizan el oxígeno disuelto. Esto explicaría el por qué la alfalfa resiste algún tiempo con el suelo saturado, tal como fue planteado en el párrafo anterior. Cuando el oxígeno disminuye por debajo de unos niveles específicos para cada especie, las raíces disminuyen su actividad fisiológica, según lo observado posiblemente alfalfa tenga una elevada resistencia al exceso de humedad, podría disponer de mecanismos similares a otras especies que aseguran la respiración de las raíces en esas difíciles condiciones o bien presentar

adaptaciones morfológicas tal como aumentar la proporción de espacios intercelulares que comuniquen la parte aérea de la radical.

Por otra parte, Newman (1974) concluye que, durante las noches, los flujos de agua en el interior de las raíces de alfalfa eran relativamente libres de sales y casi indetectable, esto hacía que saliese el agua del sistema radical, proceso que se alternaba con los pequeños flujos de agua ascendentes, que si contenían sales, en esos sectores de las raíces durante el día. De esta manera había un flujo neto total de sales en las raíces de alfalfa, que generaba una posible forma de ajuste osmótico por parte de las plantas en situaciones de excesos hídricos.

Alva *et al.* (1985) documentaron la adaptación de la alfalfa a suelos húmedos. El bajo rendimiento en estas situaciones hídricas a menudo se la atribuye a los efectos de la pudrición total o parcial de la raíz. Sin embargo, el exceso de agua del suelo también podría reducir el crecimiento de alfalfa sin ocasionar su muerte. Estos autores estudiaron el impacto del exceso continuo de saturación en el suelo y el potencial de crecimiento después de la eliminación del exceso de agua. No observaron síntomas visibles de lesión en raíz a pesar de registrar un crecimiento significativamente reducido de esta en comparación con raíces sin estrés por exceso hídrico. El crecimiento del brote se vio afectado de manera menos consistente que el crecimiento de la raíz, sí observaron un aumento significativo en la concentración de manganeso en las plantas bajo estrés continuo. Estos trabajos hacen suponer que la respuesta de la alfalfa al suelo húmedo no es un fenómeno simple que puede atribuirse al mismo factor en cada situación. Puede describirse mejor como un "síndrome del suelo húmedo" cuya causa e intensidad dependerán de la magnitud y el equilibrio de todas las tensiones individuales involucradas.

Como síntesis, no se observaron importantes diferencias en la EUA, contrariamente a lo señalado por Guitjens (1990), a partir de una revisión general y considerando cortes individuales, el autor menciona una amplia variación de EUA en alfalfa, con un rango de valores de 6 a 30 kg mm⁻¹. Sin embargo, otros autores manifiestan eficiencia similares de las halladas en este estudio (Sánchez Gutiérrez *et al.*, 2017; Brown *et al.* (2005). Aqua Crop mostró valores entre 1,5 a 4 kg mm⁻¹ en la región.

Se reconoce las diversas estrategias de la especie para aumentar la EUA a medida que el nivel de estrés hídrico por déficit o por exceso se incrementa, el tipo de suelo y el agua almacenada en él, condicionada por el tipo de matriz edáfica, la intensidad y distribución en las P, son fuentes importantes de abastecimiento en la especie.

En la región en estudio, ensamblar todas esas variables para cubrir los requerimientos hídricos y alcanzar la mayor producción de MS en alfalfa, es muy difícil. No obstante, se destaca las diversas estrategias que dispone para hacer un uso lo más eficiente posible y la fortaleza del modelo en orientar los valores de EUA en la ecorregión analizada.

6-6 Índice de valoración de cultivares (Iv)

Son muchos los factores que deben coincidir para obtener máximos rendimientos, algunos no se podrán controlar como los factores climáticos, mientras que otros corresponden a herramientas de manejo imprescindibles para aumentar las posibilidades de aproximarse al potencial de cada especie. Entre las herramientas que el productor dispone se encuentra la elección del cv a sembrar, de forma que la genética no sea una restricción cuando las condiciones sean óptimas para que las plantas puedan producir ese potencial (Spada, 2007). El mejoramiento genético ha contribuido en todos estos aspectos mediante el desarrollo de cv con mayor potencial de rendimiento, mejor resistencia a plagas y enfermedades o mejor calidad de forraje (Snaydon, 1985; Brummer, 1999). La gran mayoría de los programas de mejoramiento de alfalfa tienen como objetivos principales el desarrollo de cv con muy alta producción de forraje, alta persistencia y resistencia múltiple a insectos plagas y enfermedades (Basigalup, 2007). Desde la morfología del canopeo, diversos autores (Volenec *et al.*, 2002; Odorizzi, 2015), confirman que el cultivo de alfalfa forma un microclima particular y es capaz de albergar una amplia variedad de plagas perjudiciales, como también enfermedades de raíz-corona. Señalando además, que los ataques pueden causar grandes pérdidas de productividad tanto en la cantidad como en la calidad del forraje y en la persistencia del alfalfar (App y Manglitz, 1972; Graham *et al.*, 1979; Gramshaw *et al.*, 1989; Lowe *et al.*, 1987; Summer, 1998). Planteos que hacen suponer que las respuestas relacionadas a la presencia de plagas o enfermedades, que reducirían el rendimiento de forraje, no se comportarían por igual entre los cv y entre las localidades del estudio. Además, los cultivos de alfalfa son vulnerables a las anomalías climáticas- tanto a la sequía como años de excesos hídricos- como al estrés por plagas y patógenos.

Basigalup y Rossanigo (2007), señalan que el nivel de resistencia a las plagas y enfermedades, es un criterio trascendente para elegir los cultivares más adaptados a un determinado ambiente. El comportamiento que exhiben en ensayos de corte conducidos en las localidades que forman parte de la Red, muestran asociaciones entre cultivar * localidad, de diferente significancia

según los períodos analizados (suma de producción de los tres o cuatro ciclos de crecimiento que dure el cultivo). En líneas generales se observa que en estos estudios, la interacción es significativa, especialmente en períodos húmedos (2010-2014, 2012-2016 y 2014-2016). En períodos normales los resultados fueron irregulares, algunos ciclos sin diferenciar la asociación, como ejemplo el ciclo 1996-2000 y 2002-2006, y otros con asociaciones cercanas al 60% (2004-2008). Aquellos períodos secos no mostraban asociaciones estadísticas (2000-2004; 2008-2012) entre cv * localidades. Pese a esas interacciones positivas, sólo se observan aportes a la interacción por parte de dos o tres localidades de un total de 10 en los ensayos de la Red. Por otra parte, en esos estudios, también se observa que en la mayoría de los ciclos analizados, en cada localidad, no se diferencia un comportamiento muy distinto en las producciones acumuladas entre cv (Spada, 2000 a 2014 y Ariel Odorizzi, 2015 al 2018).

En este estudio la relación entre el conjunto de producciones anuales en cada localidad y los niveles de resistencia biótica integrada en el Iv, fue positiva. La variabilidad en los rendimientos de biomasa anual fue explicada en un 46% por el Iv, el otro 54% estaría explicado por otras condiciones ambientales de la región.

Dado que no se registran bibliografías que integren los niveles de resistencias bióticas para clasificar los cv, la contrastación de años con anomalías climáticas y los valores de producción promedio en los grupos obtenidos del Iv, permitió lograr diferenciar respuestas en cada localidad.

Se detectaron, en general, en los años normales (tabla 30), mayores rendimientos de forraje en el grupo Iv I respecto a los dos grupos restantes (Iv II e Iv III), en todas las localidades. Esta pequeña ventaja podría relacionarse a que la mayoría de los cv que forman parte del grupo, son aquellos más recientemente comercializados en el mercado con resistencia a múltiples enfermedades y plagas.

En años secos o lluviosos las respuestas de producción fue variable. Reynaud *et al.* (2009) señalan la complejidad existente entre los efectos de las condiciones ambientales, en especial P y tipo de suelo, sobre las interacciones entre cv, enfermedades e insectos. Estos autores confirmaron que los efectos del incremento de lluvias, podrían hacer que las enfermedades de raíz de la alfalfa sean más severas, registrando disminuciones en las producciones en un 20%. En un análisis general, en este estudio y en años húmedos, el Iv III, presentó un 5 a 7% menos de producción de biomasa respecto al Iv I. Diferencias estadísticas que se comprobaron solo en Rafaela y en Concepción del Uruguay.

Garrett *et al.* (2006) y Pandey *et al.* (2017), analizaron el estrés por sequía en especies templadas y señalaron que éste influye en la interacción de la planta-patógeno. Por otra parte, Sinha *et al.* (2019), analizaron la relación de la resistencia de las plantas a los insectos, la que puede ser relativamente permanente, aunque en condiciones ambientales extremas, podría verse afectado el nivel de la resistencia. Estos estudios indican que la interacción tripartita de la planta-sequía-patógeno/plaga es compleja en condiciones de campo y depende de la combinación de ellos en las localidades cultivadas. En este estudio, se observó, que en Marcos Juárez, Manfredi y Concepción del Uruguay, los grupos no se diferenciaban en situaciones de sequías. En Paraná y en la localidad de Rafaela, solo se destacó el primer grupo de los dos restantes.

Del mismo modo, el crecimiento de las plantas podría describirse como una construcción genéticamente planificada en relación con el medio ambiente (Volenec *et al.*, 2002), definición que no deja de ser completamente verdadera. La pregunta es: ¿cómo saber cuál es el ambiente estándar o de referencia para comparar cv?. Por otra parte, ¿que cualidad del cv se debería considerar?, aquellos con un rendimiento máximo de MS, los de mejor calidad, o aquellos que logren la mayor persistencia relacionada a sus resistencias bióticas. El ambiente ideal para cualquiera de estos objetivos, podría implicar cantidades excesivas de luz y nutrientes, enriquecimiento de CO₂, suelos más sueltos con baja retención de agua, etc.

Considerando estos interrogantes, en cada localidad analizada, excepto Rafaela y Paraná, en aquellos años muy secos, no se detectaron diferencias entre los grupos del Iv, mientras que en años húmedos esas dos localidades más Manfredi, y Concepción del Uruguay, diferenciaron los valores de la producción de biomasa, comportamiento que se relaciona a lo analizado por Annicchiarico (2002), quien señala que la riqueza en genes de resistencia biótica, no necesariamente hace más tolerante a la especie a las variaciones en las condiciones ambientales de una zona.

En ambientes como Concepción del Uruguay, el tipo de suelo condiciona fuertemente los mecanismos de absorción de agua y la supervivencia de las plantas de alfalfa, todos los grupos dieron las mismas producciones de biomasa excepto en situaciones climáticas de excesos hídricos.

Diferente situación se presentó en Rafaela, donde la clasificación del Iv fue positiva en la mayoría de las situaciones climáticas exploradas. Se destacaron diferencias significativas en Iv I respecto al Iv III, en los períodos secos o húmedos. Posiblemente sus estructuras genéticas los hacen más tolerantes o susceptibles a esas condiciones ambientales. Al respecto, debido a su

ubicación geográfica, se observa la mayor amplitud térmica media anual, destacándola como área de mayor continentalidad (Aliaga, 2018) (figura 1), presentó temperaturas máximas promedio de $25 \pm 4,8$ °C y mínimas de $12,5 \pm 4,5$ °C, óptimas en el crecimiento de la especie según Garza *et al.* (1965). Asimismo, Spada (2008) considera que el ambiente de Rafaela se ubica dentro de los más favorables en el país para la producción de este cultivo. Podríamos suponer que esta localidad presenta rangos climáticos similares al ambiente originario de la especie (temperaturas máximas próximas a 30°C y mínimas de 15°C). La pregunta que nos formulamos es: ¿el nivel de resistencia de cada cv puede compensar las condiciones ambientales que limitan su crecimiento?. De ser una respuesta positiva, sus cualidades genéticas estarían bien expuestas, reconociendo a la localidad como zona propicia para relevar la variabilidad genética en la especie.

Como conclusión podemos decir que la adaptación regional es, sin duda, un proceso importante y continuo, aunque sus efectos a menudo no son evidentes, se encontró diferencias significativas en el rendimiento como resultado del uso del Iv, en las diferentes localidades.



CONCLUSIONES

7- Conclusiones

Se acepta la Hipótesis del primer objetivo principal

La producción de forraje de *Medicago sativa* L. en la ecorregión pampeana puede ser estimada a partir de un modelo funcional dinámico que simula la productividad alcanzable de alfalfa como función del consumo de agua (AquaCrop), conformados por combinaciones de variables climáticas y edáficas a nivel de períodos de crecimiento.

Se aceptan las Hipótesis de los objetivos específicos

a.1- Se calibró y validó el modelo AquaCrop, para alfalfa de latencia corta (GL 8 a 10), bajo condiciones climáticas contrastantes (sequía, excesos y normalidad), en dos ciclos de crecimiento (P-V y O-I) y en cinco localidades de la región pampeana argentina, en una serie de 18 años. El modelo fue capaz de representar satisfactoriamente la producción de la biomasa forrajera de alfalfa.

a.2- Las anomalías de excesos y déficit hídricos, manifiestan diferencias en el comportamiento productivo de alfalfa, las cuales son identificadas por el modelo AquaCrop. Consecuentemente, pudo ser identificada, en cada una de las localidades del estudio, el o los factores de mayor valoración que afectan las brechas de productividad entre lo alcanzable y lo potencial.

a.3- La incorporación, en el modelo AquaCrop 6.1, de la profundidad del nivel freático y los aportes que realiza por ascenso capilar, permite comprender las respuestas de la producción de la biomasa forrajera a la dinámica freática en cada localidad analizada. De modo que napas freáticas demasiado profundas son inaccesibles y no ofrecen agua al crecimiento de la biomasa, napas freáticas someras generan anegamientos que limitan su producción. En Marcos Juárez, se lograron las mayores producciones de MS como consecuencia de la diferencia en el agua acumulada en el suelo y a la contribución que realizó la presencia de la napa freática en el perfil enraizable.

a.4- La respuesta de la eficiencia en el uso del agua de la biomasa aérea acumulada en alfalfa, mediante las simulaciones realizadas con el modelo AquaCrop, fue similar a lo informado por la literatura nacional e internacional. Lo que permite utilizar el modelo para valorarla empíricamente.

Se acepta parcialmente, la Hipótesis del segundo objetivo principal

Se logró un Índice de valoración de cultivares de grupo de latencia corta, que expresa la resistencia a plagas y enfermedades en un único valor, como un instrumento estadístico simple que permite el análisis de la productividad forrajera en situaciones climáticas contrastantes. Este índice explica el 46% de la combinación lineal de la variabilidad de la producción de biomasa, en las distintas localidades.

Los cultivares se dividieron en tres grupos, de acuerdo al índice de valoración asignado por terciles. El primer tercil correspondió al grupo I, altamente resistentes a las plagas y enfermedades, tuvo las mayores respuestas de producción de MS que los grupos II y III, con resistencias acumulativas más bajas, en las situaciones de años normales.

El comportamiento productivo de los grupos, en escenarios de condiciones hídricas extremas y en las diferentes subregiones edafoclimáticas, no fue consistente. Existió una relación positiva entre la producción en biomasa en condiciones hídricas extremas y el grupo I, en las localidades de Rafaela y Paraná. Estas dos localidades presentarían un ambiente que podría ser el más adecuado para que los cultivares expresen esos caracteres de resistencia. En Manfredi y Concepción del Uruguay, la relación del grupo I solo fue positiva en años con excesos hídricos. En Marcos Juárez el comportamiento productivo de los grupos fue indiferente en los escenarios climáticos extremos.

8- Consideraciones

8-1 *Trabajos con validaciones a campo*

Por último y a pesar de los buenos resultados obtenidos con el modelo, existe aún una serie de elementos que pueden mejorarse. Para el proceso de calibración y validación del modelo AquaCrop, es necesario hacer mediciones en campo del tapiz de alfalfa, como el seguimiento del “canopy cover” o follaje, el número de plantas, la biomasa seca, índice de cosecha, así como conocer el porcentaje de fertilidad del suelo, en ensayos diseñados bajo condiciones óptimas de manejo agronómico, control de plagas y enfermedades. También es necesario conocer el nivel de fertilidad del suelo para cada simulación y el índice de cosecha potencial (H_{Io}), ya que estos dos parámetros son muy sensibles y son determinantes para obtener un buen resultado de la salida del modelo.

Es importante registrar la biomasa precedente del inicio del corte y las condiciones hídricas del suelo, ya que afectarán la producción posterior. Se necesitaría medir el contenido de agua en el suelo de forma semanal. Y así, de manera indirecta, se podría evaluar la partición de la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo de alfalfa al compararse los resultados medidos en campo y los del balance de agua en el suelo que genera Aquacrop.

Desde el punto de vista operativo, el modelo permite usar medidas de tiempo a nivel de día, estimando la biomasa para períodos muy cortos con límites de 49 días en P-V o 39 días en O-I, en aquellos rebrotes con menos tiempos de descanso se debe simular el crecimiento destilando “período de ciclo de crecimiento” y adelantar los días a corte.

Los aportes de humedad del ascenso capilar proveniente de los niveles freáticos altos o aportes de humedad internos del suelo, fue implementado en la última versión del modelo, esto es un novedoso elemento que debería también validarse.

8-2 *Algunas limitaciones del modelo*

- Los cultivos forrajeros aún no se han calibrado para el modelo. Esta limitación fue considerada como una oportunidad y se aprovechó esta carencia para desarrollar el contenido de la tesis.

- Para poder ser utilizado en cultivos perennes el modelo debería permitir comenzar el ciclo a simular considerando el estado del cultivo al inicio del mismo, ya que en los cultivos perennes su desarrollo y producción depende no sólo de las particularidades del año en curso, sino también de las del ciclo anterior.
- El modelo no calcula la partición de la biomasa entre la fracción aérea-radical, la producción de biomasa es articulada por medio de la expansión del dosel y dependiente de la raíz. La misma solo es considerada como una estructura viva que crece a lo largo del ciclo del cultivo y que por lo tanto involucra capas de suelo con las respectivas características hidráulicas. Esta función, si bien simplifica los procesos, tendría alguna incertidumbre en los valores de las producciones otoñales.
- Algunas variables del modelo no respondían pues se excedían los límites mínimos de tolerancia de dicha variable, como ejemplo citaremos: distancias de líneas de siembras, densidad de plantas, mínima profundidad de la raíz en etapas iniciales, construcción del índice de cosecha con un paso diario.

8-3 Proyecciones de Investigación en el área forrajera

- En primer lugar es evidente hacer experimentaciones en campo con el objetivo de mejorar tanto los rangos de los valores del cultivo, como los valores del estrés hídrico que considera el modelo.
- Calibrar y validar el modelo AquaCrop en varios cultivos forrajeros de interés.
- Sería relevante la determinación de la huella hídrica del cultivo, como así también analizar la eficiencia del sistema productivo, considerando determina si es mejor producir uno u otro cultivo alternativo de cara a las limitaciones en disponibilidad del agua a nivel local o regional.
- El hecho de que la productividad hídrica sea normalizada por el CO₂, asegura que el modelo pueda utilizarse para estimar los efectos del cambio climático global.



BIBLIOGRAFÍA

8- Bibliografía

- Abate, P. E.; Dardanelli, J. L.; Cantarero, M. G.; Maturano, M.; Melchiori, R. J. y Suero, E. E. 2000. Efecto del ambiente climático sobre la eficiencia del uso del agua en trigo regado. *Rev. Arg. de Agrometeorología*. 1(2):1-4.
- Acebedo, E. H. 2013. Interacciones suelo-agua-raíz en el proceso de absorción de agua por las plantas. *Boletín Técnico* 44:17-25, 1979. Fac. Agron. Univ. Chile. Disponible en <https://es.scribd.com/document/160964089/Interacciones-Suelo-Agua-raiz-en-El-Proceso-> (consultado en abril de 2019)
- Al-Hamdani, S. and Todd, G. W. 1990. Effect of temperature regimes on photosynthesis, respiration and growth in Alfalfa. *Proc. Okla. Acad. Sci.* 70: 1-4
- Aliaga, V. S. 2018. Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región. Tesis De Doctor En Geografía. Universidad Nacional del Sur. Disponible en <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4149?mode=full> (consultado en abril de 2019)
- Allen, R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org.
- Allen, R. G.; Pereira, L.; Raes, B. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Disponible en: http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf (consultado en febrero 2017).
- Allen R.G.; Pereira L.; Raes D.; Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO Riego y Drenaje. FAO. Roma, Italia, 298 p
- Altier, N. 1991. Root rot of red clover incited by *Fusarium* spp. *Phytopathology* 81:690-691
- Altier, N. 1996. Enfermedades de leguminosas forrajeras: diagnóstico, epidemiología y control. Montevideo, INIA. Serie Técnica No.74:87-104.
- Altier, N. 2000. Reconocimiento y manejo de enfermedades en alfalfa. Montevideo, INIA. Boletín de Divulgación No.69: 125-143.
- Altier, N.; Rebuffo, M. y Cabrera, K. 2010. Enfermedades y plagas en pasturas. Montevideo (Uruguay). INIA Serie Técnica; 183
- Alva, A. K.; Lanyon, L. E. and Leath, K. T. 1985. Excess Soil Water and Phytophthora Root Rot Stresses of Phytophthora Root Rot Sensitive and Resistant Alfalfa Cultivars. *Agronomy Journal* Vol. 77 No. 3, p. 437-442
- Álvarez, A. J.; Panigatti, J. L. y Pérez, M del C. 1979. Régimen hídrico de la serie Rafaela. INTA. Rafaela. Informe Técnico 4. 17 p
- Amiri, E. 2016. Calibration and Testing of the Aquacrop Model for Rice under Water and Nitrogen Management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3): 387-403
- Andriani, J. M.; Andrade, F. H.; Suero, E. E. and Dardanelli, J. L. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. 1. Their Effects on Dry-Matter Accumulation, Seed Yield and Its Components. *Agronomie* 11: 737-746

- Annicchiarico, P. 2002. Genotype x Environment Interactions -Challenges and Opportunities for Plant Breeding and Cultivar Recommendations. *Euphytica* March 1997, Volume 94, 1: 53–62
- Apel, K. and Hirt, H. 2004. Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373-379.
- App, B. A. and Manglitz, G. R. 1972. Insects and related pests. In: Hanson, C.H. *Alfalfa science and technology*. Madison: American Society of Agronomy. Agronomy, 15: 527-554.
- Aragón, R.; Jobbágy, E. G. and Viglizzo, E. F. 2011. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*. 4, 433-447
- Aramburu Merlo. 2016. Cuantificación de las brechas de rendimiento de soja, trigo y maíz de Argentina. Tesis. Disponible en INTA_CRBsAs_EEABalcarce_AramburuMerlos_F_Cuantificación_brechas_rendimiento_soja_trigo.pdf (consultado marzo 2018).
- Araya, A.; Habtu, S.; Hadgu, K.M.; Kebede, A and 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
- Araya, A.; Kisekka, I. and Holman, J. 2016. Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. 17pp. *Irrig Sci*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Arnold, C.Y. 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 74: 430-445.
- Arolfo, V. y Odorizzi, A. (ed.). 2015. Avances en Alfalfa. Ensayos Territoriales. EEA Manfredi-INTA, Año 25 al 28
- Asseng, S. and Hsiao, T. C. 2000. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Research*, V 67, N1: 191-206.
- Avice, J. C.; Ourry, A.; Lemaire, G.; Volenec, J. J. and Boucaud, J. 1997. Root protein and vegetative storage proteins are key organic nutrients for alfalfa shoot regrowth. *Crop Science* 37: 1187–1193.
- Bai, W. M. and Hao Li, L. 2003. Effect of irrigation methods and quota on root water uptake and biomass of alfalfa in the Wulanbuhe sandy region of China. *Agricultural Water Management* 62(2):139-148
- Baigorri, H. E. J.; Scarafoni, R. y Masiero, B. 1995. Comportamiento de cultivares de grupos de madurez III al VII en 5 fechas de siembra entre octubre y febrero en Marcos Juárez. Parte 2: Crecimiento. 1° Congreso Nacional de Soja. Pergamino (Bs. As.). Tomo I: pp. 214-221.
- Baigorri H. E. J. y Martini, E. 2004. Claves para la caracterización de un ambiente con influencia de napa freática. Soja Actualización 2004. EEA Marcos Juarez. Proyecto regional – Producción Agropecuaria Sustentable. INTA. Pág. 41-46.
- Baker, D. N.; Lambert, J. R. and McKinion, J. M. 1983. GOSSYM: A simulator of cotton crop growth and yield. *S.C. Agric. Exp. Stn. Bull.* 1089. South Carolina, USA. 135p.
- Baldissera, T. C.; Frak, E.; Faccio Carvalho, P. C and Louarn, G. 2014. Plant development controls leaf area expansion in alfalfa plants competing for light. *Annals of Botany* 113:145-157

- Bannayan, M. and Hoogenboo, G. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model *Field Crops Research* 111: 290–302
- Basigalup, D. H. (Ed) *El cultivo de alfalfa en Argentina*. Buenos Aires Ediciones INTA. 2007. 479 p.
- Basigalup, D. H. y Odorizzi, A. S. 2007. Mejoramiento genético en alfalfa. Pag 1-31. Disponible en http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/146-Mejoramiento.pdf (consultado en febrero 2019).
- Basigalup, D. H. y Rossanigo, R. 2007. Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. En: *El Cultivo de la Alfalfa en la Argentina*. (ed) Basigalup, D. Ediciones INTA. pp: 13-25
- Basigalup, D. H.; Rossanigo, R. y Ballario, M. V. 2007. Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. En: Basigalup, D.H. *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. Buenos Aires: INTA. Cap. 1. 13-25.
- Bauder, J. W.; Bauer, A.; Ramirez, J. M. and Cassel, D. K. 1978. Alfalfa water use and production on dryland and irrigated sandy loam. *Agron J* Vol. 70 No. 1: 95-99
- Berone, G.D. y Dreher, N. 2007. Elongación y vida media foliar de gramíneas templadas perennes a inicios de primavera en el centro-oeste santafecino. *Revista Argentina de Producción Animal*. 27(1): 201-202.
- Berone, G. D.; Di Nucci de Bedendo, E.; Fernandez, H.; Gastaldi, L.; Mattera, J. y Spada, M. 2017. Calibración y validación de un modelo de crecimiento para alfalfa (*Medicago sativa* L.). RIA. Revista Investigaciones Agropecuarias Disponible en <http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/trabajosenprensa/berone-castellano-8.pdf> (consultado abril de 2018).
- Bertín, O. D. 1997. La producción de forraje de alfalfa bajo riego en el norte de la provincia de Buenos Aires. En *Seminario de Riego INTA-EEA Balcarce*. Mar del Plata 25-26 de septiembre de 1997. pp 79-85.
- Bhargava, S. and Sawant, K. 2013. Drought stress adaptation: Metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant Breeding* 132 (1):21-32
- Black, A.; Brown, P.; Halvorson, A. and Siddoway, F. 1981. Dryland cropping strategies for efficient water-use to control saline seeps in the northern Great Plains, USA. *Agricultural Water Management* 4: 295-311
- Blackman, P.G. and Davies, W. J. 1985. Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying. *J. Exp. Bot.* 36: 39–48.
- Bland, W. L. and Dugas, W. A. 1989. Cotton Root Growth and Soil Water Extraction. Division Soil & Water Management & Conservation. Disponible en
- Bogler, T. P. and Matches. A. G. 1990. Water use efficiency and yield of sainfoin and alfalfa. *Crop Science* 30: 143-148
- Bonadeo, E.; Hampp, E. R.; Bongiovanni, M.; Moreno, I. S. y Odorizzi, A. 2006. Relationships between soil physical and chemical properties and alfalfa (*Medicago sativa* L.) roots in patched soils. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/237348935> (consultado febrero 2020)
- Borg, H. and Grimes, D. W. 1986. Depth development of roots with time: an empirical description. *Trans. ASAE* 29: 194-196

- Boschetti, N. G.; Valenti, R.; Vesco, C. y Sione, M. 1999. Distribución en las fracciones orgánica e inorgánica del fósforo en suelos vérticos de la provincia de Entre Ríos. Primer Simposio sobre suelos vertisólicos. Resúmenes. Oro Verde. Entre Ríos. Octubre 1999. pp 33-34.
- Bouton, J. H. 2001. Alfalfa. In: Gomide JA, Mattos WRS, da Silva SC (eds) Proc. XIX International Grassland Congress, Sao Pedro, Sao Paulo Brazil. 11-21(February 2001). FEALQ, Piracicaba SP Brazil, 545- 547
- Bouton, J. H. 2012. Breeding lucerne for persistence. Crop and Pasture Science 63:95- 106.
- Bowman, A. M.; Smith, W. and Brockwell, J. 2004. Forecasting lucerne productivity under dryland farming conditions in central-western and western New South Wales. Soil Biology and Biochemistry, 36(8), 1253-1260.
- Bradford, K. J. y Hsiao, T. C. 1982. Physiological responses to moderate water stress. p. 263-324. En: O.L. Lange et al. (ed.) Physiological plantecology. II. Water relations and carbon assimilation. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series. Vol. 12B. Springer-Verlag, New York.
- Bricchi, E. y Degioanni, A. 2006. Sistema suelo: su origen y propiedades fundamentales. (Ed) Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Briske, D. P. and Heischmidt, R. K. 1993. An ecological perspective. En: R. K. Heischmidt y J.W. Stuck (ed.) Grazing Management: An Ecological Perspective. Timber Press Inc. Hong Kong. 14-15
- Brown, H. E., Moot, D. J. y Pollock, K. M. 2005. Herbage production, persistence, nutritive characteristics and water use of perennial forages grown over 6 years on a Wakanui silt loam. New Zealand Journal of Agricultural Research, 48, 423-439
- Brown, H. E., Moot, D. J. y Teixeira, E. I. 2006. Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. European Journal of Agronomy 25: 319-327
- Brown, J. W. and Tanner, C. B. 1983 Alfalfa stem and leaf growth during water stress. Agronomy Journal 75, 799-805
- Brown, L. G.; Jones, J. W.; Hesketh, J. D.; Hartsog, J. D.; Whisler, F. D. and Harris, F. A. 1985. COTCROP: Computer simulation of growth and yield. Information Bull. No. 69. Agric. Forest. Exp. Stn., Mississippi State, MS.
- Brown, R. H.; Pearce, R. B.; Wolf, D. D. and Blaser, R. E. 1972. Energy accumulation and utilization. In Hanson, C.H. (Ed.) Alfalfa Science and Technology, ASA, Madison, WI, USA. p 143-166
- Brummer, E. C. 1999. Capturing heterosis in forage crop cultivar development. Crop Sci, 39:943-954.
- Brun, L. J. and Worcester, B. K. 1975. Soil water extraction by alfalfa. Agron. J. 67: 586-589.
- Bula, R. J. 1972. Morphological characteristics of alfalfa plants grown at several temperatures. Crop Science 12: 683-686.
- Bula, R. J. y Massengale, M. A. 1972 Fisiología del ambiente (capítulo 8). En Ciencia y tecnología de la alfalfa. (Ed). Hemisferio Sur.- Hanson, C. H. 432 pp

- Calamassi, R.; Della Rocca, G.; Falusi, M.; Paolettiinstb, E. y Strati, S. 2001. Resistance to water stress in seedlings of eight European provenances of *Pinus halepensis* Mill. *Annals of Forest Science*, 58: 663-672
- Caviglia, O. P. 2007. Intensificación de la secuencia de cultivos en Entre Ríos: balance de carbono y aprovechamiento de recursos. En Caviglia OP, Paparotti O.F., Sasal MC. 2007. (Eds.). *Agricultura Sustentable en Entre Ríos*. Ediciones INTA. Buenos Aires. p. 149-158.
- Caviglia, O. P. and Andrade, F. H. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *The American Journal of Plant Sciences and Biotechnology* 1
- Cerana, J., Wilson, M.; Pozzolo, O.; De Battista, J. J.; Rivarola, S. y Díaz, E. 2005. Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un vertisol. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. Vol.VII. F.J. Samper Calvete y A. Paz González, 2005. Disponible en: https://abe.ufl.edu/faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v7/c159-163.pdf (consultado en 2017)
- Chiacchiera, S. 2017. Efecto de la profundidad de napa freática y la salinidad sobre la dinámica de crecimiento de Grama Rhodes (*Chloris gayana*). Tesis Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12123/5550> (consultado en enero 2018).
- Cisneros, J. M.; Cantero, J. J. and Cantero Gutiérrez, A. 1999. Vegetation, soil hydrophysical properties, and grazing relationships in saline-sodic soils of Central Argentina. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(3): 399-409.
- Cisneros, J. M.; Degioanni, A.; Cantero, G. A. y Videla Mensegue, H. 2011. Modelos de comportamiento de la napa freática en ambientes afectados por sales. En: Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC 2011. San Miguel de Tucumán, Argentina. p 81.
- Cisneros, J. M.; Scilingo, J. M.; Giayetto, O.; Morla, F. and Jobbágy, E. 2013. Uso del modelo de simulación Aquacrop FAO para estimar el aporte subterráneo de agua al cultivo de soja. En *Actas XXIV Congreso Nacional del Agua*. San Juan
- Collino D. J.; Lopez, A.; Dardanelli, J.; Sereno, R. and Racca R. W. 1997. Effect of soil water availability on water use strategies and dry matter production by two alfalfa cultivars differing in winter dormancy. *Phyton* 61: 45-53.
- Collino, D. J.; Dandanelli, J. L.; De Luca, M. J. and Racca, R. W. 2005. Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.) *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.45, p.383-390
- Collino, D.; Dardanelli, J. L. y De Luca, M. 2007. Uso del agua y la radiación para la producción de forraje. En *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. Basigalup D. (Ed.) *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. E.E.A. Manfredi – INTA. Córdoba, Argentina. pp. 45-65
- Cornacchione, M. V. y Pérez, H. E. 2004. Producción de forraje y stand de plantas de cultivares de alfalfa bajo riego con relación a densidades de siembra. *ALPA* 2002. 10(3):164-170

- Cutforth, H. W.; Jefferson, P. G. and Campbell, C. A. 1991. Lower limit of available water for three plant species grown on a medium-textured soil in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(2): 247- 252. <https://doi.org/10.4141/cjss91-025>
- Dale, R. F. 1995. A weather-soil variable for estimating soil moisture stress and corn yield probabilities. *Agron. J.* 87:1115-1125.
- Dardanelli, J. L.; Bachmeier, O. A.; Sereno, R. y Gil, R. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Research*, 54: 29-38.
- Dardanelli, J. L. and Collino, D. J. 2002. Water table contribution to alfalfa water use in different environments of the Argentine Pampas. *AGRISCIENTIA*, 2002, VOL. XIX: 11-18
- Daubenmire, R. F. 1974. *Plants and environment: a textbook of plant autecology*. John Wiley and Sons, New York.
- Davies, W. J. and Zhang, J. 1991. Root signals and regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 55-76.
- De Battista, J. J. 2004. Manejo de Vertisoles en Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria* 8(1): 37-43.
- De Petre, A. 2000. Descripción y características especiales de los Vertisoles de Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía*, 20 (1): 7-13.
- De Petre, A y Stephan, S. 1998. Características pedológicas y agronómicas de los Vertisoles de Entre Ríos, Argentina. Universidad Nacional de Entre Ríos, 65 pp.
- Degioanni, A. 1998. Organización territorial de la producción agraria en la región de Río Cuarto (Argentina). Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares. España.
- Degioanni, A.; Cisneros, J.; Cantero, A. G. y Videla, H. 2006. Modelo de simulación del balance hídrico en el suelo con freática poco profunda. *SUELO (Argentina)*. 24(1). 0-0: 1-10.
- Del Valle Rivarola, A. 2009. Vulnerabilidad agroclimática a la sequía en la región centro-sur de la provincia de Córdoba. Tesis. Universidad Nacional de Río Cuarto Facultad de Ciencias Económicas Maestría en Desarrollo y Gestión Territorial. Disponible en https://edo.jrc.ec.europa.eu/gisdata/scado/drought/ar/riocuarto/Rivarola_2009.pdf (consultado diciembrenbre 2019)
- Di Nucci de Bedendo, E. y Valentinuz, O. R. 2008. Producción de forraje de alfalfa de diferente grado de reposo con riego suplementario. Paraná, jueves 29 de febrero de 2008. Disponible en: http://inta.gob.ar/documentos/produccion-de-forraje-de-alfalfa-de-diferente-grado-de-reposo-con-riego-suplementario/at_multi_download/file/INTA-Produccion-forraje-de-alfalfa-con-riego-suplementario.pdf. (consultado en diciembre 2018)
- Di Nucci de Bedendo, E.; Valentinuz, O. R.; Firpo, M. V. y Martínez, M. del H. 2009. Análisis de crecimiento de alfalfa en condiciones potenciales. Estación Experimental Agropecuaria Disponible en: Paranáinta.gob.ar/.../analisis-de-crecimiento-de-alfalfa-en-condiciones-potencial (consultado en febrero 2014).
- Di Nucci de Bedendo, E. 2011. Producción de forraje y persistencia de cultivares de alfalfa de diferente grado de reposo invernal en suelos molisoles de Entre Ríos (ciclos 2006 a 2010).

- Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_alfalfa_serie_2010-_en_suelos_molisoles_entre_r.pdf (consultado en septiembre 2014).
- Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; Gonzalez, L.; Tablada, M. y Robledo, C. W. 2009. InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar> (versión libre)
- Díaz Ambrona, C. G.; Martínez Valderrama y Calvete Sogo, H. 2011. Modelo para la simulación dinámica del crecimiento y desarrollo de los pastos. Pastos Vol 41. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/273458583_Modelode simulación](https://www.researchgate.net/publication/273458583_Modelode_simulaci3n) (consultado en febrero 2019)
- Díaz-Zorita, M. 2008. Fertilización de pasturas mixtas templadas, p. 332-345. En Melgar, R. y M. Díaz-Zorita (eds.), Fertilización de Cultivos y Pasturas. 2da. ed. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.
- Dobrenz, A. K.; Schonhorst M. H. and Thompson, R. K. 1969. Yield and protein production of alfalfa cultivars. Prog. Agr. Arizona. 21(3): 4-5
- Donovan, T. J. and Meek, B. D. 1983. Response of Alfalfa to different levels of Irrigation. Disponible en <https://alfalfa.ucdavis.edu/+symposium/proceedings/1984/84-70.Pdf> (consultado en febrero 2019)
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 179 p.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1977. Guidelines for prediction crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, n° 24, 144-156
- Doorenbos, J. and Kassan, A. H. 1979. Yield response to wáter. FAO Irrigation and drainage. Paper N° 33 Roma (Italia) Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e02.pdf> (consultado en febrero 2019)
- Downey, L. A. 1972. Water yield relations for non-forage crops. J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng. Vol. 98, Issue 1: 107-115
- Druille, M., Deregibus V. and Garbulsky, M. F. 2017. Environmental controls of lucerne (*Medicago sativa* L.) growth across a climatic and edaphic gradient. AGRISCIENTIA, 2017, VOL. 34 (II): 13-23
- Durand, J. L.; Varlet-Grancher, C.; Lemaire, G.; Gastal, F. and Moulia, B. 1991. Carbon partitioning in forage crops. Acta Biotheoritica 39: 213– 224
- Elliot, F.C.; Jonhson, I. J. and Schonhorst, M. H. 1972. Breeding for forage yield and quality. In Hanson C.H. (Ed). 319-333
- Evans, L.T. 1993. Crop evolution, adaptation and yield. (ed). Cambridge University Press, New York. 486 p
- Farahani, H. J.; Izzi, G. and Oweis, T. Y. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. Agronomy Journal, 101(3): 469-476
- Farooq, M.; Wahid, A.; Kobayashi, N.; Fujita, D. and Basra, S. M. A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agron. Sustain. Dev. 29: 185-212.

Fereres, E. y C. Stubber. 1993. Improving Water Quality and Use-Discussion. In: International Crop Science I. D. R. Buxton; R. Shibles; R. A. Forsberg; B. L. Blad; K. H. Asay; G. M. Paulsen; and R. F. Wilson (Eds). Crop Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, USA.

Fontanini, P. G.; Cerana, J. A. y Duarte, O. 2003. Conductividad hidráulica saturada en suelos vertisoles y entisoles. *Revista Científica Agropecuaria* 7(1): 75-79

French, B. K. and Legg, B. J. 1979. Rothamsted irrigation 1964–76. *Journal of Agricultural Science, U.K.* 92, 15 – 37. Disponible en <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/> (consultado marzo 2018).

Fox, C.; Berberet, R.; Gray, F.; Grau, C.; Jessen, D. and Peterson, M. 1998. (eds) *Standard Tests to Characterize Alfalfa Cultivars* (3rd edition). North American Alfalfa Improvement Conference. Agronomic Test, p. A-1.

García Vila, M.; E. Fereres, E.; Mateos, L.; Orgaz, F. and P. Steduto. 2009. Deficit Irrigation Optimization of Cotton with AquaCrop. *Agron. J.* 2009 101: 477-487.

García-Vila, M. and Fereres, E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron.* 36:21-31

Garnero, G. y Quiroga, a. 2003. Caracterización de ambientes para el cultivo de soja y la influencia de la napa de agua. En cultivos de cosecha gruesa. *Bol. Div. Tec. No. 77. EEA INTA Anguil. Argentina.*

Garrett, K. A.; Dendy, S. P.; Frank, E. E.; Rouse, M. N. and Travers, S. E. 2006. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annu Rev Phytopathol*, 44:489-509.

Garza, R.; Barnes, R. F.; Mott, G. O. and Rhykerd, C. L. 1965. Influence of light intensity, temperature and growing period on the growth, chemical composition and digestibility of culver and tanverde alfalfa seedling. *Agron. J.* 57:417-420

Geerts, S.; Raes, D.; Garcia, M.; Miranda, R.; Cusicanqui, J. A.; Taboada, C.; Mendoza, J.; Huanca, R.; Mamani, A.; Condori, O. y Mamani, J. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agron. J.* 101:499-508.

Geerts, S.; Raes, D. and Garcia, M. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agric. Water Manage.* 98:213-6.

Génova, L. J.; Marassi, J. E.; Etcheverry, M. y Chale, W. 1998. Optimización de la operación de riego complementario de cultivos extensivos en el Norte de Buenos Aires. En *Avances en el manejo del suelo y agua en la Ingeniería Rural Latinoamericana. 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. 2011. Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* (2011) Vol 110 (2): 63-81

GEO INTA. 2015. INTA. Visor GeoINTA. Disponible en http://geointa.inta.gov.ar/visor/?p=model_suelos (consultado en enero 2018)

Głąb, T. 2011. Effect of Soil Compaction on Root System Morphology and Productivity of Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 20, No. 6 (2011): 1473-1480

- González-Robaina, F.; López-Vargas, D.; Cisneros-Zayas, E. 2019. Calibración y análisis de sensibilidad del modelo *Aquacrop* para frijol en suelo Ferralítico Rojo Compactado. Revista Ingeniería Agrícola, vol. 9, núm. 4. Disponible en <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5862/586262756001/html/index.html> (consultado en enero 2020)
- Gosse, G.; Chartier, M. and Lemaire, G., 1984. Predictive model for a lucerne crop. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, III Sciences de la Vie 298 (18): 541–544.
- Gosse, G.; Varlet-Grancher, C.; Bonhomme, R.; Chartier, M.; Allirand, J. M. and Lemaire, G. 1986. Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. Agronomie. 6: 47-56.
- Graham, J. H.; Kreitlow, K. W. and Faulkner, L. R. 1972. Diseases. In Alfalfa science and technology, c. H. Hanson (ed.). Agronomy 15:497-526.
- Graham, J. H.; Stuteville, D.; Frosheiser, F. J. and Erwin, D. V. 1979. A compendium of alfalfa diseases. The American Phytopathological Society. St. Paul, Minnesota. U.S.A. 65 pp.
- Gramshaw, D.; Langdon, P. W.; Lowe, K. F. and Lloyd, D. L. 1985. Performance of North American and Australian lucernes in the Queensland subtropics. 1. Field reaction to important root and crown diseases. Australian Journal of Experimental Agriculture 25. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/240507357_Performance_of_North_American_and_Australian_lucernes_in_the_Queensland_subtropics_1_Field_reaction_to_important_root_and_crown_disease (consultado enero 2017)
- Gregory, P. J. 2006. Plant Roots: Growth, Activity and Interaction with Soils. Blackwell Publishing, Oxford, 308p.
- Gregory, P. J.; Bengough, A. G.; Grinev, D.; Schmidt, S.; Thomas, W. B. T.; Wojciechowski, T. and Young, I. M. 2009. Root phenomics of crops: opportunities and challenges. Funct. Plant Biol. 36: 922-929.
- Grimes, D. W.; Wiley, P. L. and Sheesley, W. R. 1992. Alfalfa Yield and Plant Water Relations with Variable Irrigation. Crop Science 32: 1381-1387.
- Grismer, M. E. 2001. Regional alfalfa yield, ETc, and water value in Western States. J. Irrig. Drain. Eng. 127: 131-139.
- Guendouz, A.; Hafsi, M.; Moumeni, L.; Khebbat, Z. and Achiri, A. 2014. Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria, International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 3(2): 168–176
- Guitjens, J. C. 1990. Alfalfa. pp. 537-568. En: B. A. Stewart and D. R. Nilsen (eds.). Irrigation of agricultural crops. Agronomy 30. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Guitjens, J. C. 1993. Alfalfa irrigation during drought. J. Irrig. Drain. Eng. 119: 1092-1098.
- Guzmán, C.; Spada, M. C. y Mombelli, J. C. 2007. Eficiencia del uso de la radiación de cultivos de alfalfa de distinto grado de reposo en Córdoba, Argentina. En: APPA; ALPA (Cusco, Perú). Sitio Argentino de Producción Animal. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/83-Guzman-radiacion.pdf (consultado marzo 2017).

- Gvozdenovich, J.; Paparotti, O. y Barbagelata P. 2010. Relación entre el agua almacenada a la siembra y el rendimiento del cultivo de trigo en diferentes suelos de la provincia de Entre Ríos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Disponible en <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-relacion-entre-agua-almacenada-a-la-siembra-y-re.pdf> (consultado en marzo de 2019).
- Hainaut, P.; Remacle, T.; Decamps, C.; Lambert, R. and Sadok, W. 2016. Higher forage yields under temperate drought explained by lower transpiration rates under increasing evaporative demand (Article). *European Journal of Agronomy* Volume 72, January 01, 2016: 91-98
- Hamblin, A.; D. Tennant, D. and Perry, M. 1987. Management of soil water in Western Australia. *Soil Use and Management*. Vol 3 N° 2: 63-69.
- Hämmerly, R. del C. 2001. Modelación de la evapotranspiración Con Métodos De Balance De Agua. Tesis de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Disponible en <http://Hdl.Handle.Net/11185/262> (consultado febrero 2019).
- Hanks, R. J.; Sullivan, T. E. and Hunsaker, V. E. 1977. Corn and alfalfa production as influenced by irrigation and salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:606–610. Disponible en doi:10.2136/sssaj1977.03615995004100030036x (consultado en marzo 2018)
- Hearn, A. B. and Constable, G.A. 1984. Irrigation for crops in a sub-humid environment. VII Evaluation of irrigation strategies for cotton. *Irrig. Sci.* 5:75–94.
- Heichel, G. H.; Delaneg, R. H. and Cralle, H. T. 1988. Carbono asimilation, partition an utilization. En: Hanson, A.A., Barnes, D.K y Hill, R.R. (ed) *Alfalfa an alfalfa improvement*. *Agronomy Monograph* N° 29, CSSA/SSSA, Madison,Wi,(6), p 196-227.
- Heng, L. K., T. Hsiao, S. Evett, T. Howell, and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agron. J.* 101(3): 488-498
- Henry, L.; Harron, B. and Flaten, D. 1987. The nature and management of salt-affected land in Saskatchewan. *Saskatchewan Agriculture*, Agdex 518. Disponible en http://agris.fao.org/agris-search/search.do?request_locale=es&recordID=US201300632916 (consultado enero 2017).
- Heredia, O.S. 2000. Aptitud de algunos suelos vérticos para uso bajo riego complementario. *Rev. Facultad de Agronomía* 20 (1): 91-97.
- Hijano, E. H. y Basigalup, D. H. 1995. El cultivo de la alfalfa en la República Argentina. En *La alfalfa en Argentina*. Editores: Hijano-Navarro. Subprograma Alfalfa INTA C. R. Cuyo-Marzo 1994
- Hsiao, T. C.; Heng, L.; Steduto, P.; Rojas-Lara, B.; Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for alfalfa. *Agronomy Journal*, vol. 101 (3): 448-459. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300060039x> (consultado marzo 2019)
- Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Steduto, P. and Raes, D. 2012. AquaCrop parameterization, calibration, and validation guide. In: Steduto P, Hsiao TC, Fereres E and Raes D (eds) *Crop Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. FAO, Rome. 70-87.
- Iriondo, M. 2010. Geología del Cuaternario en Argentina. *Moglia, Corrientes*, 437 pp. Disponible en http://www.museoameghino.gob.ar/archivos/repositorios/138_descarga_95_version_digital_d_el_libro_geologia_del_cuaternario_en_argentina.pdf (consultado enero 2018).

- Irwin, J. A. G.; Lloyd, D. L.; Lowe, K. F. 2001. Lucerne biology and improvement - an analysis of past activities and future goals in Australia. *Aust J Agric Res* 52:699–712
- Jacovides, C. P. and Kontoyiannis, H., 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models, *Agricultural Water Management*, Elsevier, vol. 27(3-4): 365-371.
- Jiang D, Yue H, Wollenweber B. Tan, W.; Holly, M.; Bo, Y.; Dai, T.; Jing, Q. and Cao, W. 2009. Effects of post-anthesis drought and waterlogging on accumulation of high-molecular-weight glutenin subunits and glutenin macropolymers content in wheat grain. *J Agron Crop Sci* 195: 89–97
- Jobbágy, E. G. and Jackson, R. B. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology* 10, 1299–1312.
- Jobbágy, E. G., Aragón, R. y Noretto, M. D. 2007. Los cultivos y la napa freática en la llanura pampeana. *Agromercado*. N° 268 agosto 2007. Pp. 810.
- Jobbágy, E. G.; Noretto, M. D.; Santoni, C. y Baldi, G. 2008. El desafío eco-hidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la Llanura Chaco-pampeana. *Ecología Austral* 18: 305-322.
- Jobbágy, E. G. y Noretto, M. D. 2009. Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. XVII Congreso AAPRESID. 151-155.
- Jones, J.; Hoogenboom, G.; Porter, C.; Boote, K. J.; Batchelor, W.; Hunt, L.A; Wilkens, P. W.; Singh, U.; Gijsman, A. J. and Ritchie, J. 2003. DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18(3-4):235-265 ·
- Jun, L.; Bin, J. and Wei, H. 2009. Characteristics of deep soil desiccation on rainfed grain croplands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China. *Journal of Natural Resources* 24(12): 2124–2134.
- Jung, G. A. y Larson, K. L. 1972. Tolerancia al frío, a la sequía y al calor. Cap IX. p. 238-266. En: *Ciencia y Tecnología de la alfalfa Tomo I*. (Ed) Hanson. Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur SRL. 432 p
- Keating, B. A.; Gaydon, D.; Huth, N.; Probert, M. E.; Verburg, K.; Smith, C. and Bond, W. 2002. Use of modelling to explore the water balance of dryland farming systems in the Murray-Darling Basin, Australia. *European Journal of Agronomy* 18:159-169.
- Khaiti, M. and Lemaire, G., 1992. Dynamics of shoot and root growth of lucerne after seeding and after cutting. *Eur. J. Agron.* 1 (4): 241–247.
- Kholova, J.; Hash, Jr. C.; Kočová, M. and Vadez, V. 2011. Does a terminal drought tolerance QTL contribute to differences in ROS scavenging enzymes and photosynthetic pigments in pearl millet exposed to drought?. *Environmental and Experimental Botany* 71(1):100–106
- Kisselbach, T. A.; Russel, J. C. and Anderson, A. 1929. The significance of subsoil moisture in alfalfa production. *J. Am. Soc. Agron.* 21: 241-268.
- Kocheva, K. and Georgiev, G. 2003. Evaluation of the reaction of two contrasting barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in response to osmotic stress with PEG 6000. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, v.49: 290-294.

- Kovda, V.A. 1973. Quality of irrigation water. Soluble components in irrigation water. pp. 177-205. In: Irrigation, drainage and salinity. Food and Agricultural Organization/UNESCO. Hutchinson Publishers. London, UK.
- Krause, P., Boyle, D. P. and Båse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5: 89-97.
- Kruse, E. y Zimmermann, E. 2002 Hidrogeología de Grandes Llanuras. Particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina). Workshop. Groundwater and Human Development. XXXII IAH Congress. Publicación Workshop: Hidrogeología de Grandes Llanuras: 2025-2038.
- Larcher, W. 1980. Physiological plant ecology. (ed) W. Larcher, Berlin: Springer (hardback). 513 pp.
- Li, R.; Volenec, J. J.; Joern, B. C. and Cunningham, S. M. 1996. Seasonal changes in nonstructural carbohydrates, protein, and macronutrients in roots of alfalfa, red clover, sweet clover, and birdsfoot trefoil. *Crop Sci.* 36 (3): 617-623.
- Lindenmayer, R. B.; Hansen, N. C.; Brummer, J. and Pritchett, J. G. 2011. Deficit irrigation of alfalfa for water-savings in the Great Plains and Intermountain West: a review and analysis of the literature. *Agron. J.* 103:45-50.
- Loague, K. and Green, R.E. 1991. Statistical and Graphical Methods for Evaluating Solute Transport Models: Overview and Application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7: 51-73.
- Lobell, D.; Cassman, K. and Field, C. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes and causes. . *Annual Review of Environment and Resources*, 34:4.1-4.26
- Loomis, R. S. and Wallinga, J. 1991. Alfalfa: Efficient or inefficient user of water. pp 63-69. In Proc. 21st Alfalfa Symposium, Sacramento, CA. Department of Agronomy and Range Science, University of California, Davis, CA. 9-10 December, 1991.
- Loomis, R. S. and Connor, D. J. 1992. Crop ecology: productivity and management in agricultural systems. Cambridge University Press, London, UK.
- López, A.; Dardanelli, J. L.; Collino, D. J.; Sereno, R. y Racca, R.W. 1997. Efecto del grado de reposo invernal sobre la producción, consumo y eficiencia en el uso del agua en alfalfa cultivada bajo riego RIA 28(2): 41-48.
- Lovera, E. F.; Alvarez, C.; Severina, I. y Crosetti, D. A. 2012. Información meteorológica mensual de la EEA Manfredi. Recuperado el 6 de julio de 2016, de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria: <http://inta.gob.ar/documentos/informacion-meteorologica-mensual-de-la-eea-manfredi> (consultado en enero de 2019).
- Lowe, C. C.; Marble, V. L. and Rumbaugh, M. D. 1972. Adaptation, Varieties, and Usage. En *Alfalfa Science and Technology*, editado por C. H. Hanson. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin. U.S.A.: 397-414.
- Lowe, K. F.; Bowdler, T.M.; Gramshaw, D.; Clem, R. L. and Collyer, B. G. 1987. Yield, persistence and field disease assessment of lucerne cultivars and lines under irrigation in the Queensland subtropics. *Tropical Grasslands*, 21(4):168-181.
- Lucey, R. E. and Tesar, M. B. 1965. Frequency and rate of irrigation as factors in forage growth and water absorption. *Agronomy Journal* 57: 519-23
- Maas, E. V. and Hoffman, G. J. 1977. Crop salt tolerance: Current assessment. *J. Irrig. Drain. E-ASCE* 103: 115-134.

- Magrin, G. O.; Travasso, M. I. and Rodríguez, G. R. 2005. Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change* 72:229-249.
- Martín, B.; Coronel, A. y Sacido, M. 2019. Análisis del comportamiento de cultivares comerciales de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la región pampeana húmeda-subhúmeda de argentina. Congreso de la Asoc. Argentina de Producción Animal – RAPA Vol. xy, Supl. 1
- Martiniello, P. and Texeira da Silva, J. A. 2011, Physiological and bioagronomical aspect involved in growth and yield components of cultivated forage species in Mediterranean environments: A review. *Eur J Plant Sci Biot* 2011. 5 (2):64-98.
- Mattera, J. 2004. Efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre los componentes del rendimiento de forraje y el uso de la radiación en el cultivo de alfalfa. Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Producción Vegetal. Disponible en <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2011matterajuan.pdf> (consultado en febrero 2019).
- Mattera, J. 2011. Efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre los componentes del rendimiento de forraje y el uso de la radiación en el cultivo de alfalfa. Disponible en <http://ri.agro.uba.ar/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=2011.matterajuan> (consultado en febrero 2019).
- Mattera, J.; Romero, L.; Cuatrin, A. y Grimoldi, A. A. 2009. Efectos de la distancia de siembra sobre la producción de biomasa y la persistencia de un cultivo de alfalfa. *Revista Argentina de Producción Animal*, Vol 29, No 2 (2009)
- MC Call, D.G.; Bishop-Hurley, G.J. 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agr Syst.* 76: 1183–1205.
- Mebane, V. J.; Day, R. L.; Hamlett, J. M.; Watson, J. E. and Roth, G. W. 2013. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed Maize in Pennsylvania. *Agron J.* 105:419-427.
- 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*, nº 43 (2007) pp. 63-84.
- Meuriot, F.; Avice, J. C.; Simon, J. C.; Laine, P.; Decau, M. L. and Ourry, A. 2004. Influence of Initial Organic N Reserves and Residual Leaf Area on Growth, N Uptake, N Partitioning and N Storage in Alfalfa (*Medicago sativa*) during Post-cutting Regrowth. *Annals of Botany* 94: 311–321.
- Micucci, F. G.; Taboada, M. A. y Gil, R. 2002. El Agua en la Producción de Cultivos extensivos: I. El suelo como un gran reservorio. *Archivo Agronómico* Nº 6, Informaciones Agronómicas del Cono Sur Nº 15. INPOFOS Cono Sur, Argentina.
- Monteith, J. L. 1977. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Biological Sciences* 281: 277-294.
- Monteith, J. L. 1986. How do crops manipulate water supply and demand? *Phil. Trans.R. Soc. London, Serie A.* 316:245-259.
- Montoya Sevilla, F. 2013. Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral disponible en <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/3815>. (consultado abril 2018).

- Montoya, F.; Camargo, D.; Ortega, J. F.; Córcoles, J. I. and Domínguez, A. 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions, *Agricultural Water Management*, 164, Part 2: 267-280.
- Moot, D. J.; Brown, H. E.; Pollock, K. and Mills, A. 2008. Yield and water use of temperate pastures in summer dry environments. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 70: 51-57.
- Moot, D. J.; Teixeira, E. I. and Brown, H. E. 2012. Alfalfa. In: P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres and D. Raes (eds). *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 212-219.
- Moreno, L. P. 2009. Plant responses to water deficit stress. A review. *Agronomía Colombiana* 27 (2), 179-191. Disponible en file:///D:/TESIS/Datos%20climaticos/estres%20conceptos%20especies%20resistencias.pdf (consultado en octubre de 2018).
- Morasi, D. N.; Arnold, J. G.; Liew, M. W. V.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D. and Veith, T. L. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
- Mueller, L.; Behrendt, A.; Schalitz, G. and Schindler, U. 2005. Above ground biomass and water use efficiency of crops at shallow water tables in a temperate climate. *Agric. Water Manage.* 75: 117-136.
- Murata, N.; Nishiyama, Y. and Allakhverdiev, S. I. 2007. Photoinhibition of photosystem II under environmental stress. *Biochimica et Biophysica Acta* 1767:414-421.
- Murata, N.; Nishimura, M. and Takamiya, A. 1966. Fluorescence of chlorophyll in photosynthetic systems. II. Induction of fluorescence in isolated spinach chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta*, 120 (1966), pp. 23-33.
- Muslera Pardo, E. y Ratera García C. 1991. *Praderas y forrajes: producción y aprovechamiento*. (Ed). Mundi-Prensa. 674 p
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. 1970. Pronóstico del flujo del río a través del modelo conceptual. Parte 1: Una discusión de principios. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. Disponible en [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6) (consultado en enero 2018)
- Newman, E. I. 1974. Root and soil water relations. In *The Plant Root and Its Environment*. (ed) E W Carson pp 363–440. University Press of Virginia. Charlottesville.
- Noquet, C.; Meuriot, F.; Caillot, S.; Avice, J. C.; Ourry, A.; Cunningham, S. and Volenec, J. 2003. Short-day photoperiod induces changes in N uptake, N partitioning and accumulation of vegetative storage proteins in two *Medicago sativa* cultivars. *Functional Plant Biology*. 30 (8). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/248887509_Short-day_photoperiod_induces_changes_in_N_uptake_N_partitioning_and_accumulation_of_vegetative_storage_proteins_in_two_Medicago_sativa_cultivars (consultado en marzo 2019)
- Nosetto, M. D.; Jobbágy, E. G.; Jackson, R. B. and Sznaider, G. A. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113 (2009) 138–148
- Nosetto, M. D.; Paez, R. A.; Ballesteros, S. I. and Jobbágy, E. G. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 206: 60–70.

- Novelli, L.; Caviglia, O.; Wilson, M.; Sasal, C. y Gabboud, E. 2010. Efecto de la inclusión frecuente de soja sobre el almacenaje de C y la estabilidad estructural en un suelo Molisol y un Vertisol de Entre Ríos. Jornada; Actualización Técnica Agricultura Sustentable 2010. Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA.
- Nyamudeza, P.; Hussein, J. and Matibiri, B. 2001. Vertisols Management in Zimbabwe. (p. 139-153). In: J. Syes, F. Penning de Vries, P. Nyamedeza. The Sustainable Management of Vertisols. CABI Publishing, U.K.
- Odorizzi, A. S. 2015. Parámetros genéticos, rendimiento y calidad forrajera en alfalfas (*Medicago sativa* L.) extremadamente sin reposo con carácter multifoliolado obtenidas por selección fenotípica recurrente. Tesis Doctoral en Ciencias Agropecuarias. Córdoba. http://inta.gob.ar/sites/default/files/tesis_doctoral_ariel_odorizzi.pdf (consultada en febrero de 2019).
- Olivera, N. T.; Manrique, O. B.; Masjuan, Y. G. and Guerrero Alega, A. M. 2016. Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 25, No.3: 23-30.
- Paknejad, F.; Nasri, M.; Hamid, M.; Hossein, Z. and Majid, A. 2007. Effects of Drought Stress on Chlorophyll Fluorescence Parameters, Chlorophyll Content and Grain Yield of Wheat Cultivars. Journal of Biological Sciences 7(6): 841-847.
- Palmer, W. C. 1965. Meteorological drought. Research Paper N°45. US. Department of Commerce Weather Bureau, Washington DC, 58 pp.
- Pandey, P.; Irulappan, V.; Bagavathiannan, M. V. and Senthil-Kumar, M. 2017. Impact of combined abiotic and biotic stresses on plant growth and avenues for crop improvement by exploiting physio-morphological traits. Front. Plant. Sci. 8: 537. Disponible en <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00537/full> (consultado en enero 2019)
- Pannell, D. J. and Ewing, M. A. 2006. Managing secondary dryland salinity: options and challenges. Agricultural Water Management 80:41-56.
- Parson, A. J. and Penning, P. D. 1988. The effect of the duration of regrowth on photosynthesis, leaf death and the average rate of growth in a rotationally grazed sward. Grass Forage Sci. 43:15-27.
- Pascale, C.; Heredia, O. S. y Giuffré, L. 1999. Niveles de fósforo en suelos con características vérticas del norte de Entre Ríos. Primer Simposio sobre suelos vertisólicos. Resúmenes. Oro Verde. Entre Ríos Octubre 1999. pp 16-17.
- Passadore, L. y Wendler, G., 2011. Calibración de sensores de humedad del suelo y estimación de almacenaje diario de agua en el suelo en sitios con estaciones meteorológicas instaladas de la provincia de Entre Ríos. Trabajo final de graduación, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos.
- Pece, M. A. 2000. Tasa de acumulación de la biomasa aérea en dos cultivares de alfalfa (*Medicago sativa* L.) Tesis Magister Scientiae, UNMDP. p. 108.
- Pembleton, K. G.; Rawnsley, R.P.; Donaghy, D. J. and Volenec, J. J. 2009. Water deficit alters canopy structure but not photosynthesis during the regrowth of alfalfa. Crop Science 49, 722-731.

- Poorter, D. O.; Gouda, P.; Marek, T.; Howell, T.; Moorhead, J. and Irmak, S. 2012. Sensitivity of Grass- and –Alfalfa Reference Evapotranspiration to Weather Station Sensor Accuracy. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/266055977_Sensitivity_of_Grass_and_-Alfalfa_Reference_Evapotranspiration_to_Weather_Station_Sensor_Accuracy/citation/download (consultado enero 2019).
- Porta-Casanellas, J.; López-Acevedo, M. y Roquero-de Laburu, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2da. edición. Mundi-Prensa. Bilbao, España.
- Qiao, X.; Farahani, H. J. and Khalilian, A. 2012. Water Productivity of Cotton in the Humid Southeast FAO AquaCrop Modeling. Disponible en: <https://www.irrigation.org/IA/FileUploads/IA/Resources/TechnicalPapers/2012/WaterProductivityOfCottonInTheHumidSoutheast-FAOAquacropModeling.pdf>. (consultado en febrero de 2018).
- Quiroga, A.; Buschiazzi, D. and Peinemann, N. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semi-arid Argentinian pampas. *Soil Sci* 161:104-108
- Quiroga Garza, H. M. 2013. Tasa de acumulación de materia seca de alfalfa en respuesta a variables climatológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 4, núm. 4, mayo-junio, 2013: 503-516
- Racca, R.; Collino, D.; Dardanelli, J., Basigalup, D.; González, N.; Brenzoni, E.; Hein, N. y Balzarini, M. 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de alfalfa en la región pampeana. Ediciones INTA. 56 p.
- Raes, D.; Geerts, S.; Kipkorir, E.; Wellens, J. and, Sahli, A. 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agric. Water Manage.* 81:335 – 357.
- 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 *Agron. Agronomy Journal*, vol. 101, No. 3. Software Description”. *Agronomy Journal*, vol. 101, No. 3: 438-447.
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T. and Fereres, E. 2011. AquaCrop: Reference Manual. FAO, Rome, Italy. 218 p. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html> (Consultado en septiembre 2017).
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2012. Reference Manual AquaCrop (Version 4.0). AquaCrop Website Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html> (consultado en marzo de 2018)
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2017. AquaCrop version 6.0 reference manual. Rome: FAO, 2017. Disponible en <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/> (consultado en marzo de 2018)
- Reynaud, B.; Delatte, H.; Peterschmitt, M. and Fargette, D. 2009. Effects of temperature increase on the epidemiology of three major vector-borne viruses. *European Journal of Plant Pathology* 123:269-280
- Retta A. and Hanks, R. J. 1980. Corn and alfalfa production as influenced by limited irrigation. *Irrig. Sci.* (1): 135-147.

- Ritchie, J. and Otter, S. 1985. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. USDA-ARS, ARS-38
- Robertson, M.J., Carberry, P.S., Huth, N.I., Turpin, J.E., Probert, M.E., Poulton, P.L., Bell, M., Wright, G.C., Yeates, S.J., and Brinsmead, R.B. 2002. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(4):429-446.
- Rocca da Cunha, G.; Faleiro de Paula, J. R.; Bergamaschi, H.; De Saibo, J. C. y Berlato, M. A. 1994. Evapotranspiração e eficiencia no uso da água em alfalfa. *Rev. Bras. Agrometeorol.* Vol. 2: 23-27
- Rodríguez, A. R.; Llovo, R. J.; Cañadell, J. C. y Avaltroni, J. C. 1981. El Balance Idrológico Normal de Manfredi. Córdoba, Argentina. *REV. CS. AGROPEC.* II: 93-105
- Romero, F.; Van Horn, H. H.; Prine, G. M.; French, E. C., 1987. Effect of cutting interval upon yield, composition and digestibility of "Florida 77" alfalfa and "Florigraze" rhizoma peanut. *J. Anim. Sci.*, 65 (3): 787-796
- Romero, L. 2011. La densidad de siembra y la productividad de la alfalfa. EEA Anguil. <http://www.todoagro.com.ar/noticias/nota.asp?nid=18382>. (consultado en diciembre 2018).
- Rossanigo, R. O. 1997a. Alfalfa. En: Invernada bovina en zonas mixtas. Claves para una actividad más rentable y eficiente. (Ed.) Néstor J. Latimori y Andrés M. Kloster. Agro 2 de Córdoba. INTA Centro Regional Córdoba, 5-36.
- Rossanigo, R. O. 1997b. Alfalfa: Panorama varietal, control de malezas, utilización y manejo. Invernada Bovina en zonas mixtas. Agro 2 Córdoba. Capítulo I: 6-36. INTA EEA Marcos Juárez.
- Rossanigo, R. O. y Meneghetti, F. D. 1991. Alfalfa. INTA-E.E.A. Marcos Juárez (Argentina). pp. 3-11.
- Rossanigo, R.; Spada, M. C. y Bruno, O. 1995. Cultivares de alfalfa, grados de reposo y panorama varietal. Subprograma Alfalfa, La alfalfa en la Argentina, Editar. San Juan. 65-75. Disponible en: www.produccion-animal.com.ar / www.produccionbovina.com (consultado en octubre 2014).
- Ruiz, P.V.; Sifuentes, I.E.; Ojeda, B.W.; Macias, C.J.: "Adecuación de fechas de siembra por variabilidad climática en frijol (*phaseolus vulgaris*) mediante AQUACROP-FAO, en Sinaloa", En: *IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII Aguascalientes*, Aguascalientes, México, 2018.
- Saeed, I. A. M. and El-Nadi, A. H. 1997. Irrigation effects on the growth, yield and water use efficiency of alfalfa. *Irrigation Science*, New York, v.17: 63-68
- Salazar-Moreno, R.; Rojano-Aguilar, A. y López-Cruz, I. L. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. V, núm. 2, marzo-abril de 2014, pp. 177-183
- Salemi, H.; Soom, M. A. M.; Lee, T. S.; Mousavi, S. F.; Ganji, A. and Yusoff, M.K. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region, *African Journal of Agricultural Research*, 610: 2204-2215

Santamaría, S. M.; Studdert, G. A.Y Echeverría, H. E. 2004. Sistemas De Labranza Y Fertilización nitrogenada en trigo bajo distintas historias agrícolas. RIA, 33 (3): 55-75

Sapino, V.; Petrabissi, H. y Franco, L. G. 2019. Boletín Agrometeorológico Mensual INTA Rafaela. Disponible en <https://inta.gob.ar/documentos/boletin-agrometeorologico-mensual-inta-rafaela> (consultado en febrero 2019).

Sardiña, C.; Diez, M.; Ottaviano, C. y Berone, G. 2015 b. Producción de materia seca y dinámica de raíces en alfalfa (*Medicago Sativa* L.). Memoria Técnica INTA 2014-2015. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_mt2015_sardinia_produccion_ms.pdf (consultado en febrero de 2019).

Sasal, M. C.; Andriulo, A. E. and Taboada, M. A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18

Schneider, G.; Comerón, E. y Romero, L. 2001. El rendimiento y la eficiencia de uso de la secuencia de cultivos forrajeros sobre la productividad física y económica del tambo en Argentina. Anuario 2001. Economía. INTA. Disponible en http://rafaela.inta.gov.ar/anuario2001/a2001_165.htm (consultado en marzo de 2018)

Scilingo, M. 2013 Respuesta de soja y maní a la profundidad de la napa freática en ambientes medanosos del centro oeste de la República Argentina. Tesis de Maestría. FAV – UNRC. Disponible en https://www.academia.edu/11932136/Respuesta_de_soja_y_man%C3%AD_a_la_profundidad_de_la_napa_fre%C3%A1tica_en_ambientes_medanosos_del_centro-Rep%C3%A1blica_Argentina (consultado junio 2019)

SENASA, 2019. Disponible en: https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/catalogo-nacional-cultivares-registrados-rnc-rnpc/archivo/38735bc0-c807-41d3-9834-0d6f6555225d?view_id=960dc0c4-e759-4217-80ac-a7202f80bce9 (consultado en agosto de 2018)

Serio, L. y Vich, H. 2010. Algunas características e impactos de las sequías que afectaron a la Región Pampeana entre 2007 y 2009. *Rev. Facultad De Agronomía Uba*, 30(3): 187-195

Severina, I. 2011. Capacidad de uso del agua del subsuelo y productividad de dos genotipos de maní. Efecto de la disponibilidad hídrica sub superficial y la oferta fotothermal. Tesis de Magister. Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires. Disponible en

[//ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2011severinaignacio.pdf](http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2011severinaignacio.pdf) (consultado junio 2019).

Severina, A. y Salinas, I. 2012. Riego suplementario: La funcionalidad de los sistemas radicales y del agua almacenada en el subsuelo, para la optimización del uso de balance hídrico. 3º Reunión internacional de riego. Manfredi (Córdoba, Argentina), los días 30 y 31 de Octubre del 2012. <https://inta.gob.ar/documentos/riego-suplementario-la-funcionalidad-de-los-sistemas-radicales-y-del-agua-almacenada-en-el-subsuelo-para-la-optimizacion-del-uso-de-balance-hidrico> (consultado en junio 2018)

Sevilla, G. 2004. Manejo del pastoreo en alfalfa; acumulación y eficiencia de cosecha del forraje. *Revista Argentina de Producción Animal* 24(1): 19

Sharratt, B. S.; Baker, D. G. and Sheaffer, C. C. 1986. Climatic effect on alfalfa dry matter production. Part I. Spring harvest. *Agric. Forest Meteorol.* (37):123-131.

Sharratt, B. S.; Baker, D. G. and Sheaffer, C. C. 1987. Climatic effect on alfalfa dry matter production. Part II. Summer harvest. *Agric. Forest Meteorol.* (39):121-129.

Sharratt, B. S.; Sheaffer, C. C. and Baker, D. G. 1989. Base Temperature for the Application of the Growing-Degree-Day Model to Field-Grown Alfalfa. *Field Crops Research*, 21 (1989: 95 – 102.

Sheaffer, C. C.; Lacefield, G. D. and Marble, V. L. 1988. Cutting schedules and stands. In: A. A. Hanson, D. K. Barnes and R. R. Hill, Jr. (eds.) *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. ASA/CSSA/SSSA, Agronomy Monograph 29. Madison, Wisconsin, USA pp. 412-430.

Sinha, R.; Irulappan, V.; Mohan-Raju, B.; Suganthi, A. and Senthil-Kumar, M. 2019. Impact of drought stress on simultaneously occurring pathogen infection in field-grown chickpea. *Scientific reports*, 9(1), 5577. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41463-z> (consultado en febrero de 2019).

Sinskaya, E. N. 1950. Flora of cultivated plants of the U.S.S. R. XIII Perennial Leguminous Plants (Translated from Russian in 1961) Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem. 1–412 pp.

Smeal, D.; Kallsen, C. E. and Sammis, T. W. 1991. Alfalfa yield as related to transpiration, growth stage and environment. *Irrigation Science* July 1991, Volume 12, Issue 2, pp 79-86. Disponible en: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00190014> (consultado en noviembre de 2018)

Smith, M.; Clarke, D. and El-Askari, K. 1998 CropWat for Windows: User Guide. Disponible en <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agl/aglw/cropwat.stm> (consultado en marzo 2019).

Snaydon, R. 1985. Aspects of the ecological genetics of pasture species. In: *Structure and functioning of plant populations*. (Ed). J. Haeck and J. W. Woldendorp. N. Holl. Pub. Amsterdam Holin, F. 2001. Alfalfa's new crop. *Hay Forage grower*. 16: 30-37

Spada, M. del C. 2000. Avances en Alfalfa. *Ensayos Territoriales*. EEA Manfredi-INTA, Año 10 - Nº 10, 64 p. 36.

Spada, M. del C. 2007. Evaluación de cultivares y panorama varietal. En: Basigalup, D. H. (ed) *El cultivo de alfalfa en la Argentina*. INTA Capítulo 7, pág 131-151.

- Spada, M. del C.; Guzmán, C. y Basigalup, D. H. 2007. Elección de Cultivares de Alfalfa. *Idia XXI*. (Ed) Senigagliesi, I.; TavernaIng, M. y Comerón, E. Lechería pp 192
- Spada, M. del C. 2008. Avances en Alfalfa. Ensayos Territoriales. EEA Manfredi-INTA, Año 18 - N° 18, 89 pp.
- Spada, M. 2010. Avances en Alfalfa. Ensayos Territoriales. EEA Manfredi-INTA. Año 20, número 20.
- Spada, M. del C. 2011. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales. Red de evaluación de cultivares de alfalfa. Año 21. N° 21. ISSN 1515-4602. E.E.A. Manfredi-INTA. Córdoba, Argentina, 77 pp.
- Spada, M. del C. 2012. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales. Red de evaluación de cultivares de alfalfa. Año 22. N° 22. ISSN 1515-4602. E.E.A. Manfredi-INTA. Córdoba, Argentina, 97 pp.
- Spada, M. del C. 2013. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales. Red de evaluación de cultivares de alfalfa. Año 23. N° 23. ISSN 1510-4602. E.E.A. Manfredi-INTA. Córdoba, Argentina, 74 pp.
- Spada, M. del C. 2014. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales. Red de evaluación de cultivares de alfalfa. Año 24. N° 24. ISSN 1550-4602. E.E.A. Manfredi-INTA. Córdoba, Argentina, 98 pp.
- Steduto P. y Albrizio R., 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea - II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 130 (3-4), 269-281.
- Steduto P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25:189-207.
- Steduto, P., Hsiao T.C., Raes, D. and 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.; Fereres, E. y Raes, D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, 510pp, Estudio FAO, Riego y Drenaje 66, Rome.
- Summer, C. G. 1998. Integrated pest management in forage alfalfa. *Integrated Pest Management Reviews* 3, 127-154. Disponible en: <https://alfalfa.ucdavis.edu/+producing/files/Forage%20Alfalfa%20IPM.pdf> (consultado enero 2018)
- Bachnick, B. G. and Fidell, L.S. 2013. *Using Multivariate Statistics*. Ed. Pearson Education. United States os America. 956 pp.
- TaTaiz, L. y Zeiger, E. 2006. Fisiología del estrés. Cap 25.1129-1138, en *Fisiología Vegetal*. Publicacions de la Universitat Jaume I de Castellón. (Ed) Universitat Jaume. 1265 p
- Tavakol, E. and Pakniyat, H. 2007. Evaluation of Some Drought Resistance Criteria at Seedling Stage in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/23650967_Evaluation_of_Some_Drought_Resistan

ce_Criteria_at_Seedling_Stage_in_Wheat_Triticum_aestivum_L_Cultivars (consultado junio 2018)

Taylor, H. M.; Ratliff, L. M. and Klepper, B. 1973. Rooting density and water extraction patterns of corn, *Agron. J.* 65:965-968.

Teixeira, E. I.; Moot, D. J.; Mickelbart, M. V. 2007. Seasonal patterns of root C and N reserves of lucerne crops (*Medicago sativa* L.) grown in a temperate climate were affected by defoliation regime. *European Journal of Agronomy*, 26: 10–20.

Teixeira, E. I., Moot, D. J. y Brown, H. E. 2008. Defoliation frequency and season affected radiation use efficiency and dry matter partitioning to roots of lucerne (*Medicago sativa* L.) crops. *European Journal of Agronomy*, 28 (2): 103-111.

Teixeira, E. I.; Brown, H. E.; Meenken, E. D. and Moot, D. J. 2011. Growth and phenological development patterns differ between seedling and regrowth lucerne crops (*Medicago sativa* L.). *European Journal of Agronomy* Volume 35, Issue 1, June 2011: 47-55

Terán Chaves, C. A. 2015. Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la Sabana de Bogotá (Colombia). Tesis Doctoral. Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España. 297. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=104032> (consultado en enero 2017)

Thiébeau, P.; Beaudoin, N.; Justes, E.; Allirand, J. M. and Lemaire, G. 2011. Radiation use efficiency and shoot:root dry matter partitioning in seedling growths and regrowth crops of lucerne (*Medicago sativa* L.) after spring and autumn sowings. *European Journal of Agronomy* 35, 4: 255-268

Thomas, H. and Howarth, C. J. 2000. Five ways to stay green. *Journal of Experimental Botany* 51:329-337

Totis de Zelijkovich, L.E. y Coca, M. J. 1998. Necesidades de agua de un cultivo de alfalfa y su relación con la productividad. INTA EEA Pergamino. *Revista de Tecnología Agropecuaria* 3(8):22-24

Toumi, J.; Er-Raki, S.; Ezzahar, J.; Khabba, S.; Jarlan, L. and Chehbouni, A. 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agric. Water Manage.* 163:219-35.

USDA-RNCS. 2006. SQI-Soil Quality Institute. Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.

Van Ittersum, M. K. and Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.* 52, 197-208

Videla Menesegú, H.; Degioanni, A. and Cisneros, J. 2015. Estimating shallow water table contribution to soybean water use in Argentina. *European Scientific J.* 11 (14): 23-40

Villar, J. L. 2003. Efecto sobre la producción agrícola y estrategias a nivel predial para mitigar y/o capitalizar sus consecuencias en el centro de la provincia de Santa Fe. (Ed) INTA. Disponible en <https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta->

- propuestas_tecnicas_para_disminuir_el_impacto_de_inundaciones_en_la_provincia_de_santa_fe.pdf (consultado diciembre 2018)
- Villar, J. L. 2014. Efecto sobre la producción agrícola y estrategias a nivel predial para mitigar y/o capitalizar sus consecuencias en el centro de la provincia de Santa Fe. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-propuestas_tecnicas_para_disminuir_el_impacto_de_inundaciones_en_la_provincia_de_santa_fe.pdf (consultado marzo 2019).
- Volenc, J. J.; Cherney, J. H. and Johnson, K. D. 1987. Yield components, plant morphology, and forage quality of alfalfa as influenced by plant population. *Crop Science* 27, 321-326
- Volenc, J. J.; Ourry, A. and Joern, B. C., 1996. A role for nitrogen reserves in forage regrowth and stress tolerance. *Physiol. Planta.* 97 (1): 185–193
- Volenc, J. J.; Cunningham, S. M.; Haagensohn, D. M.; Berg, w. K.; Joern, B. C. and Wiersma, W. D. 2002. Physiological genetics of alfalfa improvement: Past failures, future prospects. *Field Crops Res.* 75: 97 – 110.
- Wang, J.Y. 1960. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41: 785-790
- Wang, E.; Robertson, J. and Hammer, G. L. 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. 18 (1-2):121-140
- Wen-Ming, B. and Ling, H. L. 2003. Effect of irrigation methods and quota on root water uptake and biomass of alfalfa in the Wulanbuhe sandy region of China. *Agricultural Water Management* 62 (2003): 139–148
- Whalley, W. R.; Leeds-Harrison, P. B.; Clark, L. J. and Gowing, D. J. G. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 84: 18-27.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evolution of model performance. *Bulletin of American Meteorology Society*, 63(11): 1309-1369.
- Wilson, M. y Cerana, J. 2004. Mediciones Físicas En Suelos Con Características Vérticas *Revista Científica Agropecuaria* 8(1): 11-22
- Wolf, D. D. and Blaser, R. E. 1971. Leaf development of alfalfa at several temperatures. *Crop Sci.* 11:479-482.
- Xu, M.; Gruber, B. D.; Delhaize, E.; White, R. G.; James, R. A.; You, J.; Yang, Z. and Ryan, P. R. 2015. The barley anion channel, HvALMT1, has multiple roles in guard cell physiology and grain metabolism. *Physiol. Plantarum* 153:183-93.
- Yang, S.; Logan, J. and Coffey, D. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree-days. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.74, n.1-2: 61-74
- Yun Kang, Y.; Han, Y.; Torres-Jerez, I.; Wang, M.; Tang, Y.; Monteros, M. and Udvardi, M. 2011. System responses to long-term drought and re-watering of two contrasting alfalfa varieties. *The Plant Journal* (2011) 68, 871–889
- Yu, J.; Feng-Min, L.; Xiao-Ling, W. and Sheng-Mao, Y. 2006. Soil water and alfalfa yields as affected by alternating ridges and furrows in rainfall harvest in a semiarid environment. *Field Crops Research* 97 (2006): 167–175

Zaballo, J. P. 2006. El Agua en el Suelo 4: Textura del Suelo y Propiedades Hídricas. Disponible en <http://weblogs.madrimasd.org/universo/archive/2006/07/05/33887.aspx> (consultado en marzo de 2019).



ANEXO

Anexo i: Portada y metodología de trabajo en la RED de Cultivares de alfalfa de INTA



RED NACIONAL DE EVALUACIÓN
DE CULTIVARES

ISSN 1515-4602

AÑO xx NÚMERO xx

Fecha año

AVANCES EN ALFALFA

Ensayos Territoriales

RED DE EVALUACION DE CULTIVARES DE ALFALFA



Editores: Valeria Arolfo, Ariel Odorizzi arolfo.valeria@inta.gob.ar
Profesionales responsables de los ensayos
Marcos Juárez: Ings. Agrs. Ariel Odorizzi; Daniel Basigalup
EEA Manfredi: Biol. Valeria Arolfo; Ing. Agr. Silvia Olivo
EEA Rafaela: Ing. Agr. Luis Romero
EEA Concepción del Uruguay: Ing. Agr. Alejo Ré
EEA General Villegas: Ing. Agr. Cecilia Sardiña
EEA Anguil: Ing. Agr. Laura Fontana
AER 25 de Mayo: Ings. Agrs. Damián Zamora; Dardo Fontanella
EEA Villa Mercedes: Ing. Agr. Mario Funes
EEA Viedma: Lics. Gestión Agropecuaria Juan José Gallego; Fernanda Neira Zilli
AER Valle Medio: Ing. Agr. Verónica Favere
EEA Santiago del Estero: Ing. Agr. Mónica Cornacchione
EEA Las Breñas: Ing. Zootec. Jessika Cavalieri
EEA Chubut: Ings. Agrs. Agustín Pazos; Eduardo Matinanta
EEA Esquel: Ing. Agr. Cristina Ugarte
EEA Rama Caída: Ing. Agr. Adrián Orozco 3
Editores: Valeria Arolfo, Ariel Odorizzi arolfo.valeria@inta.gob.ar
Profesionales responsables de los ensayos
Marcos Juárez: Ings. Agrs. Ariel Odorizzi; Daniel Basigalup
EEA Manfredi: Biol. Valeria Arolfo; Ing. Agr. Silvia Olivo
EEA Rafaela: Ing. Agr. Luis Romero
EEA Concepción del Uruguay: Ing. Agr. Alejo Ré
EEA General Villegas: Ing. Agr. Cecilia Sardiña
EEA Anguil: Ing. Agr. Laura Fontana
AER 25 de Mayo: Ings. Agrs. Damián Zamora; Dardo Fontanella
EEA Villa Mercedes: Ing. Agr. Mario Funes
EEA Viedma: Lics. Gestión Agropecuaria Juan José Gallego; Fernanda Neira Zilli
AER Valle Medio: Ing. Agr. Verónica Favere
EEA Santiago del Estero: Ing. Agr. Mónica Cornacchione
EEA Las Breñas: Ing. Zootec. Jessika Cavalieri
EEA Chubut: Ings. Agrs. Agustín Pazos; Eduardo Matinanta
EEA Esquel: Ing. Agr. Cristina Ugarte
EEA Rama Caída: Ing. Agr. Adrián Orozco 3

Cuadro 2: Cultivares de alfalfa, grado de reposo, características fitosanitarias y compañía que suministra la semilla.

CULTIVAR	Grado de Reposo	Pungón			Enfermedades			SEMILLERO
		Moteado	Verde	Azul	Fitóftora	Fusariosis	Antracnosis	
Bar Pal 145	5	R	AR	AR	R	AR	AR	Barenbrug Palaversich
ACA 605	6	R	R	AR	MR	AR	MR	Asociación Coop. Argentinas
Argenta	6	R	MR	R	R	R	R	Gentos S.A.
Catalina PF	6	R	R	AR	AR	AR	R	Pampa Fertil
CW 620	6	AR	AR	AR	AR	AR	AR	Cal West Seeds S.R.L.
CW 660	6	AR	AR	R	R	R	R	Cal West Seeds S.R.L.
Nobel 620	6	-	AR	-	AR	AR	R	Gentos S.A.
Pro INTA Luján	6	R	AR	M	MR	AR	BR	Produce S.A.
Regina	6	R	-	AR	R	R	R	Oscar Peman y Asociados
Verzy	6	MR	R	R	MR	AR	AR	Barenbrug Palaversich
WL 611	6	AR	AR	AR	AR	AR	AR	Alfalfas WL - Agvance
Antares	7	MR	R	R	AR	R	R	Barenbrug Palaversich
Crioula	7	R	AR	-	AR	R	AR	Uruseeds S.R.L.
GSM 681 (LPS 681)	7	R	-	MR	AR	AR	MR	Las Praderas
Nobel 720	7	-	AR	-	AR	AR	AR	Gentos S.A.
Pro INTA Patricia	7	R	MR	MR	MR	MR	MR	Produce S.A.
Pulmarí PV INTA	7	R	AR	R	R	AR	MR	Palo Verde S.R.L.
SW 7410	7	AR	R	R	R	AR	MR	SW Semillas S.A.
Armona	8	AR	AR	R	MR	AR	MR	Semillera Guasch
CW 809	8	R	AR	R	AR	AR	AR	Cal West Seeds S.R.L.
Estanzuela Chaná	8	R	MR	R	AR	R	R	Uruseeds S.R.L.
Lacta 820	8	-	AR	-	MR	AR	MR	Gentos S.A.
LPS 8500	8	AR	AR	AR	AR	AR	MR	Las Praderas
Martina	8	AR	AR	AR	R	AR	AR	Pampa Fertil
Monarca SP INTA	8	AR	AR	A	R	R	MR	INTA Sancor Produce
Pro INTA Súper Monarca	8	AR	R	MR	MR	AR	MR	Produce S.A.
Soraya	8	R	AR	MR	R	AR	AR	Barenbrug Palaversich
WL 818	8	AR	AR	AR	AR	AR	AR	Alfalfas WL - Agvance

ACA 903	9	R	-	AR	AR	AR	R	Asociación Coop. Argentinas
Bar Pal 139	9	R	AR	R	AR	AR	AR	Barenbrug Palaversich
Bar Pal 149	9	R	MR	AR	MR	R	MR	Barenbrug Palaversich
Bar VRD	9	AR	R	AR	R	AR	R	Barenbrug Palaversich
Catalina SW	9	AR	R	M	R	AR	-	S&W Seed Company

CW 194 Premium	9	AR	AR	AR	R	AR	R	Cal West Seeds S.R.L.
CW 197	9	AR	AR	R	AR	MR	AR	Cal West Seeds S.R.L.
G 969	9	R	AR	AR	R	AR	AR	Gapp Semillas S.A.
Galia	9	AR	R	R	AR	AR	R	Caverzasi Ortín y Cía.
Gitana	9	R	R	R	MR	AR	R	Gentos S.A.
Limay PV INTA	9	R	AR	R	MR	AR	R	Palo Verde S.R.L.
LPS 9500	9	AR	AR	AR	AR	AR	R	Las Praderas
LPS 9501	9	AR	R	AR	R	AR	R	Las Praderas
Milonga III	9	AR	AR	AR	R	R	R	Alianza Semillas
Magna 4N900	9	AR	AR	-	AR	AR	R	Forratec Argentina S.A.
Patriarca	9	AR	-	R	R	R	R	Oscar Peman y Asociados
PF 9000	9	AR	AR	AR	AR	R	AR	Pampa Fertil
Pro INTA Mora	9	R	MR	R	MR	R	R	Produceem S.A.
Queen 910	9	R	AR	R	AR	AR	AR	José R. Picasso
Saltana	9	AR	R	AR	R	AR	-	S&W Seed Company

Clase	% Resistencia
Susceptible (S)	0 – 5%
Baja Resistencia (BR)	6 – 14%
Resistencia Moderada (MR)	15 – 30%
Resistencia (R)	31 – 50%
Alta Resistencia (AR)	>50%
Sin datos	-

Susceptible: incapacidad de la planta para restringir la actividad de una plaga.

Resistencia: capacidad de la planta de restringir la actividad de una plaga.

Cuadro 3: Ejemplo de presentación de los datos de producción en los cultivares, por corte y ciclo de evaluación, en la localidad de Manfredi.

Cuadro 5: Producción por corte y anual de materia seca (tn MS/ha), porcentaje de cobertura y altura de rebrote (cm) de cultivares de alfalfa sin reposo invernal (Grado de reposo 8 - 9 - 10) ERA SR 2014. Manfredi. Primer ciclo de evaluación. 2014/2015.

	Producción de materia seca (tn MS/ha)									
	Cortes									
Cultivares	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º		Cobertura %	Altura Rebrote (cm)
Fecha de Corte	21/10	27/11	22/12	21/1	23/2	31/3	7/5	Anual		
WL 1058	3,36	4,18	2,36	2,94	2,79	2,16	0,92	18,72 a	93,1 a	19 a
Martina	3,31	3,60	2,47	2,74	2,69	1,88	0,77	17,46 a	87,9 b	20 a
Soraya	2,89	3,07	2,47	2,99	2,71	2,02	0,85	17,00 a	93,7 a	16 a
Galía	3,10	3,34	2,40	2,69	2,87	1,76	0,82	16,98 a	99,3 a	17 a
WL 818	3,21	3,26	2,20	2,77	2,38	2,08	0,72	16,63 a	97,9 a	17 a
Armona	3,61	3,73	2,10	2,18	2,62	1,72	0,64	16,63 a	93,1 a	12 b
Patriarca	3,28	3,42	2,27	2,49	2,49	2,00	0,62	16,38 a	96,6 a	16 a
Pro INTA Súper Monarca	3,44	3,11	2,14	2,52	2,58	2,03	0,68	16,30 a	93,4 a	13 a
EXP G 10	3,05	3,30	2,27	2,85	2,60	1,52	0,89	16,47 a	97,3 a	18 a
PF 9000	2,99	3,44	2,35	2,35	2,61	2,08	0,61	16,43 a	97,3 a	18 a
Milonga III	3,07	3,36	2,12	2,44	2,66	1,66	0,77	16,27 a	97,2 a	17 a
LPS 9500	3,00	3,29	2,42	2,68	2,32	1,73	0,77	16,21 a	93,7 a	16 a
EXP PIC (Picasso)	3,25	3,30	2,37	2,02	2,56	1,97	0,72	16,20 a	94,3 a	13 a
WL 919	3,19	3,36	2,40	2,29	2,49	1,66	0,80	16,19 a	97,3 a	18 a
Bar Pal 149	3,25	3,01	2,36	2,91	2,47	1,47	0,61	16,08 a	93,2 a	18 a
Monarca SP INTA	3,03	3,40	1,80	2,66	2,67	1,86	0,66	16,08 a	94,6 a	19 a
Gitana	3,64	3,57	2,30	2,04	2,22	1,70	0,58	16,05 a	94,3 a	13 b
Lecta 820	3,01	3,21	2,20	2,42	2,63	1,90	0,64	16,02 a	96,3 a	13 a
Catalina SW	2,72	3,04	2,73	2,62	2,35	1,86	0,63	15,95 a	98,4 a	19 a
N 900	2,81	3,17	2,42	2,79	2,44	1,66	0,64	15,91 a	92,1 b	20 a
Suprema	3,04	3,43	2,16	2,05	2,63	1,88	0,64	15,85 a	93,9 a	13 a
LPS 8500	3,39	2,89	2,08	2,38	2,69	1,71	0,70	15,84 a	96,1 a	13 a
Pro INTA Mora	3,20	3,29	2,57	2,60	1,97	1,49	0,65	15,78 a	91,5 b	18 a
Bar Pal 139	3,16	3,33	2,32	2,37	1,90	1,83	0,66	15,58 a	98,1 a	17 a
CW 194 PLUS	3,14	2,96	2,37	2,31	2,43	1,69	0,51	15,41 a	96,7 a	17 a
CW 809	3,09	3,04	2,13	2,20	2,43	1,79	0,68	15,37 a	97,3 a	17 a
ACA 903	3,24	3,29	2,12	1,99	2,24	1,54	0,61	15,02 a	94,3 a	13 b
Queen 910	2,89	3,08	1,82	2,44	2,01	1,80	0,53	14,57 a	94,8 a	17 a
Saltana	2,25	2,57	2,57	2,04	2,20	1,39	0,77	13,79 a	97,2 a	20 a
G 969	2,47	2,83	1,77	1,99	2,08	1,44	0,85	13,44 a	96,1 a	20 a
Promedio	3,10	3,27	2,27	2,46	2,46	1,78	0,70	16,03	95,5	17
C.V. %								13,18	3,09	19,22
Tasa crecimiento kg MS/ha/día		88	91	82	75	49	19			

Valores seguidos por igual letra no difieren significativamente (DGC $\alpha = 0,05$)



Anexo ii: Tabla Parámetros del módulo cultivo requeridos por el modelo AquaCrop y su clasificación por tipo.

6.0 : AquaCrop Version (March 2017)	Rangos o unidad		Valor asignado	Tipo de parámetro	
Determination of crop cycle : by °GD days	por días o °GD	calculado	°GD	parámetro NO conservativo	días de acumulación transformados en $\Sigma^{\circ}\text{GD}$
Base temperature (°C) below which crop development does not progress	Base fisiológica en especies C3	calculado	2,5°C para O/I y 5°C para P/V	parámetro conservativo	Métodos propuesto po Arnold (1959)
Upper temperature (°C) above which crop development no longer increases with an increase in temp.	Base fisiológica en especies C3	estimado	15°C para O/I y 28°C para P/V	parámetro conservativo	Pearson y Hunt (1972)
Total length of crop cycle in growing degree-days	Período entre dos cortes	datos de RED	días de acumulación transformados en $\Sigma^{\circ}\text{GD}$	parámetro NO conservativo	
Transpiration coefficient of the species (Kc)	Valores de Kc de referencia entre 1,1- 1,15.	estimado	1,15	parámetro conservativo	French y Legg (1979)

Continuación Tabla: Parámetros del módulo cultivo requeridos por el modelo AquaCrop y su clasificación por tipo

I-Crop development				
a-Initial canopy cover				
Soil surface covered by an individual seedling at 90 % emergence (cm2)	0,10 a 10%	estimado	10% cortes en el 1er y 2do ciclo, 5% cortes en el 3er ciclo	parámetro conservativo
Canopy size of individual plant (re-growth) at 1st day (cm2)	0,2 cm	estimado		parámetro NO conservativo
Number of plants per hectare	2 plantas/m ² a 200 plantas/m ²	estimado		parámetro NO conservativo
Cobertura inicial de canopeo relacionados al n° plantas	0,10% a 10 %	estimado		parámetro NO conservativo
b-Canopy development (no stress)				
Maximum canopy cover	40% a 99 %	calculado	85% (P/V) y 65% (O/I)	parámetro NO conservativo
Coefficient (CDC) growth in canopy cover (in fraction per day)	1% a >15%	estimado	variaron entre 10% a 15 %,valor relacionado a los datos ingresados en °GD	parámetro conservativo
Canopy decline coefficient (CDC): Decrease in canopy cover (in fraction per day)	3,1 % a 30%	estimado	muy lenta declinación 3 a 5 % /día según datos RED	parámetro conservativo
Canopy decline coefficient (CDC): Decrease in canopy cover (in fraction %)	0,5%/día a 1%/día	estimado	declinación de 0,5%/día	
c-root deepening in no soil restriction				
Minimum effective rooting depth (m)	0,4 m	estimado	1,5 m	parámetro NO conservativo
Maximum effective rooting depth (m)	4 m	estimado	3,5 m	parámetro NO conservativo
Time or °GD to maximum rooting depth	días or °GD	datos de RED	coincide con momento de corte	parámetro NO conservativo
Shape factor describing root zone expansion	lineal o no lineal	estimado	3 (curva moderadamente convexa)	parámetro conservativo

Continuación Tabla: Parámetros del módulo cultivo requeridos por el modelo AquaCrop y su clasificación por tipo

II-Evapotranspiration (no stress)				
a-Coefficients: soil evaporation: effect of canopy shelter in late season	25 % a 95%	calibrado	40% (P/V); 30% (O/I)	parámetro conservativo
b-Crop transpiration well watered crop	0,25 a 1,5	estimado	1,1	parámetro conservativo
c-Water extraction pattern	fracciona en 4 niveles la profundidad efectiva raíz	estimado	40% 1er estrato-30% 2do estrato-20% 3er. Estrato y 10% último estrato	parámetro conservativo
III-Crop Production (no stress)				
a-Water Productivity normalized for ETo and CO2 (WP*) (gram/m2)	C3 rango 15-20 g/m ²	estimado	15 g/m2	parámetro conservativo
b- Harvest Index (HIo)	2% a 100%	calibrado	75%	parámetro NO conservativo
IV-Soil water stresses				
a- Canopy expansion	estremadamente sensible a estremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos p upper= 0 a 0,35; p lower=0,35 a 0,70)	estimado	moderadamente tolerante (p upper= 0,25; p lower= 0,6)	parámetro conservativo
Water stress: adjustment factor for the ETo correction on the soil water depletion.	lineal o no lineal	estimado	shade factor=3	parámetro conservativo
b-Stomatal closure (adjust Ks for ETo)	estremadamente sensible a estremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos p upper= 0,35 a 0,75)	estimado	moderadamente tolerante (p upper= 0,65). Por encima de este valor el estoma se cierra	parámetro conservativo
Shape factor for stomatal closure	lineal o no lineal	estimado	shade factor=3	parámetro conservativo

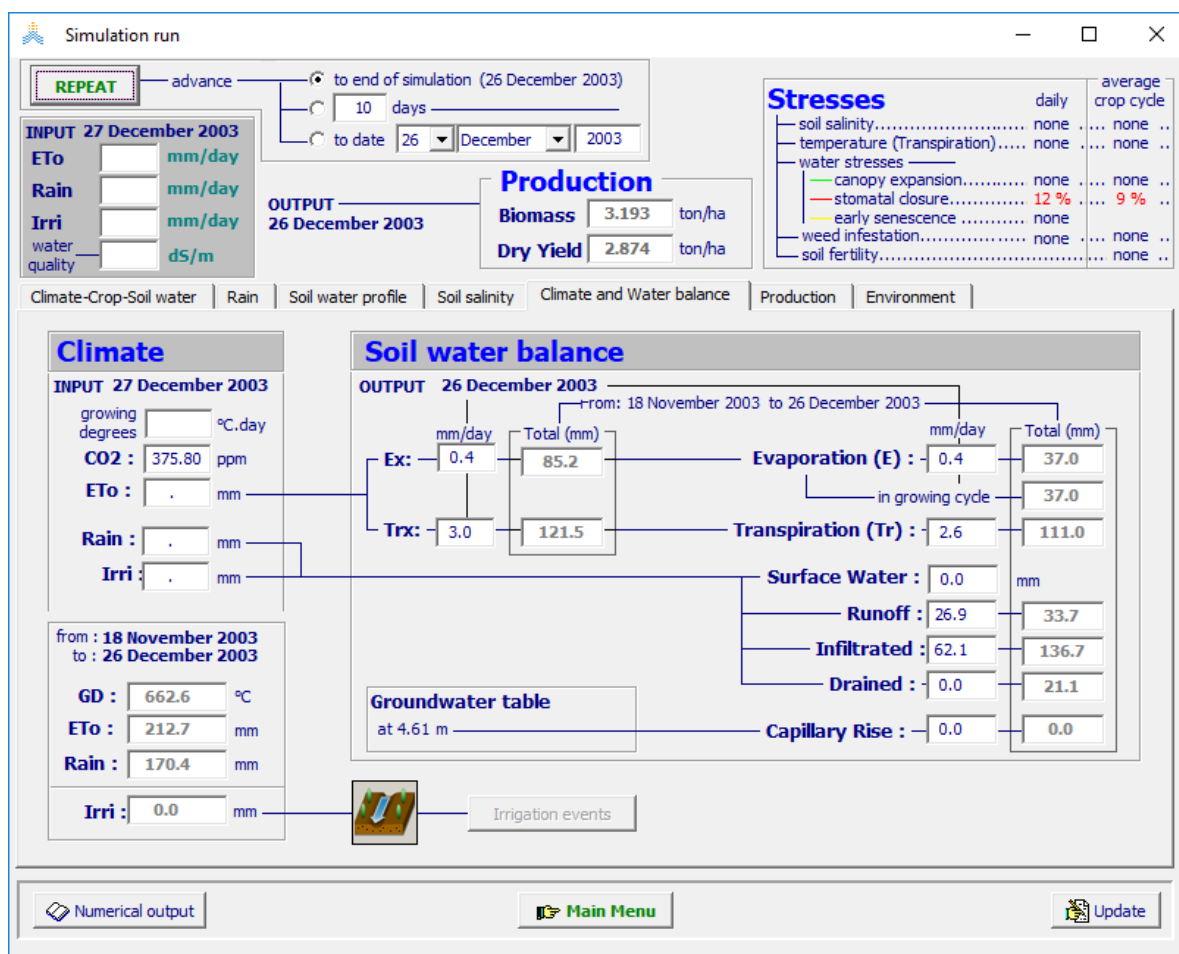
IV-Soil water stresses				
c- Early canopy senescence	estremadamente sensible a estremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos p upper= 0,35 a 0,80)	estimado	moderadamente tolerante (p upper= 0,85 en P/V; 0,65 en O/I)	parámetro conservativo
Shape factor for canopy senescence	lineal o no lineal	estimado	shade factor=3	parámetro conservativo
d-Aeration stress	no estresado en anegamiento a muy sensible al anegamiento (rangos = saturación - (0 a 15% de Vol de poros saturados)	estimado	15 % del volumen total de poros del suelo saturados	parámetro conservativo
Number of °GD or days after which deficient aeration is fully effective	no estresado en anegamiento a muy sensible al anegamiento	estimado	3 días	parámetro conservativo
V-Air temperature stresses				
Threshold temperatures for crop development	valor según especie	calculado-estimado	5°C/28°C rango P/V y 2,5°C/15°C rango O/I	parámetro conservativo
Soil water depletion factor for pollination (p - pol) - Upper threshold				Not Applicable
Minimum air temperature below which pollination starts to fail (cold stress) (°C)				Not Applicable
Maximum air temperature above which pollination starts to fail (heat stress) (°C)				Not Applicable
VI-Soil salinity stresses				
a-Salt tolerance	estremadamente sensible (hasta 6 dS/m) a estremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos = 8 dS/m a 37 dS/m)	estimado	lower=2 dS/m; upper= 8 dS/m	parámetro conservativo
b-Biomasa reduction in well-watered soil	0% a 100% de reducción de la biomasa	estimado	25% reducción de la biomasa	parámetro conservativo

Continuación Tabla: Parámetros del módulo cultivo requeridos por el modelo AquaCrop y su clasificación

VII-Calendar				
Calendar Days: from sowing to emergence	días or °GD	calculado	definido por °GD filocrón de alfalfa	parámetro NO conservativo
Calendar Days: from sowing to maximum rooting depth	días or °GD	calculado	definido por el momento de corte	parámetro NO conservativo
Calendar Days: from sowing to flowering				Not Applicable
Length of the flowering stage (days)				Not Applicable
Crop determinancy unlinked with flowering				Not Applicable
Calendar Days: from sowing to start senescence	días or °GD	estimado	definido por el momento de corte	parámetro NO conservativo
Calendar Days: from sowing to maturity (length of crop cycle)	días or °GD	datos de RED	definido por el momento de corte	parámetro NO conservativo

Anexo iii: Planillas de salida de un período de corte en P-V, en condiciones precedentes normales, en la localidad de Marcos Juárez.

Período: 18/11/2003 al 26/12/2003, valor del corte según Red: 2,85



Simulation run

REPEAT — advance — ☒ to end of simulation (26 December 2003)
☐ 10 days
☐ to date 26 December 2003

INPUT 27 December 2003
ETo mm/day
Rain mm/day
Irri mm/day
 water quality dS/m

OUTPUT 26 December 2003

Production
Biomass 3.193 ton/ha
Dry Yield 2.874 ton/ha

Stresses

	daily	average crop cycle
soil salinity.....	none	none ..
temperature (Transpiration).....	none	none ..
water stresses		
canopy expansion.....	none	none ..
stomatal closure.....	12 %	9 % ..
early senescence	none	none ..
weed infestation.....	none	none ..
soil fertility.....	none	none ..

Climate-Crop-Soil water | Rain | Soil water profile | Soil salinity | Climate and Water balance | **Production** | Environment

Growth stage: after cropping period

Biomass
 produced since start of simulation **ton/ha**
Actual produced 3.193 **ratio** 90 %
Potential biomass 3.533
 - no water stress
 - unlimited soil fertility.....
 - no soil salinity stress
 - no weed infestation

Crop cycle
Length (starting from germination):..... 39 days

ET water productivity
1.94 kg (yield) per m3 water evapotranspired

Numerical output Main Menu Update