

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN CROPSYST
PARA DOS CULTIVARES DE MAIZ Y SORGO DEL LITORAL OESTE DE
URUGUAY

por

Fabrizio GONZÁLEZ GUASQUE

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO
URUGUAY
2013

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Luis Giménez

Fecha: 16 de noviembre de 2013

Autor: -----
Fabricio González Guasque

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Mirza por inculcarme la necesidad del estudio y la constancia, mi padre Ramón que me mostró que importante es el esfuerzo.

A mi hermano Wilfredo por compartir la ilusión de superarnos, y a mi abuela Azucena que siempre me apoyo y se preocupó de que nunca me faltara nada.

Al Prof. Ing. Agr. Sebastián Mazzilli, por la motivación desde el comienzo, estando a disposición por cualquier planteo demostrando su calidad de persona.

A los compañeros y amigos que realice en los años de facultad.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 RESUMEN DE INFORMACIÓN RECADADA.....	2
2.2 ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO.....	4
2.3 ANÁLISIS DE BIOMASA.....	6
2.4 ANÁLISIS DE FENOLOGÍA.....	6
2.5 ANÁLISIS DE LA ABSORCIÓN DE NITRÓGENO.....	6
2.6 ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	7
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	9
3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	9
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	9
3.3 MANEJO EXPERIMENTAL.....	10
3.3.1 <u>Determinaciones</u>	10
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	11
3.4.1 <u>Hipótesis estadística</u>	11
3.4.2 <u>Criterios de decisión</u>	12
3.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO CROPSYST.....	12
3.6 VALIDACIÓN DEL MODELO.....	12
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	13
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERÍODO DEL ENSAYO.....	13
4.1.1 <u>Régimen pluviométrico</u>	13
4.1.2 <u>Régimen de temperatura</u>	15
4.1.3 <u>Régimen de radiación</u>	17
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	19
4.3 CULTIVO DE MAÍZ.....	20
4.3.1 <u>Resultados productivos</u>	20
4.3.2 <u>Calibración de maíz</u>	25
4.3.2.1 Calibración de fenología.....	26
4.3.2.2 Calibración biomasa aérea e índice de área foliar.....	26
4.3.2.3 Calibración del nitrógeno en planta.....	30
4.3.2.4 Calibración de agua en el suelo.....	31

4.3.2.5 Calibración del rendimiento	33
4.3.3 <u>Validación de maíz</u>	34
4.4 CULTIVO DE SORGO	41
4.4.1 <u>Resultados productivos</u>	42
4.4.1.1 Rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha	42
4.4.1.2 Índice de área foliar	43
4.4.1.3 Nitrógeno absorbido	43
4.4.1.4 Agua total en suelo	44
4.4.2 <u>Calibración sorgo</u>	45
4.4.2.1 Calibración de fenología	46
4.4.2.2 Calibración biomasa aérea e índice de área foliar	47
4.4.2.3 Calibración del nitrógeno en planta.....	50
4.4.2.4 Calibración del agua en el suelo	52
4.4.2.5 Calibración del rendimiento	54
4.4.3 <u>Validación sorgo</u>	55
5. <u>CONCLUSIONES</u>	62
6. <u>RESUMEN</u>	63
7. <u>SUMMARY</u>	64
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	65

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Resumen de la información publicada con ajustes del modelo CropSyst como simulador de los cultivos de maíz y sorgo	4
2. Fechas de siembra para cada año	10
3. Características generales de los suelos.....	19
4. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha zafra 2009/10.....	20
5. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha zafra 2010/11.....	21
6. Resultados de índice de área foliar zafra 2009/10	21
7. Resultados de índice de área foliar zafra 2010/11	21
8. Resultados Nitrógeno zafra 2009/10.....	23
9. Resultados Nitrógeno zafra 2010/11	23
10. Resultados agua zafra 2009/10	24
11. Resultados agua zafra 2010/11	24
12. Parámetros ajustados que lograron la mejor calibración en Maíz, obteniendo los datos de (B) información bibliográfica, (D) valor default, (M) medido en el campo, (C) calibrado.....	25
13. Fenología año 2009 maíz cultivar DK 670.....	26
14. Fenología año 2009 maíz cultivar MASS 494.....	26
15. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V7 – R1 cultivar MASS 494.....	27
16. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V7 – R1 cultivar DK 670.....	27

17. Calibración de biomasa aérea cultivar MASS 494 a cosecha.	28
18. Calibración de biomasa aérea cultivar DK 670 a cosecha.	28
19. Calificación de la calibración de biomasa aérea en cultivares de maíz.	29
20. Calificación de la calibración del IAF en cultivares de maíz.	29
21. Calificación de la calibración del N en planta en cultivares de maíz.	30
22. Calibración de rendimiento cultivar DK 670	33
23. Calibración de rendimiento cultivar MASS 494.....	34
24. Validación fenología cultivar MASS 494	35
25. Validación fenología cultivar DK 670	35
26. Validación biomasa aérea estados fenológicos vegetativos y reproductivos cultivar MASS 494.....	36
27. Validación biomasa aérea estados fenológicos vegetativos y reproductivos cultivar DK 670.....	36
28. Validación biomasa aérea para cosecha cultivar MASS 494	37
29. Validación biomasa aérea para cosecha cultivar DK 670	37
30. Calificación de la validación del IAF en cultivares de maíz.	38
31. Calificación de la calibración del N en planta en cultivares de maíz.	38
32. Calificación de la validación del agua en el suelo en cultivares de maíz.	40
33. Calificación de la validación rendimiento en grano en cultivares de maíz.	41
34. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha para la zafra 2009/10	42

35. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha para la zafra 2010/11	43
36. Resultados de índice de área foliar zafra 2009/10	43
37. Resultados de índice de área foliar zafra 2010/11	43
38. Resultados Nitrógeno zafra 2009/10.....	44
39. Resultados Nitrógeno zafra 2010/11	44
40. Resultados agua en el suelo zafra 2009/10.....	45
41. Resultados agua en el suelo zafra 2010/11	45
42. Parámetros ajustados que lograron la mejor calibración en Sorgo, obteniendo los datos de (B) información bibliográfica, (D) valor default, (M) medido en el campo, (C) calibrado.	46
43. Fenología año 2009 sorgo cultivar MS 109	47
44. Fenología año 2009 sorgo cultivar MS 102	47
45. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V6 – R1 cultivar MS 109	48
46. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V6 – R1 cultivar MS 102.....	48
47. Calibración de biomasa aérea MS 109 a cosecha	49
48. Calibración de biomasa aérea MS 102 a cosecha	49
49. Clasificación de biomasa aérea para ambos cultivares de sorgo en la calibración.	50
50. Clasificación de IAF para ambos cultivares de sorgo en la calibración.	50
51. Clasificación de N en planta para ambos cultivares de sorgo en la calibración.	51

52. Calificación de la calibración del agua en el suelo en cultivares de sorgo.	52
53. Calibración de rendimiento cultivar MS 109	54
54. Calibración de rendimiento cultivar MS 102	54
55. Validación fenología cultivar MS 109	55
56. Validación fenología cultivar MS 102	55
57. Validación biomasa aérea estado reproductivo para MS 109.....	56
58. Validación biomasa aérea estado reproductivo para MS 102.....	56
59. Validación biomasa aérea estado cosecha para MS 109	57
60. Validación biomasa aérea estado cosecha para MS 102.	57
61. Clasificación del IAF para ambos cultivares de sorgo en la validación.	58
62. Clasificación del rendimiento para ambos cultivares de sorgo en la validación.	61

Figura No.

1. Precipitación mensual zafras 2009/10 y 2010/11 comparada con serie histórica 2002-08.....	13
2. Precipitación decádica zafra 2009/10 comparada con serie histórica 2002-08.....	14
3. Precipitación decádica zafra 2010/11 comparada con serie histórica 2002-08.....	15
4. Temperatura zafra 2009/10 comparada con la serie histórica 2002-08.	16
5. Temperatura zafra 2010/11 comparada con serie histórica 2002-08.....	17
6. Radiación solar decádica zafra 2009/10 comparada con serie	

histórica 2002-08.....	18
7. Radiación solar decádica zafra 2010/11 comparada con serie histórica 2002-08.....	18
8. Evolución de la biomasa aérea y el IAF para las tres épocas de siembra año 2010/2011.....	22
9. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MASS 494 en la calibración de maíz.....	30
10. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar DK 670 en la calibración de maíz	31
11. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para calibración en ambos cultivares de maíz	32
12. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para calibración en ambos cultivares de maíz	32
13. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MASS 494 en la validación de maíz.....	39
14. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar DK 670 en la validación de maíz	39
15. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para validación en ambos cultivares de maíz	40
16. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para validación en ambos cultivares de maíz	41
17. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 109 en la calibración de sorgo.	51
18. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 102 en la calibración de sorgo	52

19. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para calibración en ambos cultivares de sorgo	53
20. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para calibración en ambos cultivares de sorgo	53
21. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 109 en la validación de sorgo	58
22. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 102 en la validación de sorgo	59
23. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para validación en ambos cultivares de sorgo	60
24. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para validación en ambos cultivares de sorgo	61

1. INTRODUCCIÓN

CropSyst es un modelo de simulación de crecimiento y desarrollo genérico que permite la simulación de una extensa serie de cultivos y pasturas. El uso proyectado de este modelo es el análisis de factores que afectan el crecimiento y rendimiento de los cultivos y el impacto ambiental de los sistemas de cultivos.

Un modelo de crecimiento del cultivo validado es una herramienta útil para optimizar las prácticas agronómicas de manejo así como para estudiar la adaptación de los cultivos a determinadas regiones. A su vez permite analizar efectos de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento y rendimiento de cultivos, así como efectos ambientales de la fertilización, en especial el transporte a aguas subterráneas.

La fiabilidad de estos modelos de simulación debe ser evaluada únicamente a través de procesos de calibración y validación con datos de experimentación a campo. La falta de parámetros genéticos de los cultivos es uno de los principales elementos que limitan el uso de este tipo de herramientas.

En Uruguay se cuenta con escasa información acerca de la utilización de este y otros modelos, por lo que resulta importante avanzar en el estudio de este tipo de herramientas para ajustar su aplicación a los sistemas de producción nacionales.

El objetivo de este trabajo es el de obtener los parámetros genéticos de dos cultivares por especie de maíz y sorgo de forma que puedan ser usados en el modelo CropSyst para evaluar distintas alternativas de manejo del cultivo a nivel local.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESUMEN DE INFORMACIÓN RECABADA

Se realizó una extensa revisión de trabajos, en los que se utilizó el modelo CropSyst para la simulación de los cultivos de maíz y sorgo. Se tomaron en cuenta aquellas publicaciones que estudiaron al menos uno de los siguientes factores: rendimiento, biomasa acumulada, nitrógeno absorbido, contenido de agua en el suelo y fenología, ya que serán los puntos analizados en el presente trabajo.

Para determinar la concordancia entre los valores simulados y observados los autores utilizaron distintos análisis estadísticos: 1) Raíz cuadrada media del error (RCME); 2) Diferencia relativa porcentaje (DR%); 3) Coeficiente de correlación (r); 4) Eficiencia del modelo (EF). Para todos los índices S es el valor simulado por el modelo, O es el valor observado y \bar{o} es la media de los valores observados.

- 1) RCME tiene un mínimo óptimo valor en cero y como característica es muy sensible a los outliers.

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$$

- 2) DR % admite un rango de + infinito a - infinito, valores positivos indican subestimación del modelo y valores negativos indican sobreestimación.

$$DR \% = \frac{(O_i - S_i)}{(O_i)} * 100$$

- 3) r posee un valor óptimo de 1, cero significa que no hay correlación. Donde $\sigma_{s o}$ es la covarianza entre los datos simulados y observados, σ_o y σ_s son la desviación estándar de los datos observados y simulados respectivamente.

$$r = \frac{\sigma_{s o}}{\sigma_o \sigma_s}$$

- 4) EF puede tener valores positivos o negativos, 1 es el límite superior mientras que menos infinito es el límite inferior teórico. Valores de EF negativos resultan en peor concordancia que la media de los valores observados.

$$EF = - 1 \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}$$

El resultado arrojado por estos índices fue tomado en cuenta para comparar el resultado del uso del modelo en diferentes artículos y clasificarlos en cuanto al ajuste logrado en la simulación. Los artículos fueron ordenados según la localización del trabajo de campo, estableciéndose tres zonas climáticas. Para la identificación de zonas se utilizó la clasificación propuesta por Turner (2004) para la agricultura de secano en la que establece tres tipos de ambientes: mediterráneo, subtropical y templado, diferenciándolos por radiación incidente, precipitaciones, temperatura, presión de vapor, etc. Se debería por lo tanto a priori, tomar en consideración las regiones en donde se realizan los experimentos al momento de sacar conclusiones sobre el funcionamiento del programa, debido a que podría ser un punto de partida para establecer diferencias en el correcto funcionamiento del mismo.

El cuadro No.1 presenta la información resumida de los trabajos revisados detallando los lugares del mundo en donde fueron realizados los experimentos, la cantidad de años en la cual se realizó la simulación (se incluyen calibración y validación del modelo en aquellos que llevaron a cabo las dos etapas) y por último la capacidad del programa en simular los procesos bajo estudio.

En general es escasa la publicación de artículos acerca de la utilización de CropSyst, como modelo de simulación de cultivos en climas templados como el de Uruguay. Se destaca que en la revisión efectuada sólo un artículo fue realizado en América del Sur, concretamente en Argentina en la Provincia de Entre Ríos, la mayoría de los trabajos fueron realizados en clima mediterráneo o subtropical. A su vez el cultivo de sorgo no cuenta con muchos estudios en comparación con el cultivo de maíz, siendo este último sobre el cual se han desarrollado la mayoría de los experimentos.

Cuadro No. 1. Resumen de la información publicada con ajustes del modelo CropSyst como simulador de los cultivos de maíz y sorgo

Cultivo	Maíz	Maíz	Maíz - Sorgo	Maíz	Maíz	Maíz
Lugar (País)	Minicio – Italia	El Batan – México	Camerún	Camerún	Puniab - India	E. Ríos – Argentina
Clima	Medit.	Subtrop.	Subtrop.	Subtrop.	Subtrop.	Templado
Años Simulados	2 (1999 - 00)	13 (1991 - 03)	50	2	2 (2004 - 05)	34 (1971 - 03)
Rend.	**	**	***	***	**	**
Biomasa	**	-	-	-	**	-
N absorbido	-	-	-	-	-	-
Agua	***	-	-	-	-	-
Fenología	-	-	-	-	-	***
Autor	Morari et al. (2004)	Soomers et al. (2007)	Tingem et al. (2008a)	Tingem et al. (2008b)	Jalota et al. (2010)	Milera y Crotti (1992)
Cultivo	Maíz	Maíz	Maíz	Maíz	Maíz	Sorgo
Lugar (País)	Pisa – Italia	Valle del Po – Italia	Toscana – Italia	Rietholz bach - Suiza	Valle Ebro - España	Foggia – Italia
Clima	Medit.	Medit.	Medit.	Medit.	Medit.	Medit.
Años Simulados	2 (1994 – 95)	2 (2002 – 03)	10 (1995 – 04)	20 (1981 – 00)	2 (1996 – 97)	17 (1986 – 03)
Rend.	-	-	***	***	**	***
Biomasa	***	-	-	-	**	-
N absorbido	**	-	.	.	*	-
Agua	-	**	-	-	-	**
Fenología	-	-	-	-	***	-
Autor	Bellochi et al. (2002)	Bonfante et al. (2010)	DellaMarta et al. (2010)	Dueri et al. (2007)	Ferrer et al. (2000)	Ventrella y Rinaldi (1999)

Referencias: ***: Excelente resultado, **Aceptable resultado, *: Mal resultado, - : no en estudio

2.2 ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO

Los ajustes obtenidos para el rendimiento en grano reportados en los trabajos pueden clasificarse como excelentes (RCME 9 – 11%) y aceptables (RCME 16 – 18%)

en todos los ambientes, por lo que no se puede concluir que CropSyst tenga mejor desempeño en determinado tipo de clima.

Las sobreestimaciones reportadas en los trabajos tienen diferentes explicaciones. Las simulaciones fueron muy sensibles al contenido inicial de N-NO₃ en el suelo y a la cantidad de N-NO₃ aportado en el agua de riego, encontrándose una mayor diferencia en aquellos tratamientos realizados sin aplicación de fertilizante (Ferrer et al., 2000). Por otra parte, hay factores en la realidad que reducen el rendimiento y que no son simulados. Es ejemplo el caso reportado en el retraso del crecimiento de las plantas de maíz y una menor tasa de aparición de hojas atribuido a la incidencia del gusano de la raíz (Soomer et al., 2007), el manejo de estos daños estaría más allá de las capacidades predictivas actuales de CropSyst, lo cual es esperable ya que el modelo no cuenta con rutinas que cambian el crecimiento por factores reductores de rendimiento como plagas y enfermedades. Las mayores discrepancias entre observado y simulado ocurrieron en años en los cuales se registraron muy bajas temperaturas (inferiores a la temperatura base del cultivo) las que provocan retraso en la emergencia de las plántulas del cultivo, y a las cuales el modelo parece no ser tan sensible. Sumado a esto las semillas en siembras muy tempranas tienen mayores posibilidades de sufrir ataques de hongos e insectos del suelo y el modelo tampoco considera estos elementos (Milera y Crotti, 1992)

En el trabajo realizado por Jalota (2010), valores de RCME de 16,1% y 18,9% en la calibración y validación de los datos respectivamente, se consideran como buenos atribuyendo las diferencias a la variabilidad de los resultados de campo. Por su parte Soomer et al. (2007), Dalla Marta et al. (2010), cuando consideran las diferencias entre repeticiones observadas se acercan a 1tt/ha, valores de RCME en torno al valor reportado por Jalota (2010) son aceptables aun cuando el rendimiento medio observado es de 4,16 tt/ha (Soomer et al., 2007). En otro trabajo se estableció que el modelo mantuvo excelentes resultados cuando al comparar el rendimiento del maíz simulado (8,9 tt/ha/año) éste se encontró dentro del rango promedio nacional suizo (7,9 – 9,6 tt/ha/año) (Dueri et al., 2007). Para sorgo mediante dos prácticas de manejo contrastantes referente a fertilización, manejo de plagas, laboreo, etc., los valores se aproximaron a los óptimos (RCME 9,07% – 11,94%) y para ambos casos la diferencia entre los resultados simulados y observados es igual a 0,1 tt/ha, lo que resulta en general menor al error experimental (Ventrella y Rinaldi, 1999).

Se encontraron sobre y subestimaciones cuando se utilizó información para inicializar el modelo extraída de diversas fuentes (literatura, reportes realizados por agricultores de Camerún) sin realizar experimentación a campo, aprobando los resultados de CropSyst en cada localidad ya que las estimaciones muestran que las simulaciones del rendimiento de maíz desacuerdan en 0,1-1,9% con los rendimientos que AGRISTAT (Anuario estadístico de la agricultura) informó a través de Camerún (Tingem et al. 2008a, Tingem et al. 2008b)

En resumen, el modelo logró resultados aceptables en rendimiento en grano en la mayoría de los trabajos publicados en una amplia gama de condiciones ambientales. Parece trascendente la correcta inicialización del modelo, a su vez es esperable que bajo condiciones de disminuciones de rendimientos por causas bióticas (plagas y enfermedades), el modelo tienda a sobreestimar el rendimiento, ya que no considera estas limitaciones.

2.3 ANÁLISIS DE BIOMASA

Si bien hay menos trabajos que reportan biomasa acumulada, existió concordancia entre los autores revisados acerca de que el modelo proporciona simulaciones aceptables de la acumulación de biomasa por encima del suelo. Esta salida dio el mejor valor de eficiencia ($EF = 0,82$) Bellochi et al. (2002) y en todos los casos bajo estudio por este autor, los pares de datos simulado / observado tienden a alinearse en torno a la línea 1:1 en perfecto acuerdo a lo largo del rango de la biomasa observada. Resultados de RCME: 10%, 23,89%, 23,7% para biomasa aérea son considerados adecuados (Ferrer et al. 2000, Jalota et al. 2010) y se estableció que las diferencias entre los datos simulados y observados son consecuencia de falta de una adecuada calibración (Morari et al., 2004)

2.4 ANÁLISIS DE FENOLOGÍA

Esta variable fue relevada sólo por dos trabajos, pero fue considerada por los autores como de excelente concordancia entre la realidad y lo simulado por el modelo. La diferencia promedio entre las fechas de emergencia, floración, grano lechoso y madurez fisiológica fue de cinco días (Ferrer et al., 2000). Para dicha discrepancia se debe tener en cuenta además, que las parcelas en el campo se visitaron aproximadamente cada siete días y, por tanto, hay un cierto error experimental asociado a las fechas observadas. Para maíz se puede concluir que es fácilmente ajustable la fenología.

2.5 ANÁLISIS DE LA ABSORCIÓN DE NITRÓGENO

Al igual que fenología la absorción de nitrógeno por el cultivo fue estudiada sólo en dos trabajos. La relación entre los valores simulados y observados de la absorción de nitrógeno por encima del suelo para 2 años obtenida por Bellochi et al. (2002), indican una respuesta satisfactoria en general ($r = 0,77$ en 1994, $r = 0,78$ en 1995), pero sin duda objeto de mejora. Se destaca una mejor modelización de la dinámica del nitrógeno cuando no se suministra nitrógeno, y en cuanto a la inclusión de cultivos de cobertura cuando las leguminosas estuvieron presentes. Otros factores aparte de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo pueden afectar la absorción de nitrógeno por parte del cultivo, lo que limita la capacidad del modelo para simular el crecimiento del cultivo en respuesta a nitrógeno, se sugiere posibles restricciones físicas y/o químicos para la

absorción de nitrógeno. Cabe destacar aquí que el modelo no toma la competencia de malezas en cuenta, desconsiderando la absorción de nitrógeno por parte de estas (Bellochi et al., 2002).

La posible aplicación de CropSyst en la estimación del N requerido por el cultivo se tendría que analizarse con cautela (Ferrer et al., 2000), ya que al comparar la diferencia media entre los valores observados y simulados de N absorbido, esta fue de 29kg N/ha. La simulación de la dilución del contenido de N en planta, y por tanto de la demanda de N por parte del cultivo, fue considerada correcta, se observaron mayores discrepancias en los tratamientos con fertilización cero (N-0) contrariamente a lo encontrado por Bellochi et al. (2002). A nivel general, el modelo fue capaz de predecir de forma razonablemente correcta la biomasa y N absorbido en madurez fisiológica, la curva de acumulación de la biomasa y nitrógeno mostró cierto desajuste durante el período correspondiente al crecimiento vegetativo y floración. El modelo simuló un ritmo de crecimiento superior al observado en campo. Este desajuste podría estar relacionado con la estimación de ciertos parámetros que condicionan el ritmo de crecimiento del cultivo (Ferrer et al., 2000).

Los autores de los artículos revisados aunque difieren en cuál es el tratamiento que mejor se adapta a la realidad pero coinciden en que la absorción de nitrógeno es pobremente simulado por CropSyst, siendo la única entrada que recibió una mala clasificación. Las causas principales son atribuidas a factores en la dinámica del nitrógeno del suelo los cuales no son considerados por el modelo.

2.6 ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Para obtener la mejor adaptación a la realidad en cuanto a la humedad del suelo CropSyst permite elegir entre dos modelos distintos. En el presente estudio se utilizara el método cascada por lo tanto se analizaran los trabajos que utilizaron este método. Se encontraron resultados satisfactorios en la simulación de agua en el suelo, dado además la heterogeneidad pedo-climáticas de los sitios experimentales y se destaca las ventajas del método cascada en comparación con el otro modelo existente en CropSyst (diferencias finitas) debido a sus resultados satisfactorios especialmente en áreas donde el nivel freático era más profundo (Morari et al., 2004).

El contenido de agua en el suelo simulado por el modelo al inicio del ciclo del cultivo tiene mayores diferencias que al final del mismo, esto se debe a la presencia de grietas en el suelo fenómeno que no puede ser evaluado por CropSyst (Ventrella y Rinaldi, 1999). El bajo grado de efectividad del modelo en esta fase, no compromete la simulación del contenido de agua del suelo durante la fase central, en la cual los flujos de transpiración son mayores y por lo tanto más importantes para los objetivos de la relación crecimiento – disponibilidad del agua.

El análisis estadístico de la simulación en dos sitios con características diferentes Caviaga (49,5% arena 17,9% arcilla) y Cerese (21,4% arena 34,6% arcilla) muestra que en ambas situaciones los valores del contenido de agua en el suelo simulados son mayores a los observados en la realidad destacándose el aumento de las diferencias en las medidas realizadas a mayor profundidad (0,4m – 1,0m) (Bonfante et al., 2010).

Se encuentran ciertas discrepancias entre los resultados de los trabajos revisados en cuanto a la simulación de la variación del agua en el suelo, por lo que se podrían obtener en este sentido diversos resultados dependiendo de las características del suelo del ensayo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El trabajo experimental se realizó en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía (32°22' S 58°03' W), ubicada sobre la ruta 3 Km. 363, Departamento de Paysandú, República Oriental del Uruguay. El trabajo contó con dos años de ensayos de campo (2009-10 y 2010-11) en donde se instalaron parcelas experimentales con el objetivo de realizar las mediciones necesarias que permitan calibrar y validar el modelo de simulación CropSyst para 2 variedades por especie de maíz y sorgo.

Los suelos del sitio corresponden a Brunosoles eutrícos y subeutrícos, sobre la formación Fray Bentos, y unidad de suelos San Manuel según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976).

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

No existió un diseño experimental en particular, sino que se seleccionaron sitios de muestreo dentro de las parcelas en los cuales se realizan las mediciones necesarias para conocer las características de suelo y la disponibilidad inicial de agua y nitrógeno. La variabilidad buscada en los sitios tuvo el objetivo de generar una base de datos lo suficientemente heterogénea que permita lograr la calibración del modelo. Las unidades experimentales fueron 24, compuesta cada una por una parcela sembrada por cultivo.

De los ensayos se obtuvieron datos de biomasa, índice de área foliar, absorción de nitrógeno, contenido de agua en el suelo, y del rendimiento de cada cultivar en las diferentes épocas de siembra y momentos del ciclo. El ensayo se repitió dos zafas consecutivas y se utilizaron los resultados de un año para calibrar y los del año siguiente para validar el modelo.

Los cultivares de maíz sembrados fueron MASS 494 y DK 670, y los de sorgo MS 109 y MS 102. Algunas características de estos materiales se detallan a continuación:

MASS 494: Híbrido simple, ciclo intermedio, color del grano anaranjado claro de textura dura, excelente rendimiento potencial y estabilidad muy buena.

DK 670: Híbrido simple, ciclo semiprecoz, color del grano anaranjado/amarillento.

MS 102: Híbrido de ciclo intermedio de muy alto potencial de rendimiento en grano, color del grano rojo, destacado perfil sanitario, bajo contenido de taninos condensados.

MS 109: Híbrido de muy alta producción de grano y materia verde, muy bueno para silaje, color del grano marrón, alto contenido de taninos condensados.

3.3 MANEJO EXPERIMENTAL

Se realizaron un total de 3 fechas de siembra por cultivar y por año, y la distribución de las mismas se presentan el cuadro siguiente.

Cuadro No. 2. Fechas de siembra para cada año

	Fecha de siembra		
	Época 1	Época 2	Época 3
Año 2009/10	13 noviembre	8 diciembre	8 enero
Año 2010/11	18 octubre	10-24 noviembre	13 diciembre

Todos los cultivos fueron sembrados en líneas a una distancia de 0,52m. Se fertilizaron todas las parcelas de maíz y sorgo a la siembra con 7-40-0 a 140 Kg ha⁻¹ y luego en un lapso de 30 a 45 días se refertilizó con urea a 200 Kg ha⁻¹ intentando evitar restricciones nutricionales. Se mantuvo a los cultivos libre de plagas, malezas y enfermedades.

3.3.1 Determinaciones

- Se realizaron cortes del cultivo para conocer la producción de biomasa. Los momentos de muestreo fueron en los estados fenológicos V6, R1 y cosecha de cada cultivo. La biomasa cortada a campo fue secada a 60° hasta peso constante para conocer la materia seca. Estas mismas muestras fueron molidas para ser analizado su concentración de nitrógeno.
- Muestreo de suelo en el cual se obtienen los siguientes datos:
 - ❖ Profundidad del perfil
 - ❖ Densidad aparente
 - ❖ Textura
 - ❖ Contenido de materia orgánica.
 - ❖ Concentración de nitrógeno
 - ❖ Contenido de agua

Las muestras de suelo fueron realizadas al azar dentro de cada parcela. Los momentos de muestreo para concentración de nitrógeno y contenido de agua fueron en los estados de siembra, V6, R1 y cosecha de cada cultivo. Para esto se utilizó un barreno de 2 cm de diámetro y se hicieron 10 piques por unidad experimental en todo el perfil del suelo. El 50 % de la muestra fue secada a estufa a 60° hasta peso contante y se

utilizó para conocer el contenido de nitratos, el 50 % restante se secó en estufa a 105° hasta peso constante y con esto se estimó el contenido de agua.

La estimación de densidad aparente, textura y profundidad del perfil se realizó previo al inicio del experimento y para esto se utilizó un barreno de 5 cm de diámetro y se hicieron 3 piques por parcela fraccionando las muestras en las siguientes profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-más cm. Parte de la muestra fue tamizada a 2 mm, secada en estufa a 60 °C durante 48 horas y posteriormente se le realizó análisis de textura mediante el método de Bouyucous (1936) y materia orgánica con el método de Nelson y Sommers (1982). La submuestra restante fue utilizada para el cálculo de densidad aparente secándose a estufa de 105 °C durante 48 horas.

- Medición del índice de área foliar. Los momentos de muestreo fueron en los estados fenológicos V6, R1 y cosecha de cada cultivo. Para esto se utilizó el instrumental LAI - 2000.
- Cosecha de grano. Se cosecharon 2 metros lineales en dos filas separadas.

Los datos meteorológicos como temperatura, radiación, precipitaciones y humedad relativa fueron registrados por una estación meteorológica DAVIS ubicada en las cercanías del ensayo.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó una confrontación de valores simulados y observados para evaluar el ajuste del rendimiento en grano, y dinámica de desarrollo del índice de área foliar, y biomasa aérea así como la dinámica de agua y nitrógeno absorbido.

Se evaluaron los resultados mediante la apreciación de los gráficos simulado vs. observado en relación a la línea 1:1 y con una evaluación más objetiva y cuantitativa a través del RCME:

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_j)^2}{n}}$$

Dónde:

S: Corresponde con los valores obtenidos de la simulación.

O: Son los valores medidos en los sitios experimentales.

n: es el número de medidas recabadas.

3.4.1 Hipótesis estadística

- ❖ Ho: CropSyst estima correctamente el crecimiento y desarrollo del cultivo.
- ❖ Ha: CropSyst no estima correctamente el crecimiento y desarrollo del cultivo.

3.4.2 Criterios de decisión

Para evaluar los resultados se toma el siguiente criterio de decisión en base al valor de raíz cuadrado medio del error obtenido: excelente resultado (RCME 0 – 15%), aceptable resultado (RCME 16 – 25%) y mal resultado (RCME +26%).

3.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO CROPSYST

Se utilizó la versión 4.13.04 del año 2009 desarrollada por Stockle et al. (2009).

Para calibrar el modelo se compararon los resultados observados a campo y simulados por el modelo. Los datos relevados para cada parcela se agruparon según época de siembra y cultivar, utilizando el promedio de estos para realizar las comparaciones con los datos simulados en el modelo, de esta manera se reduce la probabilidad de utilizar datos que contengan errores en el muestreo. Los coeficientes genéticos de los cultivares necesarios para la modelación por CropSyst se obtuvieron de cuatro fuentes distintas: 1) mediciones obtenidas en los ensayos a campo; 2) valores citados en la bibliografía disponible; 3) por “default” (valor propuesto por el modelo), y 4) tomando el valor obtenido de la calibración, producto de correr el modelo hasta que el resultado de la predicción coincida con los valores obtenidos en los ensayos de campo, y corroborando que estos valores estén dentro de los posibles citados en la bibliografía. Comenzando por cargar los datos al modelo (clima, cultivar, suelo, manejo, etc.) se procedió a realizar la calibración. Luego de varias corridas del programa contrastando los resultados obtenidos en la simulación con los datos obtenidos en la realidad y modificando los coeficientes genéticos de los cultivares se logró llegar a un ajuste considerado aceptable según los métodos de evaluación utilizados.

3.6 VALIDACIÓN DEL MODELO

Se utilizaron los datos del año 2010/11 para la validación, corriendo el modelo sin cambiar los parámetros del cultivar calibrado para la información obtenida del año 2009/10.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERÍODO DEL ENSAYO

Las características climáticas de los dos años en los cuales se realizó el ensayo fueron contrastadas, lo que como se verá más adelante influyó los resultados obtenidos. Se presentan los datos de precipitaciones, temperatura y radiación dada su importancia para el desarrollo y crecimiento del cultivo.

4.1.1 Régimen pluviométrico

Las parcelas del trabajo fueron sembradas en seco, siendo las precipitaciones las que determinaron el nivel de agua disponible en el suelo para las plantas. Las precipitaciones en la zafra 2009/10 estuvieron por encima del promedio histórico en la mayoría de los meses del ciclo de los cultivos provocando excesos de humedad en momentos puntuales, no así en la zafra 2010/11 donde las lluvias estuvieron dentro del promedio e incluso por debajo de este, sin afectar la implantación pero pudiendo ocasionar déficit hídrico en algunos períodos de los cultivos (figura No. 2).

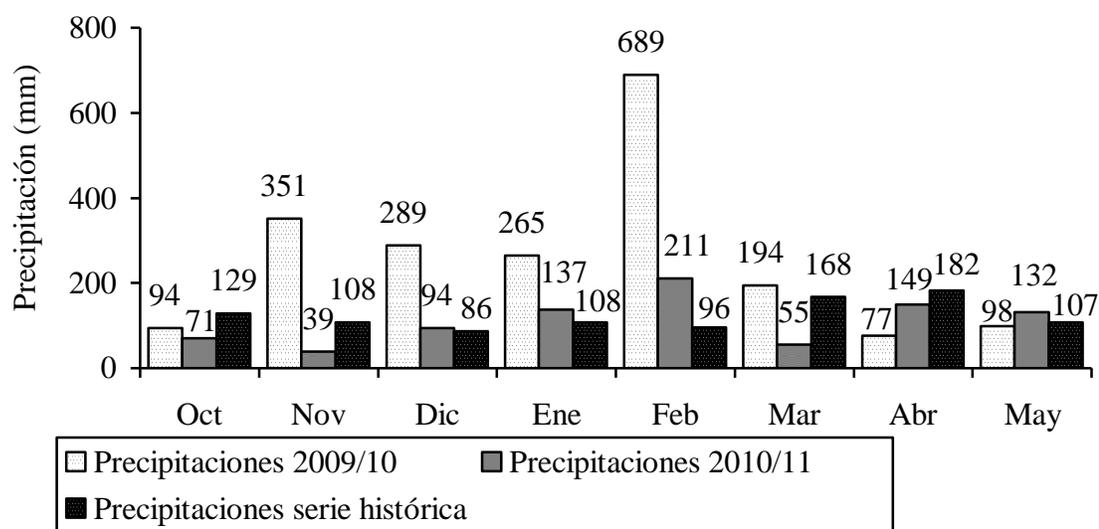


Figura 1. Precipitación mensual zafra 2009/10 y 2010/11 comparada con serie histórica 2002-08

Las gráficas presentadas a continuación comparan las precipitaciones decádicas en las dos zafra estudiadas con la serie histórica (2002/08) e indican para los cultivos de maíz y sorgo las tres épocas de siembra realizadas y los momentos aproximados de floración y cosecha.

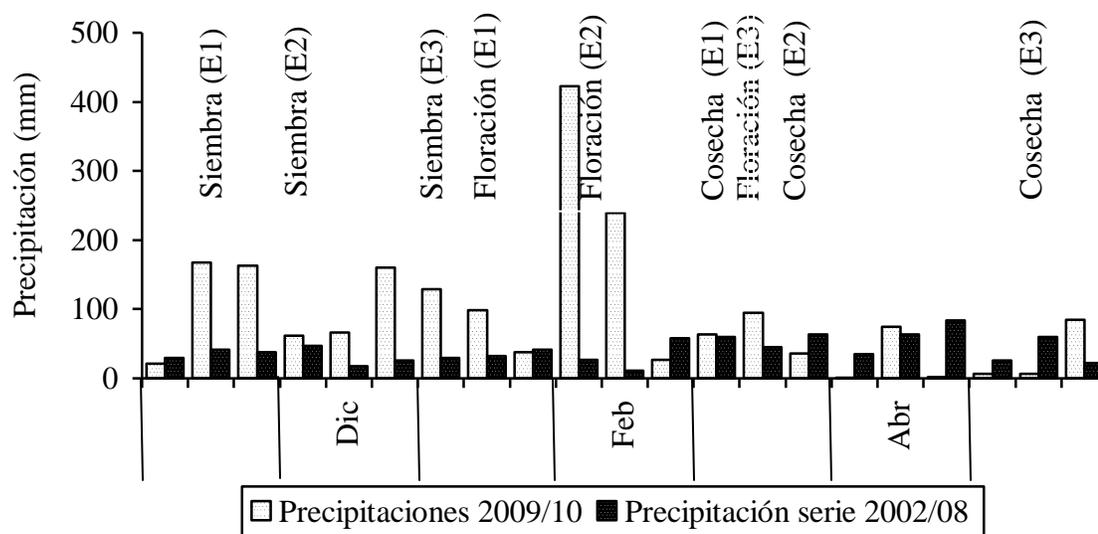


Figura 2. Precipitación decádica zafra 2009/10 comparada con serie histórica 2002-08

El total de precipitaciones en el periodo de noviembre a mayo en la zafra 2009/10 fue de 1964 mm considerablemente superior a los 971 mm del promedio histórico. Específicamente en el mes de febrero las precipitaciones alcanzaron los 689 mm siendo este valor cuatro veces superior al histórico. Este año el aporte de agua para los cultivos no parece haber sido limitante al menos el déficit y por el contrario en algún momento los excesos pueden haber afectado.

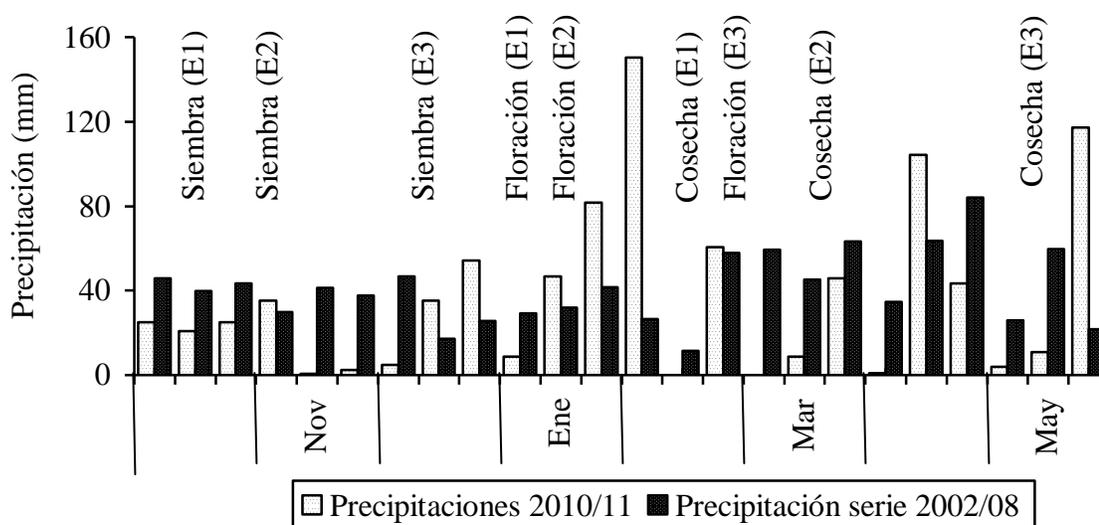


Figura 3. Precipitación decádica zafra 2010/11 comparada con serie histórica 2002-08

En contraparte la zafra siguiente (2010/11) se destaca la heterogeneidad en la distribución de las precipitaciones ocurridas en comparación con el promedio histórico, donde el 41,8 % de las precipitaciones totales ocurrieron en tres momentos puntuales (1ª quincena de febrero, 2ª de abril y 3ª de mayo) y en dos días 7-8 de febrero llovieron 141mm (15,8% del total). En los meses analizados las lluvias estuvieron un 19,3 % por debajo del promedio 887mm contra 1098mm (promedio histórico).

4.1.2 Régimen de temperatura

La temperatura ejerce una gran influencia en el desarrollo de los cultivos. Para maíz una mayor amplitud térmica, temperaturas diurnas entre 30 y 40°C acompañado de temperaturas nocturnas frescas (cerca a la T_b 8°C), determinan altas tasas de crecimiento durante el día y una mayor duración del ciclo del cultivo, traduciéndose en mayores producciones de biomasa e indirectamente mayores rendimientos a través del índice de cosecha (Giménez, 2011). En sorgo también la amplitud térmica afecta el rendimiento en grano, aunque su efecto es menor al observado en maíz (Carrasco, 1996).

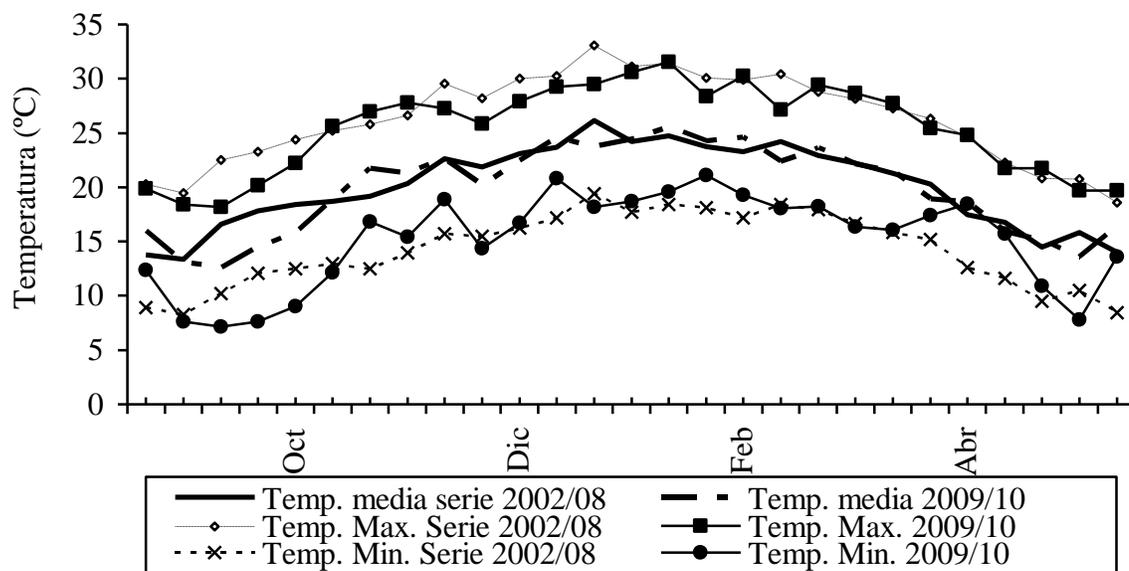


Figura 4. Temperatura zafra 2009/10 comparada con la serie histórica 2002-08

Teniendo en cuenta las temperaturas cardinales para maíz y analizando las ocurridas durante el periodo crítico (entorno a floración), la temperatura media para las tres épocas de siembra se ubicó en un rango levemente inferior al óptimo para el desarrollo y crecimiento del cultivo (23,9 - 24,3°C año 2009/10 en comparación con 25-30°C). Las máximas (28,5 - 30°C promedio) fueron inferiores a las tolerables por el cultivo mientras que las mínimas (18 - 19,3°C en promedio) fueron algo elevadas si las comparamos con una temperatura base de 8°C. Esto resultó en una baja amplitud térmica repercutiendo en el resultado final del cultivo. En sorgo el efecto de la amplitud térmica es menor a la observada en maíz siendo este cultivo más rustico, existe un efecto positivo directo sobre el crecimiento de la panoja hasta 27°C de temperatura media promedio por lo que dada las temperaturas registradas estas se mantuvieron por debajo del límite máximo de respuesta.

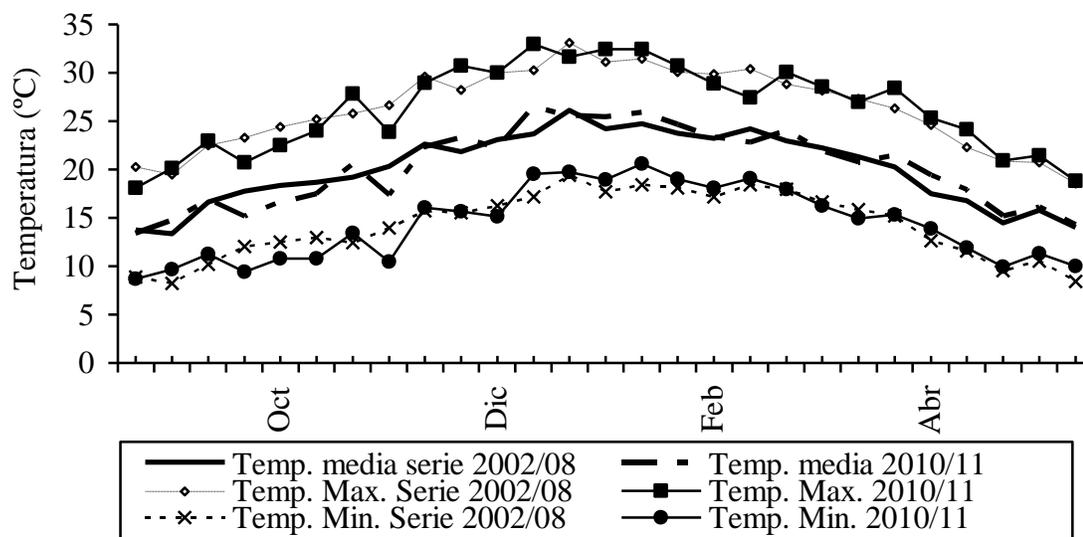


Figura 5. Temperatura zafra 2010/11 comparada con serie histórica 2002-08

En el año 2010/11 las temperaturas registraron mayor amplitud, registrándose valores de temperatura máxima superiores a las de la serie histórica y a su vez temperaturas mínimas inferiores a las de la serie. Estas condiciones térmicas podrían potencialmente haber propiciado mejores rendimientos por mayor producción de materia verde, pero condicionadas por los efectos de las menores precipitaciones mencionados anteriormente.

Para sorgo las temperaturas se encontraron dentro de los rangos óptimos, resultando que la temperatura promedio del mes de octubre se encontró cercana a la temperatura base (15°C) de este cultivo, lo que pudo provocar para la primera fecha de siembra retraso en la emergencia y desarrollo, sin apreciarse problemas en los resultados a campo.

4.1.3 Régimen de radiación

El promedio de radiación diaria del primer año del ensayo estuvo levemente por encima del promedio de la serie histórica ($18,8$ y $18,3 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ respectivamente) lo que determinó que la radiación total del periodo fuera un 2,7 % mayor que el promedio de la serie ($506,5$ vs $492,8 \text{ Mj m}^{-2}$ respectivamente). La excepción fue la primera década de febrero, donde los valores registrados de radiación promedio diario fueron $5,6 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ inferiores al promedio, coincidiendo con los momentos de mayores registros pluviométricos durante el ensayo (varios días de alta nubosidad). En la figura siguiente se muestra la evolución de la radiación a lo largo del ciclo de los cultivos para la época 2009/10.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

La zona dónde se realizó el experimento permitía separar tres zonas topográficas contrastantes, y por lo tanto con características de suelo diferentes, las cuáles se detallan a continuación.

Cuadro No. 3. Características generales de los suelos

Suelo	Prof. Ef. (cm)	Textura %			M.O %	D. Ap.(Mg -m ³)
		Limo	Arcilla	Arena		
Bajo	0-5	54,1	28,65	17,25	2,9	1,3
Bajo	5-10	52,95	26,75	20,3	2,3	1,3
Bajo	10-20	49,5	28,5	22	2,1	1,4
Bajo	20-30	49,5	24,5	26	1,8	1,1
Bajo	30-50	47,5	28,5	24	1,2	1,3
Bajo	50-70	38	45	17	0,8	1,2
Bajo	70-100	38	45	17	0,4	1,2
Medio	0-5	47,8	29,8	22,5	2,5	1,4
Medio	5-10	46,2	30,5	23,3	2,1	1,4
Medio	10-20	43,8	32,7	23,5	1,8	1,3
Medio	20-30	35,5	45,5	19,0	1,3	1,2
Medio	30-50	33,0	51,5	15,5	1,0	1,2
Medio	50-70	42,3	41,5	16,3	0,6	1,2
Alto	0-5	50,4	30,0	19,6	2,5	1,4
Alto	5-10	46,0	27,9	26,1	2,3	1,2
Alto	10-20	44,0	30,0	26,0	2,0	1,3
Alto	20-30	43,1	34,4	22,5	1,7	1,1
Alto	30-50	35,5	45,5	19,0	1,3	1,1
Alto	50-70	39,3	44,0	16,7	0,8	1,2

Las distintas posiciones topográficas se diferencian en textura, profundidad, materia orgánica (%MO) y densidad aparente (D. Ap.). La zona baja de la ladera es la más profunda llegando a los 100cm, posee una textura más limosa y principalmente en los primeros centímetros del suelo se diferencia por el mayor contenido de %MO y menor D. Ap. Las partes medio y alto son similares y las mayores diferencias en los primeros centímetros se atribuyen a la textura, más arenosa en el medio en comparación al alto, lo que puede asociarse al menor contenido de %MO que presenta la zona medio en relación a las otras, posiblemente consecuencias de los procesos erosivos que se magnifican en esa área.

4.3 CULTIVO DE MAÍZ

4.3.1 Resultados productivos

En esta sección se presentaran los resultados obtenidos en el campo para las variables de mayor relevancia durante ambas zafras de evaluación. Esto permitirá analizar la variabilidad lograda, lo cual era un objetivo para generar heterogeneidad que permita evaluar el comportamiento del modelo en distintos ambientes y condiciones climáticas.

4.3.1.1 Rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha

A continuación se presentan los resultados obtenidos a campo en cuanto a rendimiento en grano, producción de biomasa para los tres momentos relevados (V6, floración y cosecha) e índice de cosecha.

Cuadro No. 4. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha zafra 2009/10

Maíz 2009		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	7254	9560	5047	1535	21
Biomasa (Kg ha ⁻¹)	V6	3668	5131	2573	735	20
	Floración	10676	13705	7138	2284	21
	Cosecha	20325	26019	13832	3048	15
	Índice cosecha	0,37	0,48	0,24	0,08	21

Analizando los resultados destacamos en primer lugar que el año 2010/11 presento mayor heterogeneidad comprobado por el mayor valor en el coeficiente de variación (cuadro No. 5). Las dos primeras épocas de siembra en este año sufrieron déficit hídrico en noviembre y diciembre debido a la escasa precipitación en estos meses, lo que provoco la menor producción en biomasa aérea, siendo en el año 2009/10 mayor para los tres momentos estudiados (V6, floración y cosecha). El menor índice de cosecha observado en la primera zafra (0,37 vs. 0,40) reduce la brecha en rendimiento entre ambos años ya que este parámetro resulta de la división entre la biomasa total a cosecha sobre el rendimiento en grano. Las siembras más tempranas presentan IC mayores en comparación con siembras más tardías, debido a las mejores condiciones climáticas (temperatura y radiación solar) que presentan las primeras durante el periodo crítico produciendo incremento en la materia seca depositada en grano (Giménez, 2011).

Cuadro No. 5. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha zafra 2010/11

Maíz 2010		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	6184	10473	2692	2304	37
Biomasa (Kg ha ⁻¹)	V6	943	1297	646	175	19
	Floración	8006	11308	4406	1920	24
	Cosecha	15850	24237	8058	5432	34
	Índice cosecha	0,40	0,54	0,22	0,08	21

4.3.1.2 Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) fue relevado para el primer año en los estados de V6, floración y madurez fisiológica, muestreándose al año siguiente en V2, V10, floración y madurez fisiológica, los resultados se presentan a continuación.

Cuadro No. 6. Resultados de índice de área foliar zafra 2009/10

Maíz 2009		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
IAF (m ² m ⁻²)	V6	2,04	2,74	1,36	0,53	26
	Floración	2,40	2,56	2,26	0,12	5
	Mad. Fisiológica	2,28	2,50	2,15	0,15	7

En esta característica se aprecia claramente como al inicio de la etapa de crecimiento (siembra-V10) se corresponden valores más bajos de este parámetro y el valor de este aumenta a medida que el cultivo continúa su crecimiento (cuadro No. 6 y 7). Los resultados que corresponden al primer año del ensayo poseen valores mayores contra los del segundo año, esto hace referencia a las mejores condiciones hídricas del 2009/10 con respecto al 2010/11.

Cuadro No. 7. Resultados de índice de área foliar zafra 2010/11

Maíz 2010		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
IAF (m ² m ⁻²)	V2	0,75	0,96	0,58	0,16	21
	V10	1,50	1,84	1,17	0,47	32
	Floración	1,42	1,58	1,32	0,14	10
	Mad. Fisiológica	1,74	1,97	1,51	0,33	19

La evolución de la biomasa y el IAF en el tiempo para el periodo 2010/2011 presenta un incremento mayor a medida que la época de siembra es más tarde (figura No. 8), con temperaturas favorables para el crecimiento vegetativo y mejores condiciones hídricas de la fecha más tardía (E3) frente a las más tempranas (E1, E2) las cuales sufrieron en los meses de noviembre y diciembre escasas lluvias las cuales provocaron un crecimiento menor, lo que se puede observar en el siguiente gráfico.

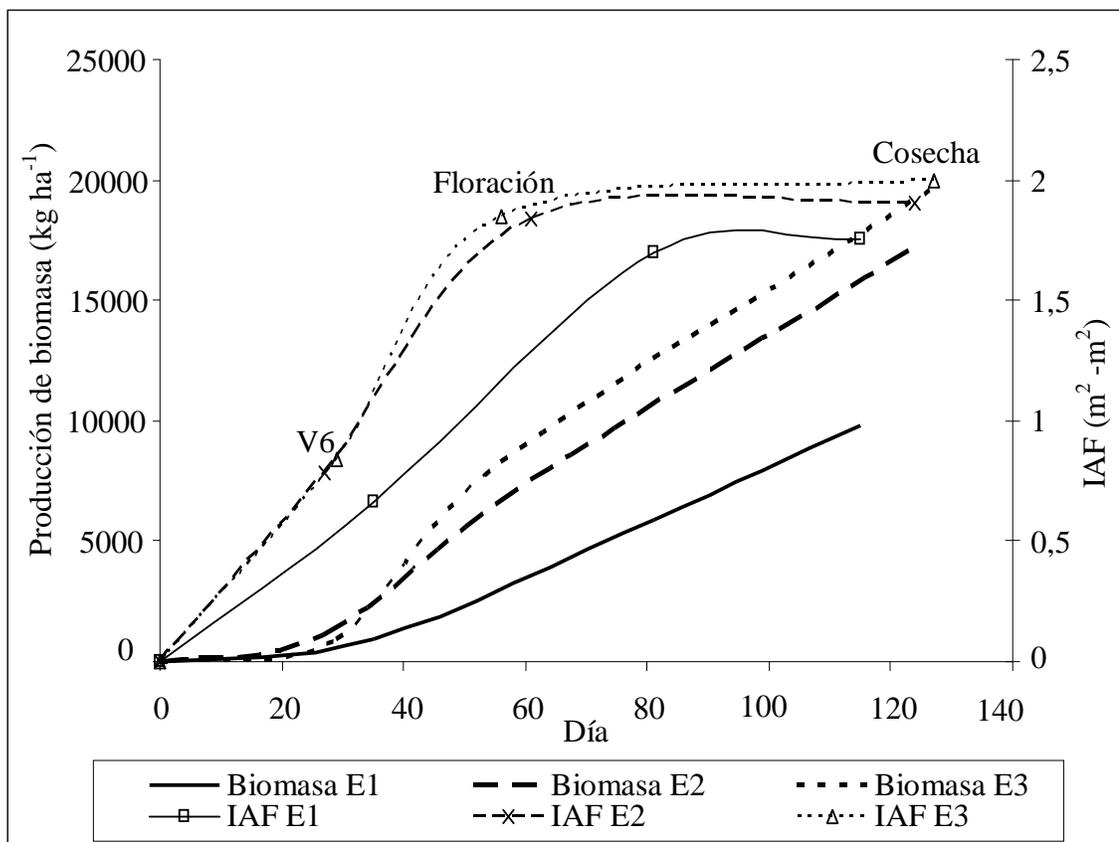


Figura 8. Evolución de la biomasa aérea y el IAF para las tres épocas de siembra año 2010/2011

Para maíz en condiciones normales fechas de siembras tardías provocan elevado crecimiento inicial, mayor altura de planta, alta deposición de materia seca en la etapa vegetativa, y menor fijación de materia seca en las etapas reproductivas por condiciones de menor radiación solar y temperatura provocando resultados negativos en el rendimiento en grano y acortando el ciclo del cultivo (Giménez, 2011). Los resultados observados en la figura No. 9 demuestran como era de esperar que el atraso en la fecha de siembra determino un reducción en el periodo V6 – floración, si se compara el largo del ciclo total se puede cometer un error ya que la medida de cosecha no representa el momento exacto de madurez fisiológica. Los bajos valores de IAF en las siembras

tempranas son atribuidos a las bajas temperaturas y a las deficiencias hídricas en los primeros meses del ciclo que pudieron afectar el crecimiento de los cultivos en las siembras tempranas.

4.3.1.3 Nitrógeno absorbido

La concentración de nitrógeno en planta es similar para los dos años, disminuyendo a medida que avanzan los cultivos en su ciclo fenológico, lo cual es esperable por el mecanismo de dilución.

Cuadro No. 8. Resultados Nitrógeno zafra 2009/10

Maíz 2009		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
[N] en planta ($\mu\text{g N/g}$)	V6	0,03	0,04	0,02	0,007	24
	R1	0,01	0,02	0,01	0,003	20
	Madurez fisiológica	0,01	0,01	0,01	0,001	14
N en planta (Kg ha^{-1})	V6	69	124	16	38	56
	R1	107	186	23	58	54
	Madurez fisiológica	197	259	110	42	21

Las diferencias en la cantidad de N en planta depende de la producción de biomasa de las mismas siendo mayor en el primer año del ensayo donde las condiciones hídricas fueron mejores. Las diferencias entre las distintas muestras en la primera zafra son importantes, con variaciones de 108Kg ha^{-1} a 163 Kg ha^{-1} entre máximo y mínimo para V6 y R1 respectivamente demostrando alta heterogeneidad en los resultados.

Cuadro No. 9. Resultados Nitrógeno zafra 2010/11

Maíz 2010		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
[N] en planta ($\mu\text{g N g}^{-1}$)	V6	0,03	0,05	0,03	0,004	11
	R1	0,02	0,02	0,01	0,003	16
	Madurez fisiológica	0,01	0,01	0,01	0,001	20
N en planta (Kg ha^{-1})	V6	30	45	12	9	31
	R1	140	214	96	32	23
	Madurez fisiológica	196	335	132	68	35

En la zafra 2010/11 el desvío muestra que las diferencias más importantes se dan en madurez fisiológica con una brecha de 203 Kg ha⁻¹ entre máximo y mínimo, representando la mayor diferencia en los dos años de estudio.

4.3.1.4 Agua total en suelo

Los suelos en los que se realizó el ensayo presentan como característica general que el contenido inicial de agua a siembra era similar a capacidad de campo por tratarse de siembras sobre barbecho químico durante la primavera.

Cuadro No. 10. Resultados agua zafra 2009/10

Maíz 2009			Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
Agua en suelo (mm)	V6	0 - 30 cm	125	155	102	18	14
		+ 30 cm	174	207	149	18	10
	Floración	0 - 30 cm	112	145	66	26	23
		+ 30 cm	152	182	117	16	11
	Mad. Físio.	0 - 30 cm	112	133	86	17	15
		+ 30 cm	146	176	131	13	9

Las precipitaciones ocurridas en la primera zafra (2009/10) fueron abundantes (capítulo 4.1.1 régimen pluviométrico) por lo que el contenido de agua en el suelo para todos los estadios fenológicos y el total del perfil del suelo es abundante determinando que no se encuentren restricciones hídricas por déficit para los cultivos.

Cuadro No. 11. Resultados agua zafra 2010/11

Maíz 2010			Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
Agua en suelo (mm)	V6	0 - 30 cm	74	98	52	12	16
		+ 30 cm	130	158	90	21	16
	Floración	0 - 30 cm	82	151	13	37	45
		+ 30 cm	132	177	90	26	20
	Mad. Físio.	0 - 30 cm	78	112	52	18	24
		+ 30 cm	119	151	81	19	16

Los valores de agua en el suelo para el año 2010/11 son menores a los observados en la zafra anterior, con valores mínimos en el periodo crítico del cultivo de maíz (en torno a floración) que podrían afectar el rendimiento de los mismos.

4.3.2 Calibración de maíz

En el cuadro siguiente se muestran los valores de algunos parámetros genéticos utilizados por el modelo y considerados más relevantes, los cuales fueron modificados para lograr que el modelo ajuste a los resultados de campo.

Cuadro No. 12. Parámetros ajustados que lograron la mejor calibración en Maíz, obteniendo los datos de (B) información bibliográfica, (D) valor default, (M) medido en el campo, (C) calibrado

PARÁMETRO	Fuente	MASS 494	DK 670
Crecimiento:			
Coef. de conversión transpiración/biomasa (kPa kg m ⁻³)	B	7	6
Ef. de uso de la radiación (g MJ ⁻¹)	B	4	4
Hoja:			
Índice de área foliar verde inicial (m ² m ⁻²)	C	0,066	0,011
Índice de área foliar máximo esperado (m ² m ⁻²)	B	6	5
Área foliar específica (m ² kg ⁻¹)	C	21	20
Coef. de partición tallo/hoja	C	2,8	3
Duración del área foliar (°C d ⁻¹)	C	900	900
Fracción del IAF max. a madurez fisiológica	D	0,9	0,9
Raíz:			
Profundidad máxima de raíces (m)	D	1,8	1,8
Transpiración:			
Coef. de extinción de la radiación	C	0,5	0,5
Coef. de evapotranspiración máximo	B	1,1	1,1
Consumo máximo de agua (mm d ⁻¹)	B	14	14
Potencial hídrico inicio del cierre estomático (J kg ⁻¹)	B	-1200	-1200
Potencial hídrico para marchitamiento foliar (J kg ⁻¹)	B	-1800	-1800
Fenología:			
Emergencia (°C d ⁻¹)	M	90	90
Fin de crec. vegetativo (°C d ⁻¹)	M	850	850
Inicio de floración (°C d ⁻¹)	M	930	930
Inicio de llenado (°C d ⁻¹)	M	1030	1030
Madurez fisiológica (°C d ⁻¹)	M	1720	1720
Tiempo térmico acumulado:			
Temperatura base (°C)	B	8	8
Temperatura máxima (°C)	B	30	30
Cosecha:			
Índice de cosecha	C	0,45	0,45

4.3.2.1 Calibración de fenología

Los valores precargados en Cropsyst de fenología para un cultivar estándar no lograron ajuste con los datos reales, para lograr una correcta modelación se modificaron los requerimientos térmicos de cada fase fenológica y luego de varias corridas se lograron resultados satisfactorios para los dos cultivares.

Cuadro No. 13. Fenología año 2009 maíz cultivar DK 670

DK 670	Est. Fenológico	Época 1	Época 2	Época 3
Observado	Emergencia	19-nov	12-dic	12-ene
Simulado		16-nov	13-dic	13-ene
Observado	Floración	13-ene	1-feb	1-mar
Simulado		11-ene	3-feb	4-mar
Observado	Mad.	2-mar	16-mar	2-may
Simulado	Fisiológica	28-feb	25-mar	3-may

Se destaca que la mayor diferencia fue de solo 9 días y sin tomar en cuenta este valor, las diferencias no superan los 3 días, se obtuvo similitud para todos los estados fenológicos relevados.

Cuadro No. 14. Fenología año 2009 maíz cultivar MASS 494

MASS 494	Est. Fenológico	Época 1	Época 2	Época 3
Observado	Emergencia	19-nov	12-dic	12-ene
Simulado		18-nov	13-dic	13-ene
Observado	Floración	13-ene	1-feb	1-mar
Simulado		13-ene	3-feb	4-mar
Observado	Mad.	1-mar	16-mar	2-may
Simulado	Fisiológica	1-mar	25-mar	3-may

Se puede ajustar fácilmente la fenología en el programa, en este caso sin estar activada la rutina de fotoperiodo. La simulación es correcta para los dos cultivares y en las tres épocas estudiadas.

4.3.2.2 Calibración biomasa aérea e índice de área foliar

La biomasa aérea se considera la variable más importante para la simulación del modelo, la misma está condicionada por el desarrollo del área foliar la que determina la interceptación de radiación y condiciona la energía solar disponible para el crecimiento. Si

la biomasa logra un ajuste razonable, es altamente probable que la evolución del contenido de agua en el suelo y el nitrógeno absorbido por el cultivo logren una buena representación. Entonces si las variables anteriores representan la realidad, el rendimiento en grano tendrá una adecuada estimación, ya que su valor resulta de ajustar el índice de cosecha para el cultivar simulado. A continuación se presentan los resultados para los dos cultivares de maíz analizando los estados fenológicos representativos del periodo vegetativo - reproductivo y cosecha.

Cuadro No. 15. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V7 – R1 cultivar MASS 494

MASS 494						
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2	
1	22-dic	V7	4175	4702	277867	
2	16-ene	V8	2934	4854	3688158	
1	13-ene	R1	11561	13156	2543709	
3	11-mar	R2	8401	9999	2553163	
Media			6768	8178	2265724	
					n	4
					CME	2265724
					RCME	1505
					RelRCME	22

Para las etapas vegetativas y reproductivas los valores simulados son mayores a los observados, las medidas obtenidas en las fechas más extremas (22 – dic; 11 – mar) del periodo de relevamiento son las que presentan mayor similitud, el valor obtenido de RCME 22% se considera aceptable.

Cuadro No. 16. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V7 – R1 cultivar DK 670

DK 670						
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2	
1	22-dic	V7	3406	4072	442906	
2	13-ene	V7	4158	3818	115623	
1	13-ene	R1	13043	12060	966527	
3	11-mar	R2	9699	9999	89518	
Media			7577	7487	403643	
					n	4
					CME	403643
					RCME	635
					RelRCME	8

El mejor resultado en la calibración de biomasa aérea se obtuvo para el cultivar DK 670 en las medidas en las fases vegetativas y reproductivas, con resultados excelentes dado el valor de RCME 8%.

Cuadro No. 17. Calibración de biomasa aérea cultivar MASS 494 a cosecha

MASS 494					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
1	11-mar	Cosecha	20785	19987	635988
2	17-mar	Cosecha	20404	18073	5433363
3	03-may	Cosecha	22703	16057	44169335
Media			21297	18039	16746229
n					3
CME					16746229
RCME					4092
ReIRCME					19

Las diferencias en la última observación (cosecha) para el cultivar MASS 494 disminuyen en comparación a las otras medidas en 3%, aumentando las diferencias en los momentos de cosecha más tardíos, lográndose resultados de calibración aceptables (cuadro No. 17).

Cuadro No. 18. Calibración de biomasa aérea cultivar DK 670 a cosecha

DK 670					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
1	11-mar	Cosecha	18223	16872	1823931
2	17-mar	Cosecha	19568	17286	5208003
3	03-may	Cosecha	20268	16057	17727201
Media			19353	16738	8253045
n					3
CME					8253045
RCME					2873
ReIRCME					15

Para DK 670 en cosecha se califica el resultado como aceptable a pesar de aumentar las diferencias frente a las evaluaciones del periodo vegetativo. Para las tres épocas estudiadas el programa produce menor biomasa que la observada y las diferencias aumentan de 1351Kg ha⁻¹ hasta 4210Kg ha⁻¹ a medida que se atrasa la fecha de cosecha (cuadro No. 18) lo que puede estar explicado por problemas sanitarios en los ensayos sembrados más tardíamente.

Las predicciones del programa muestran que en las fases vegetativas y reproductivas la producción de biomasa en la mayoría de los casos se encuentra por encima de lo observado, esto debido a que para alcanzar resultados aceptables en las medidas a cosecha el modelo debió simular un crecimiento mayor en las etapas iniciales. La excelente concordancia en el cultivar DK 60 tal vez se deba a su menor producción de biomasa a cosecha permitiendo que el programa alcance dichos valores sin tener que aumentar la producción en V6 y R1. Considerando la variabilidad existente los resultados son más que aceptables.

Cuadro No. 19. Calificación de la calibración de biomasa aérea en cultivares de maíz

Cultivar	Biomasa aérea (Est. Fenológico)	Observado	Simulado	RelRCME	Calificación
MASS 494	V6	3555	4778	40	*
MASS 494	R1	9981	11577	16	**
MASS 494	Cosecha	21297	18039	19	**
DK 670	V6	3782	3945	14	***
DK 670	R1	11371	11029	6	***
DK 670	Cosecha	19353	16738	15	***

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

La calibración del índice de área foliar fue considerada incorrecta debido a que para los diferentes momentos fenológicos relevados, todas las épocas estudiadas y para los dos cultivares se encontró que el modelo sobrestimó el crecimiento de esta variable en comparación con los datos observados. Estas diferencias para la simulación global del cultivo parecen no ser relevantes debido a que valores superiores al IAF óptimo (95% de la radiación interceptada) no producen aumento de la acumulación de biomasa porque la intercepción de radiación no incrementa en forma lineal con el área foliar, por lo tanto puede ser la razón por la cual el modelo predice correctamente la biomasa aérea a pesar de la diferencia obtenida entre valores simulados y observados para la variable IAFv.

Cuadro No. 20. Calificación de la calibración del IAF en cultivares de maíz

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Calificación
MASS 494	IAF ($m^2 m^{-2}$)	2,2	4,2	95	*
DK 670	IAF ($m^2 m^{-2}$)	2,2	4,2	91	*

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Sobre esta variable es importante continuar trabajando tanto en el ajuste del modelo como en el método de estimación, ya que además de los problemas del modelo, es posible que existan problemas en la estrategia de evaluación utilizada.

4.3.2.3 Calibración del nitrógeno en planta

El nitrógeno en planta es simulado por el modelo de mala manera obteniéndose valores de %Rel. RCME entre 30% y 32% considerando las tres épocas y los dos cultivares.

Cuadro No. 21. Calificación de la calibración del N en planta en cultivares de maíz

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Calificación
MASS 494	N en planta (Kg ha^{-1})	154	181	30	*
DK 670	N en planta (Kg ha^{-1})	141	181	32	*

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Analizando los datos encontramos que valores simulados y observados similares de biomasa aérea presentan diferencias en cantidad de N en Kg. ha^{-1} , por lo que se demuestra que el programa simula una concentración de N en planta diferente al real.

La absorción de N por el cultivo de maíz desde siembra a V6 (sexta hoja expandida) es baja, encontrándose valores cercanos a los 25 Kg ha^{-1} (Giménez, 2011). Los valores observados en el trabajo se encuentran por encima de los propuestos por la bibliografía ($84 - 95 \text{ Kg ha}^{-1}$ MASS 494; $67 - 105 \text{ Kg ha}^{-1}$ DK 670) y para todos los casos los valores simulados fueron superiores a los reales ($121 - 126 \text{ Kg ha}^{-1}$ MASS 494; $119 - 122 \text{ Kg ha}^{-1}$ DK 670). En cultivos sin deficiencias mayor cantidad de nutrientes en planta determinan mayor biomasa, contradiciendo los resultados presentados, donde a pesar de los valores de absorción de N superiores se simulan valores de biomasa aérea similares e inferiores a los observados.

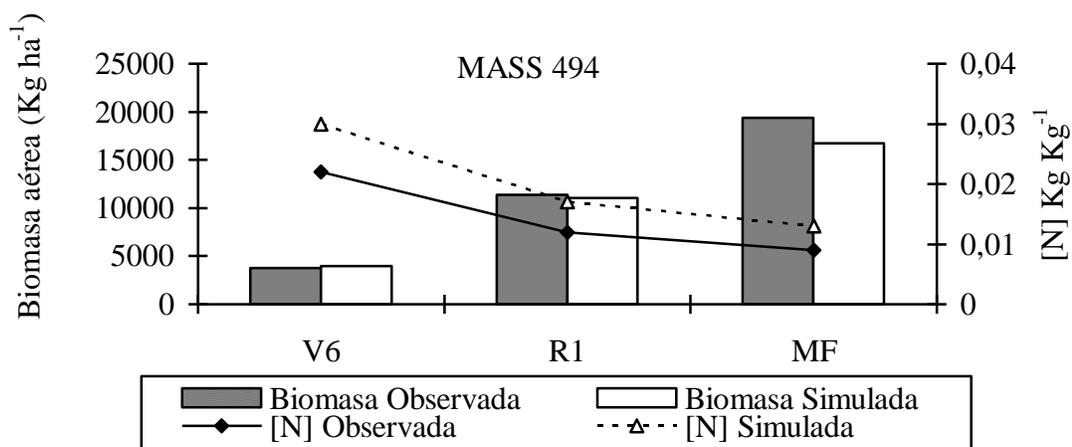


Figura 9. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MASS 494 en la calibración de maíz

Para el estado de cosecha los valores simulados de N absorbido se encuentran dentro del rango propuesto por la bibliografía (250 Kg ha⁻¹ aprox.) y con producciones de biomasa aérea dentro de las esperadas.

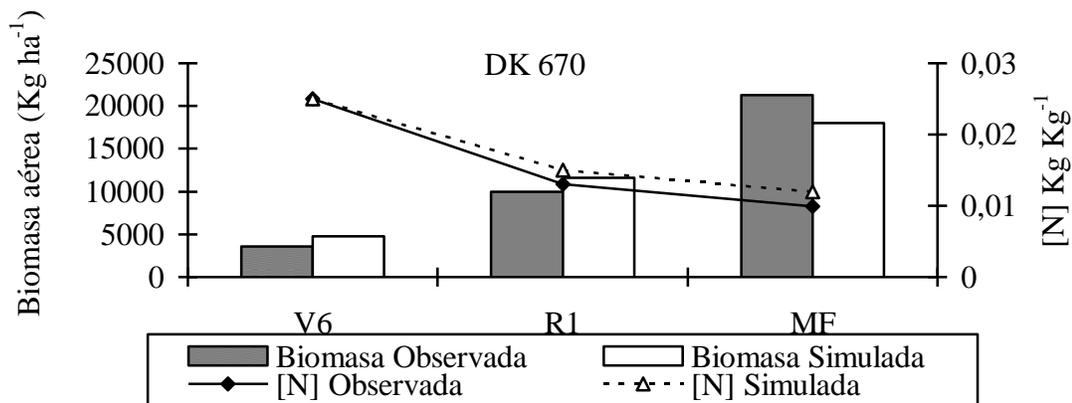


Figura 10. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar DK 670 en la calibración de maíz

Existe una mayor concentración de N en planta a lo largo de todo el ciclo para ambos cultivares sin incrementar la producción de biomasa necesariamente, permitiendo plantear la hipótesis de un consumo de lujo por parte del cultivo simulado.

4.3.2.4 Calibración de agua en el suelo

Para ambos cultivares el agua en el suelo simulada en los primeros 30cm se sitúa en un rango que varía de 72 a 94mm cuando en la realidad los valores presentan mayor variación. En la simulación se destaca que disminuyen las diferencias en las medidas a cosecha pero los resultados se consideran malos debido a los valores de RCME obtenidos en ambos casos.

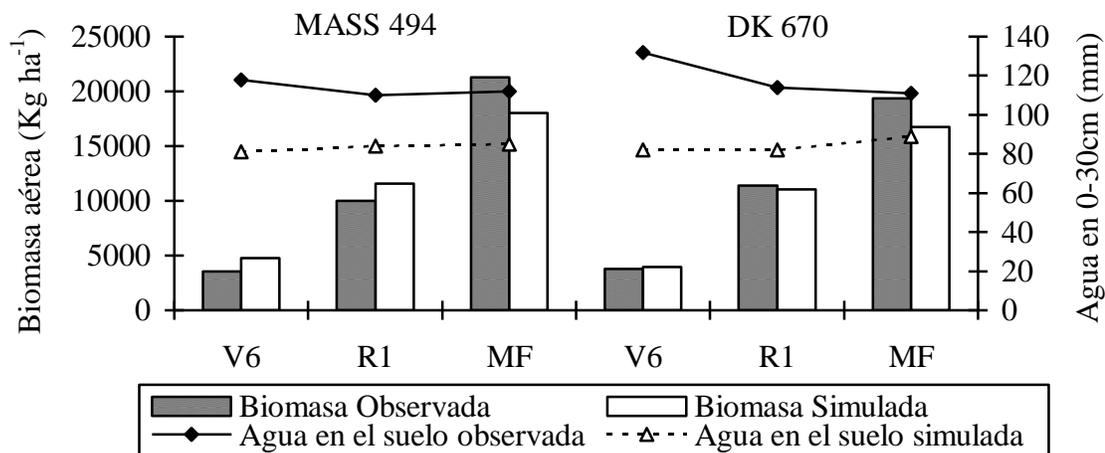


Figura 11. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para calibración en ambos cultivares de maíz

Se encuentran resultados similares a los reportados por Ventrella y Rinaldi (1999) donde las medidas tomadas a mayor profundidad presentan similitud, logrando para el cultivar DK 670 a cosecha una simulación excelente con valor de RCME 7%.

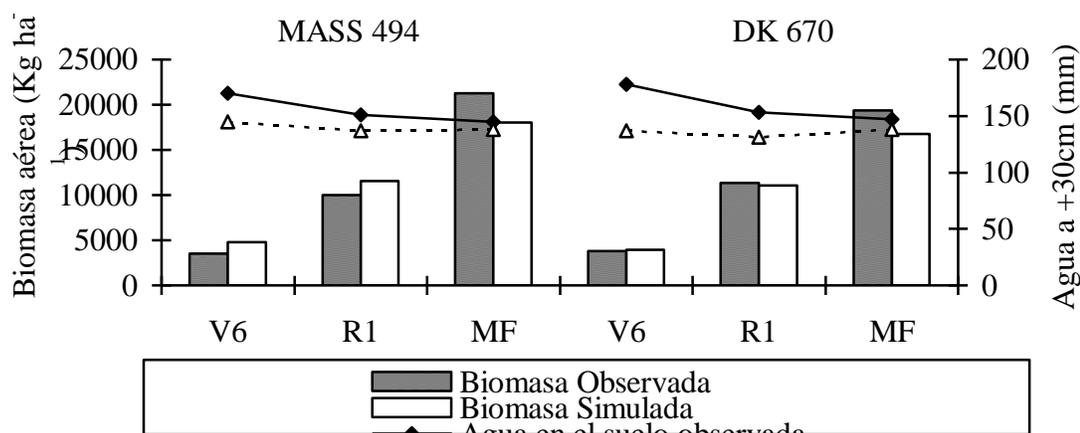


Figura 12. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para calibración en ambos cultivares de maíz

El agua en el suelo simulada para ambas profundidades se presenta por debajo de las reales, con producciones de biomasa aérea dentro del rango de las observadas para los dos cultivares. Se plantea la hipótesis de una menor eficiencia en el uso del agua por parte del modelo, donde para obtener las mismas cantidades de Kg ha⁻¹ de biomasa aérea se necesita absorber más agua, lo que se tratara de verificar en la validación.

4.3.2.5 Calibración del rendimiento

Los datos de rendimiento observados y simulados se compararon para conocer el grado de ajuste del modelo en este parámetro. Los cuadros No. 22 y 23 presentan estos resultados determinándose una excelente calibración para los dos cultivares de maíz dado los valores de %Rel. RCME obtenidos (DK 670 7%, MASS 494 14%).

Cuadro No. 22. Calibración de rendimiento cultivar DK 670

DK 670				
Época	Fecha	Observado	Simulada	(S-O)2
1	11 - mar	6314	7083	592096
2	17 - mar	5650	5724	5377
3	3 - may	7159	7166	40
Media		6374	6658	80114
			n	3
			CME	199171
			RCME	446
			ReIRCME	7

Las diferencias entre los valores simulados por el programa y los observados son escasas (cuadro No. 22) representadas por el valor de RCME 7%, destacando que en todos los casos Cropsyst sobrestima los resultados y estas diferencias son mayores hacia las fechas más tempranas. Esto es lo opuesto a lo ocurrido en biomasa aérea a cosecha, donde los valores son subestimados y las diferencias son mayores en las fechas más tardías. La explicación para estos resultados se encuentra en el índice de cosecha, el cual en la simulación es mayor para todos los casos, determinando que valores menores de biomasa en las fechas más tardías produzcan valores similares en rendimiento en grano, y contrariamente valores de biomasa aérea similares para fechas tempranas llevan a diferencias mayores en el rendimiento.

Cuadro No. 23. Calibración de rendimiento cultivar MASS 494

MASS 494				
Época	Fecha	Observado	Simulada	(S-O) ²
1	11 - mar	7054	6902	23104
2	17 - mar	8005	7878	16062
3	3 - may	9067	7166	3614601
Media		8042	7315	1217922
			n	3
			CME	1217922
			RCME	1104
			ReIRCME	14

En el cultivar MASS 494 las diferencias son mayores y estas contrariamente a lo ocurrido en el otro cultivar aumentan hacia las fechas más tardías alcanzando para la medida del 3 de mayo una variación de 1901Kg ha⁻¹ lo que representa el 20% del valor observado.

Este ajuste indicaría que el modelo es robusto y que su adaptación a las condiciones del experimento fue exitosa, pudiendo predecir la producción de grano en términos medios de manera adecuada.

4.3.3 Validación de maíz

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de validación, en donde los parámetros calibrados son probados con los datos obtenidos en el año 2010/11. En la etapa de calibración, se logró que el modelo copiara de forma aceptable las curvas de producción de biomasa, considerada la variable más importante para lograr un correcto ajuste en el rendimiento. El índice de área foliar no fue calibrado adecuadamente, pero considerando la radiación interceptada la que determina la energía disponible para el cultivo se relativiza el error dado que no afecto la producción de biomasa.

En esta etapa como en la calibración los datos relevados para cada parcela se agruparon según época de siembra y cultivar, utilizando el promedio de estos para realizar las comparaciones con los datos simulados en el modelo, de esta manera se reduce la probabilidad de utilizar datos que contengan errores en el muestreo.

El ciclo fenológico observado para ambos cultivares de maíz contrastado con las fechas simuladas demuestran al igual que en la etapa de calibración una correcta aproximación del modelo.

Cuadro No. 24. Validación fenología cultivar MASS 494

MASS 494	Est. Fenol.	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3
Observado	Emergencia	21-oct	15-nov	15-dic
Simulado		26-oct	18-nov	18-dic
Observado	Floración	28-dic	13-ene	7-feb
Simulado		26-dic	10-ene	3-feb
Observado	Madurez	28-ene	14-mar	13-abr
Simulado		9-feb	25-feb	27-mar

Las mayores diferencias encontradas en la etapa de madurez se atribuyen a que los datos observados no corresponden específicamente al momento de madurez fisiológica sino que estas fechas corresponden al día de cosecha de los cultivos.

Cuadro No. 25. Validación fenología cultivar DK 670

DK 670	Est. Fenol	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3
Observado	Emergencia	21-oct	15-nov	15-dic
Simulado		26-oct	18-nov	18-dic
Observado	Floración	28-dic	10-ene	7-feb
Simulado		26-dic	10-ene	3-feb
Observado	Madurez	16-feb	13-mar	24-abr
Simulado		9-feb	25-feb	26-mar

La biomasa aérea simulada para MASS 494 en los estados vegetativos y reproductivos presenta diferencias importantes con la realidad, con valores de RCME 39% calificando la validación como mala. Los datos con fecha más temprana para ambos estadios son los que presentan mayor brecha, con diferencias de 2006Kg ha⁻¹ y 3018Kg ha⁻¹ en V6 y floración respectivamente, siendo estos los únicos valores que se encuentran por encima de la realidad.

Cuadro No. 26. Validación biomasa aérea estados fenológicos vegetativos y reproductivos cultivar MASS 494

MASS 494					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
1	29-nov	V6	963	2969	4023890
2	15-dic	V6	1098	749	122288
3	12-ene	V6	963	867	9342
1	29-dic	Floración	5858	8876	9105445
2	10-ene	Floración	7520	6493	1054618
3	07-feb	Floración	8295	7426	756107
Media			4116	4563	2511948
n					6
CME					2511948
RCME					1585
ReIRCME					39

Los resultados de DK 670 son considerados excelentes para todos los estados fenológicos con resultados de RCME 15%. En la mayoría de los casos el modelo predice valores inferiores a los reales, igual que en el cultivar anterior las diferencias son mayores en las primeras observaciones, presentando valores de 14 y 24 puntos porcentuales de diferencia para floración y V6 respectivamente.

Cuadro No. 27. Validación biomasa aérea estados fenológicos vegetativos y reproductivos cultivar DK 670

DK 670					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
2	15-dic	V6	851	1061	44136
3	12-ene	V6	841	867	671
1	29-dic	Floración	9629	8216	1995520
2	10-ene	Floración	8297	7641	429490
3	07-feb	Floración	8438	7424	1026379
Media			5611	5042	699239
n					5
CME					699239
RCME					836
ReIRCME					15

El resultado de la última medida para MASS 494 se considera excelente (cuadro No. 25), encontrando que el modelo continúa con las mismas diferencias que en las

medidas anteriores (estados vegetativo y reproductivo) en donde en la primera fecha observada el valor es superior al real y en las medidas posteriores está por debajo.

Cuadro No. 28. Validación biomasa aérea para cosecha cultivar MASS 494

MASS 494					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
1	28-ene	Cosecha	9821	10031	44209
2	15-mar	Cosecha	17146	14606	6452761
3	14-abr	Cosecha	19642	17176	6081560
Media			15537	13938	4192843
n					3
CME					4192843
RCME					2048
ReIRCME					13

Para la última medida del cultivar DK 670 el modelo subestimó la producción de biomasa en la fecha más temprana y la sobrestimo en las posteriores. La mayor similitud se alcanzó en los valores obtenidos en las fechas más extremas (16 - feb y 25 - abr) de las mediciones (cuadro No. 26).

Cuadro No. 29. Validación biomasa aérea para cosecha cultivar DK 670

DK 670					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
1	16-feb	Cosecha	8348	8759	169695
2	14-mar	Cosecha	19765	15956	14509738
3	25-abr	Cosecha	17875	17011	746072
Media			15329	13909	5141835
n					3
CME					5141835
RCME					2268
ReIRCME					15

En resumen y en términos medios el modelo presentó inconvenientes en la simulación del crecimiento inicial del cultivo como se determinó en la calibración, mejorando los resultados en esta zafra debido a una menor producción de biomasa aérea en la realidad, lo que determina que el modelo representa mejor la realidad en años malos. Las diferencias se reducen en la medida que el cultivo crece, alcanzando un grado de precisión aceptable.

En la etapa de calibración no se logró una correcta modelización del IAF para ambos cultivares repitiendo los mismos resultados en la etapa de validación, demostrando que los diferentes datos de entrada para ambos años no repercutieron en la simulación sino que el programa realiza un ajuste erróneo para esta característica o que la forma de cuantificar el resultado a campo no fue correcto. Las diferencias no son en un momento puntual en el ciclo de los cultivos sino que se mantiene para todos los periodos relevados.

Cuadro No. 30. Calificación de la validación del IAF en cultivares de maíz

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Calificación
MASS 494	IAF ($m^2 m^{-2}$)	1,5	3,1	100	*
DK 670	IAF ($m^2 m^{-2}$)	1,1	3,1	181	*

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Los valores de N en planta no presentaron un ajuste aceptable, con valores de %Rel. RCME superiores al 25%. En cambio cuando se promedian los resultados para todas las épocas y periodos relevados los resultados se asemejan, posibilitando la utilización de este dato como indicador de la absorción de N promedio en el ciclo del cultivo.

Cuadro No. 31. Calificación de la calibración del N en planta en cultivares de maíz

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Calificación
MASS 494	N en planta ($Kg ha^{-1}$)	96	103	38	*
DK 670	N en planta ($Kg ha^{-1}$)	101	104	28	*

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Para ambos cultivares la simulación de la época 1 en el estado de V6 presenta un contenido de N en planta superior al observado cómo se destacó en la calibración, produciendo valores de biomasa aérea también superiores.

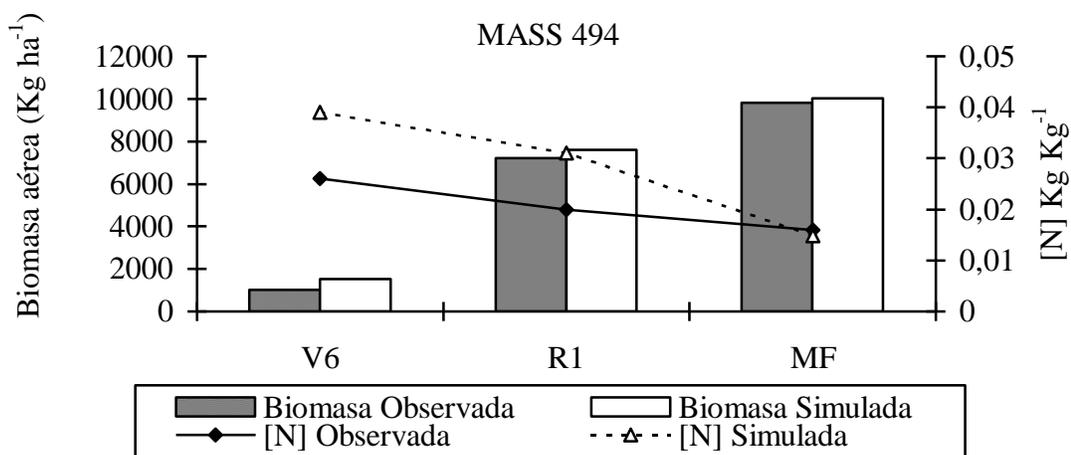


Figura 13. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MASS 494 en la validación de maíz

El programa simuló un ritmo de crecimiento mayor al real, más aun en las siembras tempranas, con elevada absorción del nutriente en los primeros días del ciclo del cultivo, situación que se corrige para las siembras tardías.

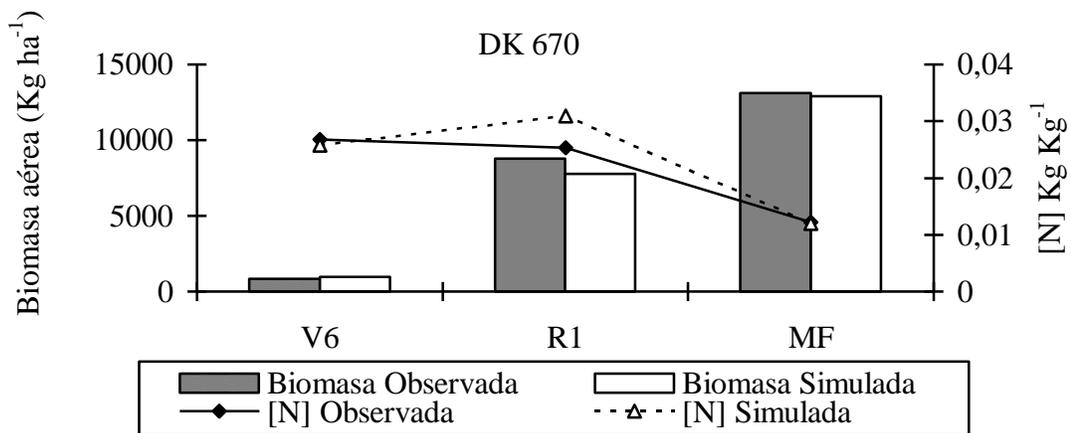


Figura 14. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar DK 670 en la validación de maíz

Los resultados en esta variable son similares en la calibración y validación, donde la concentración de N en planta es superior a la observada provocando las diferencias. Para confirmar esta hipótesis se podría aportar mayor cantidad de N al cultivo para analizar si el agregado del nutriente produce un incremento en la concentración del mismo sin aumentar la producción de biomasa (consumo de lujo).

La cantidad de agua en el suelo fue representada adecuadamente por el modelo lográndose resultados satisfactorios. En la calibración se destacó el problema de un perfil más seco en la simulación, atribuyendo el error a la menor eficiencia en el uso del agua, esto no se repite en el año 2010/11 a pesar de presentar como característica mayor temperatura media y menores precipitaciones.

Cuadro No. 32. Calificación de la validación del agua en el suelo en cultivares de maíz

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Calificación
MASS 494	Agua (mm) 0-30 cm	68	77	21	**
MASS 494	Agua (mm) +30 cm	121	147	26	*
DK 670	Agua (mm) 0-30cm	87	85	9	***
DK 670	Agua (mm) +30cm	138	153	16	**

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

En los primeros cm del suelo la concordancia es mayor para el cultivar DK 670 encontrándose el valor más bajo de RCME 9% y destacando que la mayor diferencia es de solo 16mm. El programa con valores similares de agua mantuvo producciones de biomasa aceptables y a su vez mostró incremento en el IAF.

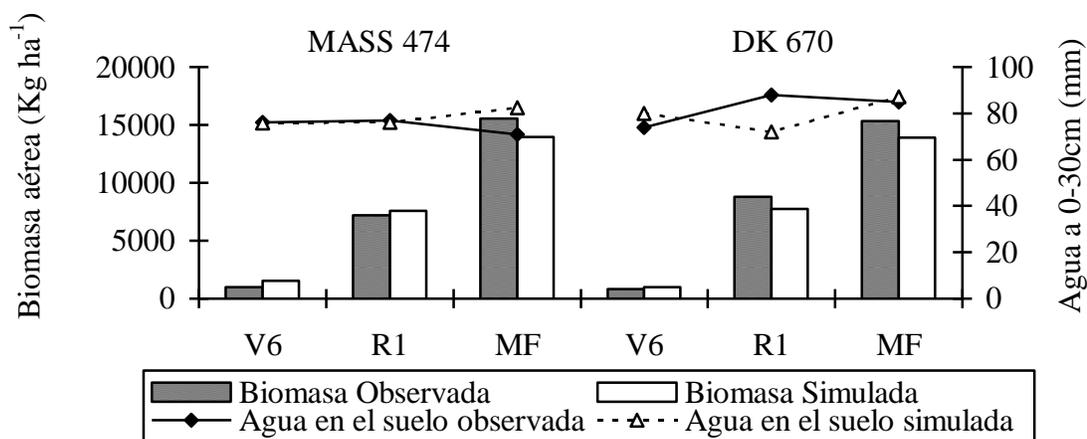


Figura 15. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para validación en ambos cultivares de maíz

La simulación muestra mayor contenido de agua en suelo que la realidad (Figura 16), lo que puede resultar en menor absorción de agua por las plantas pero esto no afectó la producción de biomasa, que como se mostró mantuvo simulaciones aceptables. En las medidas realizadas a la profundidad de más de 30cm también el cultivar DK 670 fue representado de mejor manera por el programa.

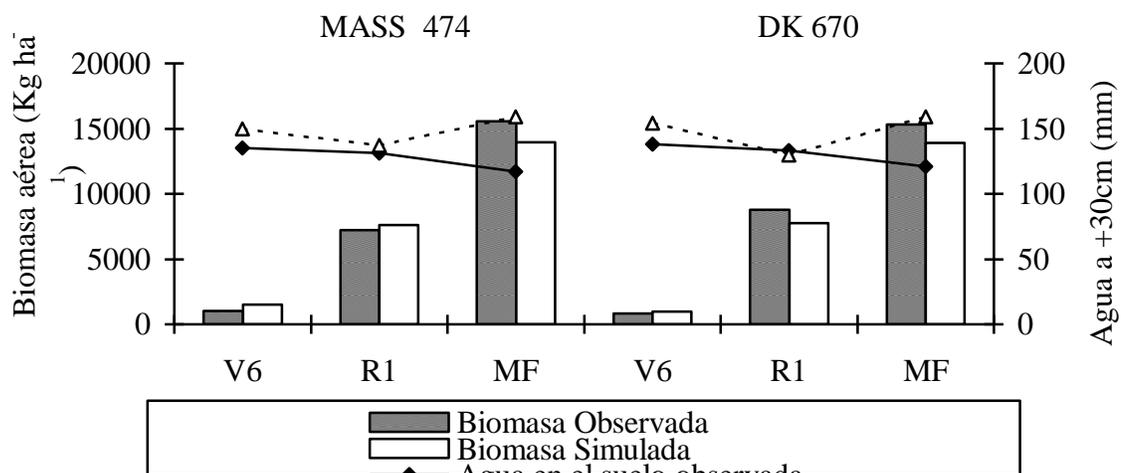


Figura 16. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para validación en ambos cultivares de maíz

El año 2010/11 se caracterizó por presentar mayor temperatura y menores precipitaciones que la zafra anterior, lo que haría esperar una simulación del perfil con menor contenido de agua, lo que confirmaría la hipótesis planteada en la calibración. Los resultados encontrados fueron opuestos, llevando a replantear la hipótesis y concluyendo que en el año más lluvioso (2009/10) los menores valores de agua en el suelo están originados por un mayor drenaje profundo y/o un mayor escurrimiento superficial simulado. Provocando así que el perfil no llegue a los valores reales pero aun manteniendo suficiente agua como para producir biomasa sin inconvenientes.

La variable de mayor importancia agronómica es el rendimiento en grano, el cual después de analizar todos los parámetros encontramos valores más alejados a la realidad que lo ocurrido en la calibración pero igualmente aceptables con %Rel. RCME que varían de 11% DK 670 y 15% MASS 494.

Cuadro No. 33. Calificación de la validación rendimiento en grano en cultivares de maíz

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Calificación
MASS 494	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	6740	7151	15	***
DK 670	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	6511	6227	11	***

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Las mayores diferencias se encuentran en el cultivar MASS 494 sembrado en la época 2, esto se debe a la heterogeneidad de los resultados obtenidos para este cultivar

en dicha época, para lo cual el modelo representa valores más homogéneos y con una tendencia a mayores producciones generando las diferencias. Los resultados son similares a los obtenidos en biomasa aérea y los valores extremos son representados de mejor manera. Reiterando lo ocurrido en el proceso de calibración el programa demuestra que frente a condiciones de bajo rendimiento (de 0 - 5000Kg ha⁻¹) el ajuste es mejor, manifestado por la aproximación a la lineal 1:1.

4.4 CULTIVO DE SORGO

4.4.1 Resultados productivos

4.4.1.1 Rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha

A continuación se presentan los resultados obtenidos a campo en cuanto a rendimiento en grano, producción de biomasa para los tres momentos relevados (V6, floración y cosecha) en la zafra 2009/10 y los dos momentos (floración y cosecha) en la zafra 2010/11 e índice de cosecha.

Cuadro No. 34. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha para la zafra 2009/10

Sorgo 2009		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	5915	8893	2787	1724	29
Biomasa (Kg ha ⁻¹)	V6	2849	3334	2346	459	16
	Floración	6959	9598	4116	1439	21
	Cosecha	16960	22125	11207	3135	18
	Índice cosecha	0,39	0,48	0,33	0,04	9

El rendimiento en grano fue menor en el primer año del estudio aunque este fue caracterizado por mejores condiciones hídricas, para ambas zafras el desvío y el coeficiente de variación se mantuvieron similares. La producción de biomasa aérea también fue menor en el año 2009/10 aunque para cosecha estas diferencias son menores observando los valores promedios.

Cuadro No. 35. Resultados de rendimiento, biomasa aérea e índice de cosecha para la zafra 2010/11

Sorgo 2010		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	6145	10352	4548	1782	29
Biomasa (Kg ha ⁻¹)	Floración	11191	13900	9193	1433	13
	Cosecha	15872	26162	10388	4476	28
	Índice cosecha	0,39	0,44	0,34	0,03	7

Los resultados para la zafra 2010/11 muestran un mayor desvío, excepto para el índice de cosecha el cual mantuvo valores cercanos para este año.

4.4.1.2 Índice de área foliar

El índice de área foliar para sorgo aumenta en los primeros estadios de desarrollo hasta floración y disminuye al momento de cosecha para ambas zafras.

Cuadro No. 36. Resultados de índice de área foliar zafra 2009/10

Sorgo 2009		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
IAF (m ² m ⁻²)	V6	2,79	4,32	1,19	0,9	32
	V10	4,14	5,02	2,97	0,6	15
	Floración	4,39	6,07	2,33	0,9	20
	Cosecha	3,94	5,43	2,26	1,0	24

Tomando como referencia el promedio el desvío obtenido en cosecha para los dos años es alto, indicando heterogeneidad en los resultados.

Cuadro No. 37. Resultados de índice de área foliar zafra 2010/11

Sorgo 2010		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
IAF (m ² m ⁻²)	Floración	4,9	5,2	4,5	0,3	7
	Cosecha	3,7	6,1	3,0	1,2	31

4.4.1.3 Nitrógeno absorbido

La concentración de nitrógeno en planta es similar para los dos años, disminuyendo a medida que avanzan los cultivos en su ciclo fenológico.

Cuadro No. 38. Resultados Nitrógeno zafra 2009/10

Sorgo 2009		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
[N] en planta ($\mu\text{g N g}^{-1}$)	V6	0,03	0,04	0,01	0,006	22
	R1	0,01	0,02	0,01	0,003	24
	Madurez fisiológica	0,01	0,01	0,01	0,001	12
N en planta (Kg ha^{-1})	V6	130	248	49	62	48
	R1	95	154	66	22	23
	Madurez fisiológica	199	277	130	46	23

Se encuentran diferencias importantes en la cantidad de Kg ha^{-1} de N en planta con variaciones entre zafras de hasta 100 Kg ha^{-1} y con discrepancias en el momento fenológico de mayor cantidad, siendo en la zafra 2009/10 en cosecha y para la zafra siguiente en floración (cuadro No. 31 y 32).

Cuadro No. 39. Resultados Nitrógeno zafra 2010/11

Sorgo 2010		Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
[N] en planta ($\mu\text{g N g}^{-1}$)	R1	0,02	0,02	0,01	0,002	12
	Madurez fisiológica	0,01	0,01	0,005	0,003	39
N en planta (Kg ha^{-1})	R1	192	255	139	42	22
	Madurez fisiológica	134	215	80	65	49

4.4.1.4 Agua total en suelo

Los suelos en los que se realizó el ensayo presentan como característica general que el contenido inicial de agua a siembra era similar a capacidad de campo por tratarse de siembras sobre barbecho químico durante la primavera.

Cuadro No. 40. Resultados agua en el suelo zafra 2009/10

Sorgo 2009			Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
Agua en suelo (mm)	0 - 30 cm	V6	119	140	102	10	9
		Floración	97	116	85	9	9
		Cosecha	114	195	76	28	24
	+ 30 cm	V6	170	190	154	11	7
		Floración	149	187	120	17	11
		Cosecha	157	190	127	19	12

Las precipitaciones ocurridas en la primera zafra fueron abundantes (capítulo 4.1.1 régimen pluviométrico) por lo que el contenido de agua en el suelo para todos los estadios fenológicos y el total del perfil del suelo es abundante determinando que no se encuentren restricciones hídricas por déficit para los cultivos.

Cuadro No. 41. Resultados agua en el suelo zafra 2010/11

Sorgo 2010			Promedio	Máximo	Mínimo	Desvío	Coef. Var. %
Agua en suelo (mm)	0 - 30 cm	V6	68	83	53	9	14
		Floración	66	91	48	13	20
		Cosecha	95	179	75	23	24
	+ 30 cm	V6	122	143	103	12	10
		Floración	104	131	72	14	14
		Cosecha	132	150	102	13	10

Los valores de agua en el suelo para el año 2010/11 son menores a los observados en la zafra anterior, pero no afectan por déficit el normal ciclo de los cultivos.

4.4.2 Calibración sorgo

En el cuadro siguiente se muestran los valores de algunos parámetros genéticos más relevantes los cuales fueron modificados para lograr que el modelo ajuste a los resultados de campo para el cultivo de sorgo.

Cuadro No. 42. Parámetros ajustados que lograron la mejor calibración en Sorgo, obteniendo los datos de (B) información bibliográfica, (D) valor default, (M) medido en el campo, (C) calibrado

PARÁMETRO	Fuente	MS 109	MS 102
Crecimiento:			
Coef. de conversión transpiración/biomasa (kPa kg m^{-3})	B	8	8
Ef. de uso de la radiación (g MJ^{-1})	B	3,5	3,5
Hoja:			
Índice de área foliar verde inicial ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)	C	0,011	0,011
Índice de área foliar máximo esperado ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)	B	8	8
Área foliar específica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)	C	24	24
Coef. de partición tallo/hoja	C	1,0	1,0
Duración del área foliar ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)	C	1200	1200
Fracción del IAF max. a madurez fisiológica	D	0,8	0,8
Raíz:			
Profundidad máxima de raíces (m)	D	1,7	1,7
Transpiración:			
Coef. de extinción de la radiación	C	0,5	0,4
Coef. de evapotranspiración máximo	B	1,1	1,1
Consumo máximo de agua (mm d^{-1})	B	12	12
Potencial hídrico al inicio del cierre estomático (J kg^{-1})	B	-1200	-1200
Potencial hídrico para marchitamiento foliar (J kg^{-1})	B	-1800	-1800
Fenología:			
Emergencia ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)	M	60	60
Fin de crec. vegetativo ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)	M	1200	1200
Inicio de floración ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)	M	1200	1200
Inicio de llenado ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)	M	1330	1500
Madurez fisiológica ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)	M	1650	1750
Tiempo térmico acumulado:			
Temperatura base ($^{\circ}\text{C}$)	B	8	8
Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	B	30	30
Cosecha:			
Índice de cosecha	C	0,5	0,5

4.4.2.1 Calibración de fenología

Al igual que lo observado para el cultivo de maíz, los valores precargados en Cropsyst de fenología para un cultivar estándar no lograron ajuste con los datos reales, para lograr una correcta modelación se modificaron los requerimientos térmicos de cada

fase fenológica y luego de varias corridas se lograron resultados satisfactorios para los dos cultivares.

Cuadro No. 43. Fenología año 2009 sorgo cultivar MS 109

MS 109	Est. Fenol	Época 1	Época 2	Época 3
Observado	Emergencia	17- nov	12- dic	13- ene
Simulado		16- nov	11- dic	11- ene
Observado	Floración	26- ene	9- feb	16- mar
Simulado		29- ene	19- feb	23- mar
Observado	Mad. Fisio.	10- mar	22- mar	10- may
Simulado		25- feb	20- mar	26- abr

Para emergencia se obtiene gran similitud, disminuyendo para floración y madurez fisiológica, con resultados diferentes según el cultivar y la época, aunque con una leve tendencia de mayor discrepancia a medida que se atrasa la fecha de siembra.

Cuadro No. 44. Fenología año 2009 sorgo cultivar MS 102

MS 102	Est. Fenol	Época 1	Época 2	Época 3
Observado	Emergencia	15- nov	12- dic	13- ene
Simulado		14- nov	11- dic	11- ene
Observado	Floración	19- ene	9- feb	6- mar
Simulado		28- ene	19- feb	23- mar
Observado	Mad. Fisio.	10- mar	22- mar	4- may
Simulado		2- mar	27- mar	9- may

Se puede ajustar fácilmente la fenología en el programa, en este caso sin estar activada la rutina de fotoperíodo. La simulación es correcta para los dos cultivares y en las tres épocas estudiadas.

4.4.2.2 Calibración biomasa aérea e índice de área foliar

Fue comentado en el capítulo de maíz la importancia de la correcta calibración de la biomasa aérea, a continuación se presentan los resultados para los dos cultivares de sorgo analizando por separado los estados fenológicos vegetativo – reproductivo y cosecha.

Cuadro No. 45. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V6 – R1 cultivar MS 109

MS 109					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O) ²
1	15 - dic	V6	2638	8483	34167791
1	26 - ene	R1	8842	11584	7517283
2	09 - feb	R1	5675	8094	5855212
3	17 - mar	R1	6596	12508	34951759
Media			5938	10167	20623011
n					4
CME					20623011
RCME					4541
ReIRCME					76

Los valores para los estados fenológicos de V6 y R1 en el cultivar MS 109 muestran una incorrecta calibración con valores para RCME de 76%. Las diferencias son amplias para ambas fases del ciclo destacándose en V6 una simulación 3,2 veces superior al observado.

Cuadro No. 46. Calibración de biomasa aérea estados fenológicos V6 – R1 cultivar MS 102

MS 102					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O) ²
1	15 - dic	V6	3060	7641	20991213
1	19 - ene	R1	6621	11490	23708942
2	09 - feb	R1	6615	10144	12454236
3	07 - mar	R1	7407	7472	4281
Media			5926	9187	14289668
n					4
CME					14289668
RCME					3780
ReIRCME					64

En el cultivar MS 102 para los primeros estadios relevados la calibración en general es mala, con resultados de malos a excelentes para floración, encontrando las mayores diferencias en el estado de V6 (cuadro No. 46).

Cuadro No. 47. Calibración de biomasa aérea MS 109 a cosecha

MS 109					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
1	11 - mar	Cosecha	14071	15765	2867569
2	23 - mar	Cosecha	20278	19438	705896
3	11 - may	Cosecha	15833	15627	42218
Media			16727	16943	1205228
n					3
CME					1205228
RCME					1098
ReIRCME					7

En cosecha para el cultivar MS 109 los resultados son excelentes con diferencias máximas de 1693Kg ha^{-1} lo que representa un 12% del valor observado.

Cuadro No. 48. Calibración de biomasa aérea MS 102 a cosecha

MS 102					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
2	23 - mar	Cosecha	18285	19245	920060
3	05 - may	Cosecha	16332	15486	714374
Media			17308	17365	817217
n					2
CME					817217
RCME					904
ReIRCME					5

Para el cultivar MS 102 la simulación en la última medida posee valores de RCME 5% considerados excelentes por la bibliografía.

Se observa la sobrestimación del programa para los primeros estadios del ciclo de los cultivos y la mayor aproximación para los datos obtenidos en cosecha. En esta variable para poder alcanzar valores excelentes en cosecha el modelo debió simular un crecimiento superior al real (similar a lo ocurrido en maíz), el resultado es malo si tomamos en cuenta todos los valores analizados y excelente si únicamente se toma en cuenta los datos en cosecha.

Cuadro No. 49. Clasificación de biomasa aérea para ambos cultivares de sorgo en la calibración

Cultivar	Biomasa aérea (Est. Fenol.)	Observado	Simulado	ReIRCME	Calificación
MS 109	V6	2638	8483	222	*
MS 109	R1	5487	9954	107	*
MS 109	Cosecha	16727	16943	7	***
MS 102	V6	3060	7641	150	*
MS 102	R1	6881	9702	50	*
MS 102	Cosecha	17308	17365	5	***

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

La calibración del índice de área foliar fue considerada incorrecta debido a que para los diferentes momentos fenológicos relevados, todas las épocas estudiadas y para los dos cultivares se encontró que el modelo sobrestimó el crecimiento de esta variable en comparación con los datos observados. Estas diferencias para la simulación global del cultivo parecen no ser relevantes debido a que valores superiores al IAF óptimo (95% de la radiación interceptada) no producen aumento de la acumulación de biomasa porque la intercepción de radiación no incrementa en forma lineal con el área foliar, por lo tanto puede ser la razón por la cual el modelo predice correctamente la biomasa aérea a pesar de la diferencia obtenida entre valores simulados y observados para la variable IAFv.

Cuadro No. 50. Clasificación de IAF para ambos cultivares de sorgo en la calibración

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	ReIRCME	Clasificación
MS 109	IAF (m ² m ⁻²)	3	11	217	*
MS 102	IAF (m ² m ⁻²)	4	10	196	*

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

4.4.2.3 Calibración del nitrógeno en planta

El nitrógeno en planta presenta resultados malos para los dos cultivares. Se simulan contenidos elevados de N en el estado de V6, los cuales se pueden asociar con la elevada producción de biomasa aérea, diferente a lo encontrado para el cultivar MS 102 el cual presenta bajos valores de N a pesar de los elevados valores de biomasa aérea. Agregando mayor discrepancia en los resultados se encontró que valores similares de N en planta en Kg ha⁻¹ presentan valores de simulación de biomasa a cosecha inferiores a los reales en MS 102.

Cuadro No. 51. Clasificación de N en planta para ambos cultivares de sorgo en la calibración

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Clasificación
MS 109	N en planta (kg ha^{-1})	125	145	38	*
MS 102	N en planta (kg ha^{-1})	148	149	33	*

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Presentando los valores promedios para todo el ciclo como se realizó en maíz, obtenemos resultados similares de N en planta, posibilitando la utilización de este dato como indicador de la absorción de N promedio en el ciclo del cultivo.

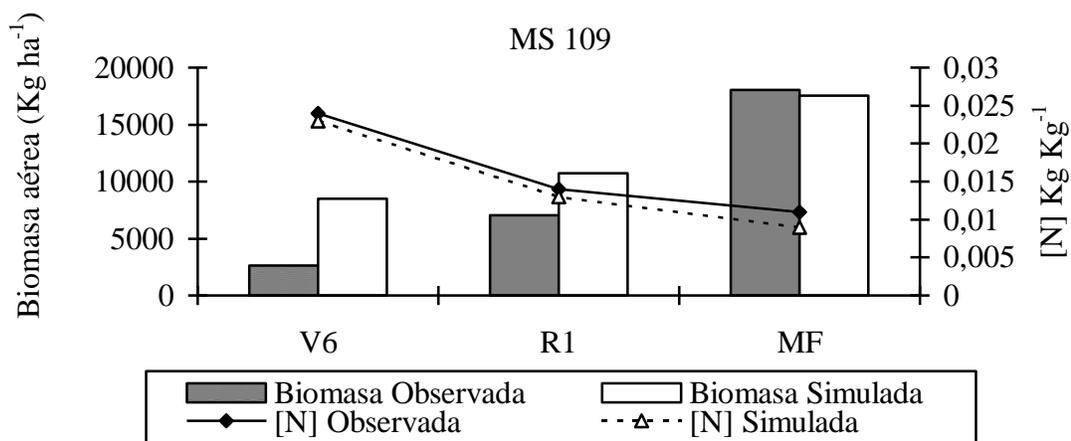


Figura 17. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 109 en la calibración de sorgo

La tendencia de la concentración de N para ambos cultivares es similar a la observada, las diferencias en la cantidad de N en planta se deben a la alta producción de biomasa aérea en los primeros estadios.

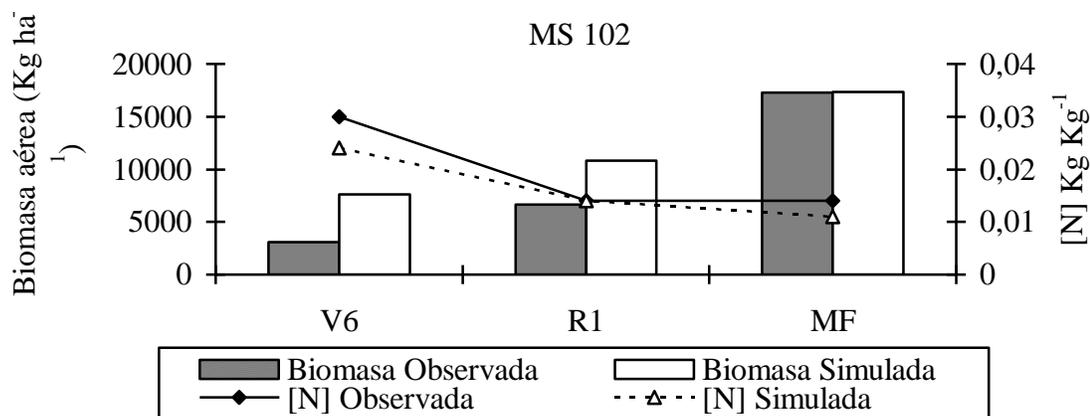


Figura 18. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 102 en la calibración de sorgo

4.4.2.4 Calibración del agua en el suelo

La nube de puntos para 0 – 30cm de profundidad muestra subestimación de resultados y el incremento de agua en el suelo observado no es acompañado por los valores simulados, los cuales se concentran entre 71mm y 98mm cuando en la realidad se observan valores máximos de 154mm.

Cuadro No. 52. Calificación de la calibración del agua en el suelo en cultivares de sorgo

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Clasificación
MS 109	Agua (mm) 0-30cm	115	85	29	*
MS 109	Agua (mm) +30cm	158	148	10	***
MS 102	Agua (mm) 0-30cm	107	89	21	**
MS 102	Agua (mm) +30cm	158	145	13	***

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Los resultados muestran menor cantidad de mm de agua en el suelo simulado, para ambos cultivares y para todos los momentos del ciclo relevados.

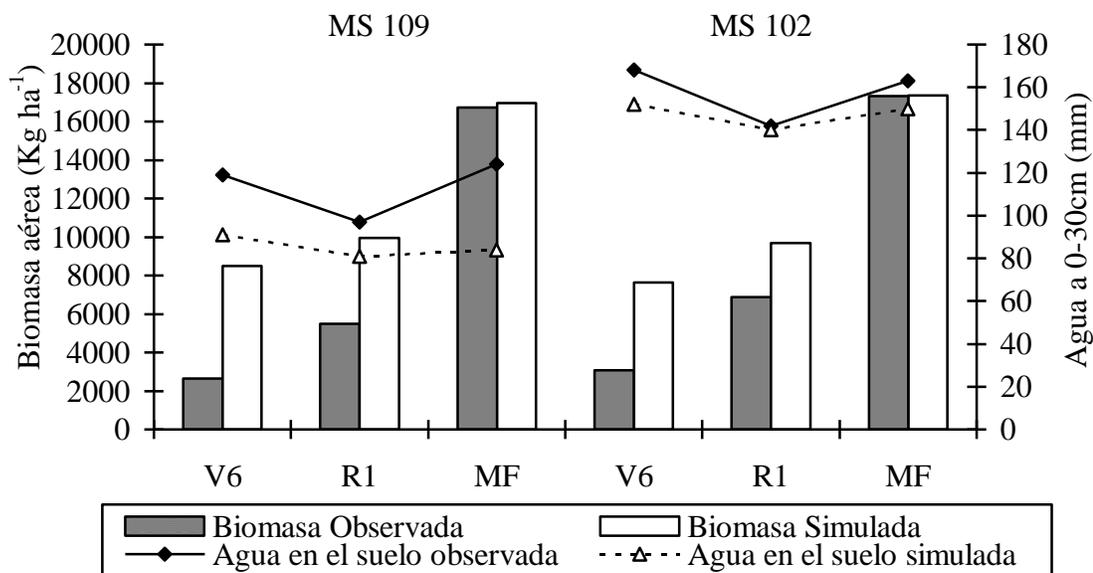


Figura 19. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para calibración en ambos cultivares de sorgo

En profundidad los puntos tienen cierta similitud con valores de RCME de 10% para MS 109 y 13% para MS 102 los cuales se consideran excelentes pero la concordancia no es máxima, ocurriendo algo parecido a lo encontrado en los primeros centímetros.

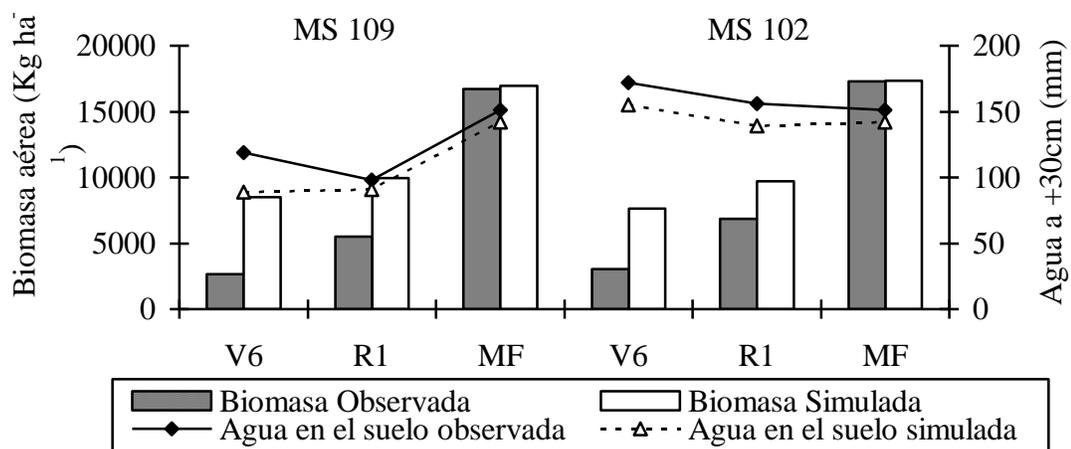


Figura 20. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para calibración en ambos cultivares de sorgo

Se propone para sorgo al igual que en maíz un posible mayor drenaje profundo y/o escurrimiento superficial por parte del modelo, lo que ocasiona un perfil más seco en un año lluvioso.

4.4.2.5 Calibración del rendimiento

Los datos de rendimiento observados y simulados se compararon para conocer el grado de ajuste del modelo. Los cuadros No. 42 y 43 presentan estos resultados determinándose una excelente calibración para los dos cultivares de sorgo dado los valores de %RelRCME obtenidos (MS 109 6%, MS 102 12%).

Cuadro No. 53. Calibración de rendimiento cultivar MS 109

MS 109				
Época	Fecha	Observado	Simulada	(S-O) ²
1	11 - mar	4758	4750	66
2	23 - mar	8047	8032	219
3	11 - may	6503	7175	452203
Media		6436	6652	46879
n				3
CME				150829
RCME				388
RelRCME				6

Para las dos primeras fechas del cultivar MS 109 la concordancia es excelente, las diferencias en la última medida es de apenas 672Kg ha⁻¹ lo que representa un 10% del valor observado.

Cuadro No. 54. Calibración de rendimiento cultivar MS 102

MS 102				
Época	Fecha	Observado	Simulada	(S-O) ²
1	11 - mar	3300	4080	609240
2	23 - mar	6906	7513	367745
3	5 - may	5976	6432	208407
Media		5394	6008	377600
n				3
CME				395131
RCME				629
RelRCME				12

El valor de RCME 12% en MS 102 es superior al encontrado en la calibración del otro cultivar de sorgo. En este caso las diferencias disminuyen a medida que las fechas de cosecha son más tardías y en todas las medidas la simulación representa valores superiores a los reales.

Este ajuste indicaría que el modelo es robusto y que su adaptación a las condiciones del experimento fue exitosa, pudiendo predecir la producción de grano en Kg ha^{-1} .

4.4.3 Validación sorgo

El ciclo fenológico observado para ambos cultivares de sorgo contrastado con las fechas simuladas demuestran al igual que en la etapa de calibración una correcta aproximación del modelo.

Cuadro No. 55. Validación fenología cultivar MS 109

MS 109	Est. Fenol.	Época 1	Época 2	Época 3
Observado	Emergencia	21-oct	15-nov	15-dic
Simulado		23-oct	15-nov	16-dic
Observado	Floración	10-ene	19-ene	16-feb
Simulado		8-ene	24-ene	20-feb
Observado	Madurez	21-feb	2-mar	28-abr
Simulado		2-feb	20-feb	21-mar

Las mayores diferencias encontradas en la etapa de madurez se atribuyen a que los datos observados no corresponden específicamente al momento de madurez fisiológica sino que estas fechas corresponden al día de cosecha de los cultivos

Cuadro No. 56. Validación fenología cultivar MS 102

MS 102	Est. Fenol.	Época 1	Época 2	Época 3
Observado	Emergencia	21-oct	15-nov	15-dic
Simulado		23-oct	15-nov	16-dic
Observado	Floración	13-ene	24-ene	22-feb
Simulado		9-ene	25-ene	20-feb
Observado	Madurez	25-feb	2-mar	28-abr
Simulado		8-feb	27-feb	29-mar

Para la etapa de validación se eliminaron los datos pertenecientes a la primera época de siembra de ambos cultivares debido a que obtuvieron problemas de plagas. La biomasa aérea se encuentra representada por el programa de forma aceptable, las

medidas tomadas hacia los extremos del trabajo fueron las que obtuvieron menor concordancia, por lo que difiere según la época de siembra el momento fenológico de mejor ajuste, siendo para la época 2 cosecha y para la época 3 floración.

Cuadro No. 57. Validación biomasa aérea estado reproductivo para MS 109

MS 109					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
2	24-ene	R1	12126	8247	15049676,6
3	22-feb	R1	11863	10975	788015,8
Media			11994	9611	7918846
n					2
CME					7918846
RCME					2814,0
RelRCME					23

Para MS 102 en el estado de R1 se obtienen valores de simulación inferiores a los observados, similar a lo ocurrido con el cultivar anterior, con la particularidad de que las mediciones mantienen las diferencias para ambas muestras situándose estas alrededor del 30% menos de Kg ha^{-1} de biomasa aérea. El valor de RCME 29% determina que la validación del programa para esta característica es mala.

Cuadro No. 58. Validación biomasa aérea estado reproductivo para MS 102

MS 102					
Época	Fecha	Est. Fenol.	Observado	Simulada	(S-O)2
2	19-ene	R1	10522	7132	11492468,6
3	16-feb	R1	10253	7757	6232015,2
Media			10388	7444	8862242
n					2
CME					8862242
RCME					2977,0
RelRCME					29

Se mantiene para todas las muestras una subestimación de los resultados, siendo para la medida del 24 de enero (R1) 32% y para el 29 de abril (cosecha) 27% inferiores a los valores reales.

Cuadro No. 59. Validación biomasa aérea estado cosecha para MS 109

MS 109					
Época	Fecha	Est. Fenol	Observado	Simulada	(S-O) ²
2	03-mar	Cosecha	18574	14976	12946077,5
3	29-abr	Cosecha	19937	14577	28725751,5
Media			19255	14777	20835914
n					2
CME					20835914
RCME					4564,6
ReIRCME					24

En el estado de cosecha se logró una mejor representación de la realidad disminuyendo el valor de RCME en 7% en comparación con el estado reproductivo. Los datos son sobrestimados en ambas mediciones con una menor diferencia para el cultivo con momento de cosecha más tardío.

Cuadro No. 60. Validación biomasa aérea estado cosecha para MS 102

MS 102					
Época	Fecha	Est. Fenol	Observado	Simulada	(S-O) ²
2	03-mar	Cosecha	12424	16247	14615680,0
3	29-abr	Cosecha	12553	14102	2399954,8
Media			12488	15175	8507817
n					2
CME					8507817
RCME					2916,8
ReIRCME					23

Lo expuesto anteriormente se visualiza en la lineal 1:1 entre la biomasa aérea simulada y observada en donde los valores para cosecha (momento de mayor importancia) son subestimados para el cultivar MS 109 y para MS 102 son sobrestimados. En este último caso parte de esta diferencia puede estar explicada por demoras en la cosecha y por tanto es posible que se hayan perdido hojas que determinaron una sobreestimación en los datos simulados que no pudo ser corregida modificando los parámetros del modelo. Mayor similitud se encontró para aquellos valores correspondientes a la época 3 con producción de biomasa aérea cercanos a los 12000Kg ha⁻¹.

El índice de área foliar fue calificado por tener una mala calibración y a pesar que el número de datos relevados en la validación pueden considerarse escasos, los

resultados coinciden con los obtenidos en la etapa anterior. Se mantiene para esta variable la sobreestimación de los valores reales alcanzando incluso cifras de 126% superior.

Cuadro No. 61. Clasificación del IAF para ambos cultivares de sorgo en la validación

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Clasificación
MS 109	IAF ($m^2 m^{-2}$)	3	7	95	*
MS 102	IAF ($m^2 m^{-2}$)	4	9	104	*

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

En la simulación del contenido de nitrógeno en planta para MS 109 las diferencias son importantes manteniéndose en un rango estrecho de valores ($159 - 166 Kg ha^{-1}$) cuando en la realidad los mismos presentaron mayor variación. En el estado reproductivo de este cultivar se corresponde la menor cantidad de N en planta con la menor producción de biomasa aérea. Para este parámetro se encuentran varias contradicciones resaltando que en los momentos de mejor ajuste de N los valores de biomasa aérea se alejan de los reales y viceversa.

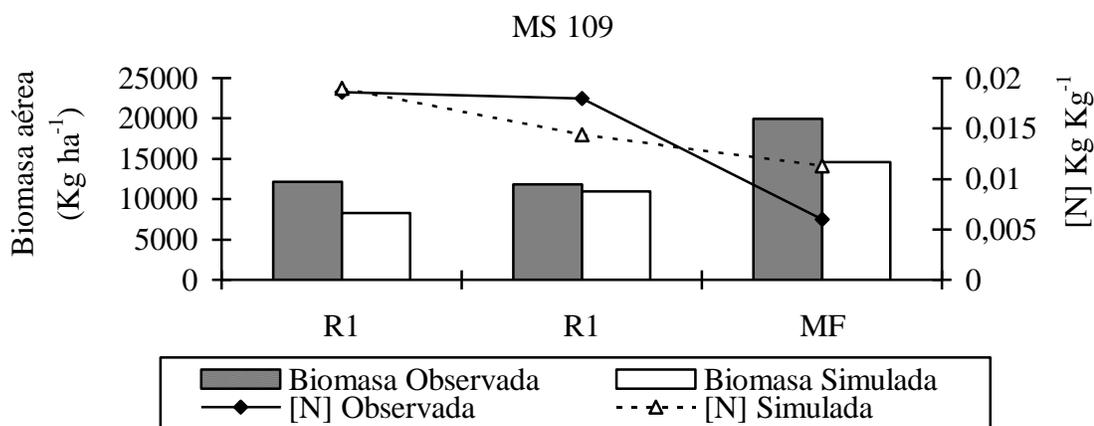


Figura 21. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 109 en la validación de sorgo

Los valores de MS 102 presentaron mejor ajuste con los valores del estadio reproductivo cercanos a los reales aunque estos datos para biomasa presentaron subestimaciones importantes.

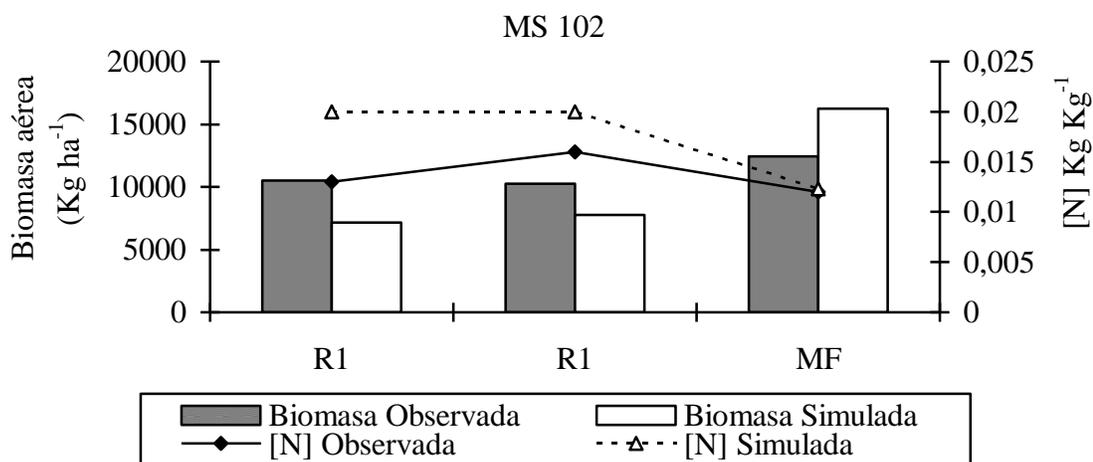


Figura 22. Relación entre la biomasa aérea y la concentración de N en planta observada y simulada para el cultivar MS 102 en la validación de sorgo

Esta variable tendió a mejorar su resultado en sorgo en comparación con el cultivo de maíz, por lo que en este caso el consumo de lujo pudo no existir, por lo que se debería continuar trabajando sobre esto.

Los resultados de la validación para el agua en los primeros 30cm del suelo, para el cultivar MS 102 son considerados excelentes dado los bajos valores de RCME obtenidos, para MS 109 los resultados son aceptables y los valores con mayor diferencia son los encontrados en siembra y cosecha los cuales son los valores más extremos, similar a lo ocurrido con la biomasa aérea.

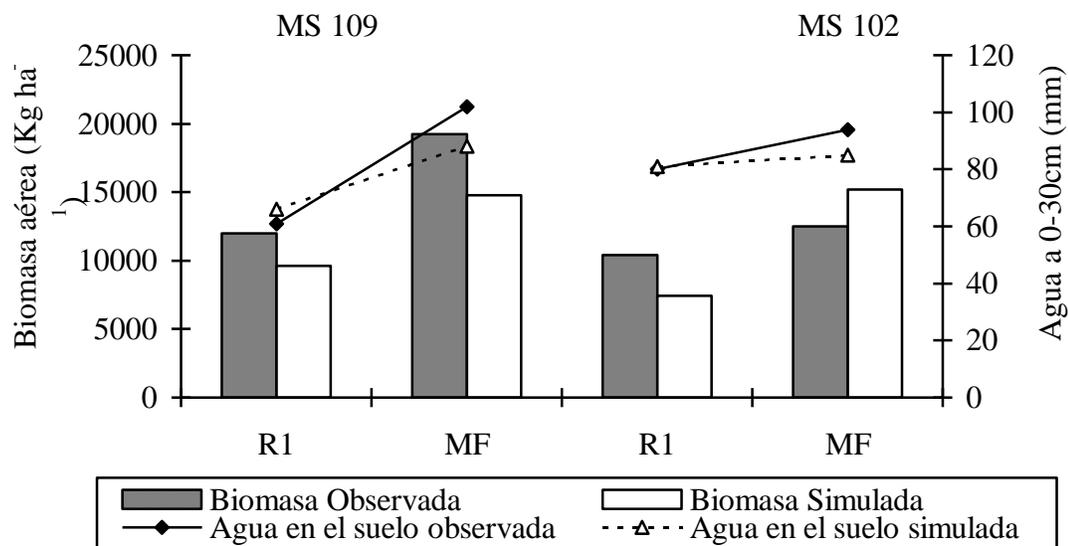


Figura 23. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo 0-30 cm para validación en ambos cultivares de sorgo

Para el agua en el suelo a más de 30cm de profundidad no hay una correcta sincronización con valores de RCME 29% y 32% en las etapas vegetativas y reproductivas y 37% y 30% en la etapa de cosecha para MS 109 y MS 102 respectivamente.

Al contrario de los resultados encontrados en la calibración para ambas profundidades los puntos más alejados de la lineal 1:1 son aquellos que corresponden con las medidas tomadas en las fechas más extremas del periodo del trabajo. A pesar de esta contradicción en las conclusiones se destaca que el 2010/11 fue un año con temperaturas máximas superiores y menores precipitaciones, por lo que no se descarta el error ocasionado por una mayor evaporación, destacando además que para todas las medidas y para los dos cultivares este año presento mayor diferencia con respecto a la calibración.

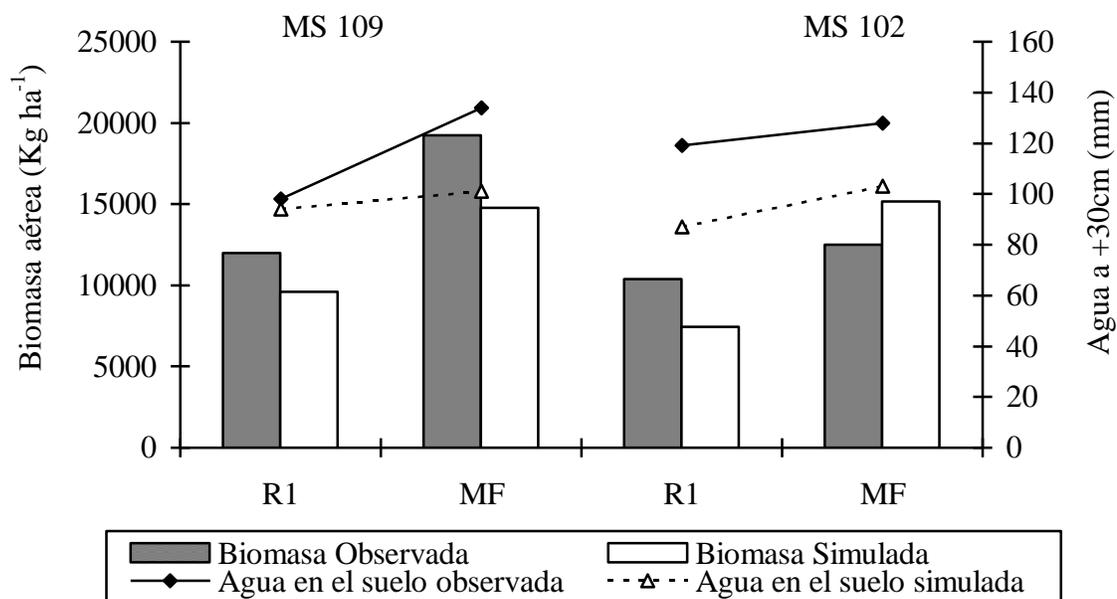


Figura 24. Relación entre la biomasa aérea y el agua en el suelo +30 cm para validación en ambos cultivares de sorgo

Finalmente para el rendimiento en grano la estimación se considera excelente donde los valores de la época 2 son subestimados y los de la época 3 sobrestimados pero estas diferencias son de poca significancia. Para MS 102 los resultados son similares a los obtenidos en biomasa aérea donde la fecha más tardía es simulada de mejor manera.

Cuadro No. 62. Clasificación del rendimiento para ambos cultivares de sorgo en la validación

Cultivar	Variable	Observado	Simulado	RelRCME	Clasificación
MS 109	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	4984	4758	15	***
MS 102	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	7305	6443	10	***

Referencias: Calificación (***) excelente resultado; (**) aceptable resultado; (*) mal resultado

Los valores de RCME 10% y 15% para MS 102 y MS 109 respectivamente demuestran que el programa es validado para la característica de rendimiento en grano para el cultivo de sorgo y con las características de este ensayo.

5. CONCLUSIONES

Se logró validar el modelo para la variable rendimiento en grano para ambos cultivos y bajo las condiciones en las cuales fue llevado a cabo el trabajo.

La fenología es representada de manera excelente y para ambos cultivos no se consiguió un ajuste aceptable del IAF como el que se esperaba, aunque sin afectar la estimación de la radiación interceptada por el cultivo, por lo que no limita el crecimiento de la biomasa aérea la cual es superior a la real en las etapas iniciales, pero con ajustes buenos al final del ciclo.

Se encontraron diferencias importantes en la absorción de N por el cultivo, determinada por una concentración de este nutriente en planta mayor a la real. El agua en el suelo mantuvo una simulación mala en maíz principalmente en el año lluvioso, aunque con tendencia similar en sorgo, atribuido a un mayor drenaje profundo y/ o escurrimiento superficial.

Respecto al uso en el ámbito productivo con los resultados alcanzados el modelo es una herramienta que puede ser utilizada para la predicción de resultados aunque su mayor valor está en planificaciones a largo plazo como la evaluación de distintos escenarios climáticos que puedan afectar el manejo de cultivos

6. RESUMEN

El uso de modelos de simulación de cultivos es una herramienta útil para optimizar las prácticas agronómicas de manejo así como para estudiar la adaptación de los cultivos a determinadas regiones. La fiabilidad de estos modelos de simulación debe ser evaluada únicamente a través de procesos de calibración y validación con datos de experimentación a campo. Este trabajo realizado en el litoral oeste de Uruguay muestra la obtención de los parámetros genéticos de dos cultivares por especie de maíz y sorgo de forma que puedan ser usados en el modelo CropSyst para evaluar distintas alternativas de manejo del cultivo a nivel local. Para tal fin se compararon los resultados de las simulaciones con los datos de una experimentación a campo en condiciones de secano, fertilizando los cultivos intentando evitar restricciones nutricionales y manteniéndolos libre de plagas, malezas y enfermedades. El ensayo se repitió dos zafas consecutivas y se utilizaron los resultados de un año para calibrar y los del año siguiente para validar el modelo. Los resultados encontrados demuestran que a pesar de presentar diferencias en algunos parámetros el modelo fue validado para la variable rendimiento en grano en ambos cultivos.

Palabras clave: CropSyst; Modelos de simulación; Validación; Calibración; Sorgo; Maíz; Litoral oeste de Uruguay

7. SUMMARY

The use of crop simulation models is a useful tool to optimize agronomic management practices as well as to study the adaptation of crops to certain regions. The reliability of these simulation models should be evaluated only through calibration and validation processes with data from field testing. The work done on the west coast of Uruguay shows obtaining genetic parameters of two cultivars of maize and sorghum species so they can be used with CropSyst to evaluate different crop management alternatives locally. To this end we compared the simulation results with data from a field testing in dry conditions, fertilizing crops trying to avoid keeping dietary restrictions and free of pests, weeds and diseases. The test was repeated two consecutive harvests and the results were used to calibrate a year and the following year to validate the model. The results show that despite differences in some parameters present model was validated for variable grain yield in both crops.

Key Words: CropSyst; Simulation models; Validation; Calibration; Sorghum; Corn; West Coast of Uruguay.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. 2005. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 115: 150–160.
2. ALTAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; DURAN, A.; ECHEVARRIA, A.; PANARIO, D.; PUENTES, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t.1, 96 p.
3. ANDRADE, F. H.; AGUIRREZABAL, L. A. N.; RIZZALLI, R. H. 1996. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. Bases para el manejo del maíz el girasol y la soja. Buenos Aires, INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-90.
4. BAROFFIO, J. C.; RAMOS, J. P. 2009. Calibración y validación del modelo CropSyst para un cultivar de soja para las condiciones de producción del litoral-oeste de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 96 p.
5. BELLOCCHI, G.; SILVESTRI, N.; MAZZONCINI, M.; MENINI, S. 2002. Using the CropSyst model in continuous rainfed maize (*Zea mais L.*) under alternative management options. *Italian Journal of Agronomy*. 6 (1): 43-56.
6. BERRUTTI DUTRA, N. 2009. Calibración y validación del modelo CropSyst para las condiciones de producción del litoral-oeste del Uruguay en un híbrido de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 76 p.
7. BONFANTE, A.; BASILE, A.; ACUTIS, M.; DE MASCELLISA, R.; MANNAC, P.; PEREGOB, A.; TERRIBILE, F. 2010. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy. *Agricultural Water Management*. 97: 1051–1062.
8. CARRASCO, P. 1996. Sorgo granífero. Montevideo, Facultad de Agronomía. 96 p.
9. DALLA MARTA, A.; MANCINI, M.; FERRISE, R.; BINDI, M.; ORLANDINI, S. 2010. Energy crops for biofuel production; analysis of the potencial in Tuscany. *Biomass and Bioenergy*. 34: 1041–1052.

10. DUERI, S.; CALANCA, P.L.; FUHRER, J. 2006. Climate change affects farm nitrogen loss; a Swiss case study with a dynamic farm model. *Agricultural Systems*. 93: 191–214.
11. FERRER, F.; VILLAR, J. M.; STOCKLE, C. O. 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el Valle del Ebro. *Investigaciones Agronomicas: Producción y Protección. Vegetal*. 15 (3): 237-252.
12. GIMÉNEZ, L. 2011. Bases para el manejo de maíz en grano. Paysandú, Facultad de Agronomía. EEMAC. 60 p.
13. JALOTA, S. K.; SUKHVINDER SINGH; CHAHAL, G. B. S.; RAY, S. S. C.; PANIGRAGHY, S. C.; BHUPINDER-SINGH, D.; SINGH, K. B. 2009. Soil texture, climate and management effects on plant growth, grain yield and water use by rainfed maize–wheat cropping system; field and simulation study. *Agricultural Water Management*. 97: 83–90.
14. MILERA, S.; CROTTI, C. 1992. Implementación del modelo Cropsyst para la simulación del rendimiento del cultivo de maíz en una región de Argentina. (en línea). Santa Fe, CIOMTA. 9 p. Consultado 10 ene. 2012. Disponible en <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/milera2.pdf>
15. MORARI, F.; LUGATO, E.; BORIN, M. 2003. An integrated non-point source model-GIS system for selecting criteria of best management practices in the Po Valley, North Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 102: 247–262.
16. SOMMER, R.; WALL, P. C.; GOVAERTS, B. 2007. Model-based assessment of maize cropping under convencional and conservation agriculture in highland Mexico. *Soil and Tillage Research*. 94: 83–100.
17. STÖCKLE, C. O.; NELSON, R. 1999. Cropping systems simulation model, user's manual. Pullman, WA, Washington State University. Biological Systems Engineering Department. 235 p.
18. _____; DONATELLI, M.; NELSON, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*. 18: 289-307.

19. _____.; NELSON, R.; KEMANIAN, A. 2009. CropSyst. (en línea). Pullman, WA, Biological Systems Engineering Department. s.p. Consultado may. 2011.
Disponible en http://www.bsyse.wsu.edu/CS_Suite/CropSyst/index.html
20. TINGEM, M.; RIVINGTON, M.; COLLS, J. 2008a. Climate variability and maize production in Cameroon; simulating the effects of extreme dry wet years. *Singapore Journal of Tropical Geography*. 29: 357–370.
21. _____.; RIVINGTON, M.; BELLOCCHI, G.; COLLS, J. 2008b. Crop yield model validation for Cameroon. *Theoretical Applied Climatology*. 96: 275–280.
22. TURNER, N. C. 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming Systems. *Journal of Experimental Botany*. 55 (407): 2413–2425.
23. UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA (URUGUAY). FACULTAD DE AGRONOMÍA. 2010. Respuesta a la población en sorgo granífero. Paysandú. 35 p.
24. VENTRELLA, R.; RINALDI, M. 1999. Comparison between two simulation models to evaluate cropping systems in southern italy. Yield respond and soil water dynamics. *Agricultural Medicine*. 129: 99-110.