

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RIEGO DEFICITARIO Y COMPLETO EN CULTIVO DE MAÍZ

por

Ana Laura ELHORDOY GOYECHE

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2019

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Raquel Hayashi

Ing. Agr. Lucía Puppo

Ing. Agr. Pablo Morales

Fecha: 6 de diciembre de 2019

Autora: -----

Ana Laura Elhordoy Goyeche

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia, por su apoyo incondicional sin ellos hubiese bajado los brazos y no podría haber llegado hasta aquí. Especialmente a Bea sin lugar a dudas una gran persona que tengo la suerte de tener como hermana.

También a mis compañeros, colegas que fui conociendo año a año y que hoy en día son grandes amigos, sin lugar a dudas me llevo muchas cosas valiosas de “La Fagro”.

TABLA DE CONTENIDO

Página

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN URUGUAY.....	2
2.1.1 <u>Brecha de rendimiento</u>	3
2.2 FENOLOGÍA DEL MAÍZ	4
2.2.1 <u>Período crítico</u>	5
2.2.2 <u>Predicción fenológica de INIA</u>	6
2.3 AMBIENTE DE PRODUCCIÓN EN URUGUAY	8
2.3.1 <u>Precipitaciones</u>	8
2.3.2 <u>Temperaturas</u>	9
2.3.3 <u>Radiación solar</u>	9
2.3.4 <u>Capacidad de almacenamiento de agua disponible de los suelos</u>	10
2.3.5 <u>Régimen hídrico</u>	10
2.4 REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS PARA EL MAÍZ	11
2.4.1 <u>Temperatura</u>	11
2.4.2 <u>Disponibilidad de agua</u>	12
2.5 IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ.....	12
2.6 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA	14
2.7 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE GRANO.....	15
2.7.1 <u>Determinación del número de granos</u>	15
2.7.2 <u>Determinación del peso de grano</u>	16

2.8 EFECTO DE LAS DEFICIENCIAS HÍDRICAS DURANTE EL CICLO....	17
2.9 BALANCE HÍDRICO.....	18
2.9.1 <u>Evapotranspiración</u>	18
2.9.2 <u>Coeficiente del cultivo (Kc)</u>	19
2.9.2.1 Coeficiente del cultivo (Ks).....	19
2.9.3 <u>Precipitación efectiva</u>	20
2.10 MANEJO DEL RIEGO	21
2.10.1 <u>Lámina de riego</u>	22
2.10.1.1 Crecimiento radicular.....	22
2.10.1.2 Umbral de riego.....	22
2.10.2 <u>Planificación del riego</u>	23
2.11 MEDICIÓN DEL AGUA EN EL SUELO.....	23
2.12 EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA	23
2.13 POTENCIALIDADES PARA EL DESARROLLO DEL RIEGO.....	24
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	26
3.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO	26
3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	26
3.2.1 <u>Descripción de los tratamientos</u>	27
3.3 MANEJO DEL CULTIVO	28
3.3.1 <u>Control de malezas pre-siembra y pos-siembra</u>	28
3.3.2 <u>Fecha de siembra, densidad y material genético</u>	28
3.3.3 <u>Manejo de la fertilización</u>	29
3.3.4 <u>Manejo del riego</u>	29
3.3.5 <u>Medición del contenido de humedad</u>	31
3.4 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	31
3.4.1 <u>Hipótesis biológicas</u>	31
3.4.2 <u>Hipótesis estadísticas</u>	31
3.4.3 <u>Diseño experimental</u>	31
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	32

3.6 DETERMINACIONES EFECTUADAS.....	32
3.6.1 <u>Producción de materia seca</u>	32
3.6.2 <u>Contenido de humedad en suelo</u>	33
3.6.3 <u>Cosecha de granos</u>	33
3.6.4 <u>Contenido de humedad en grano</u>	33
3.7 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DE EVALUACIÓN	34
3.7.1 <u>Precipitaciones</u>	34
3.7.2 <u>Temperaturas</u>	34
3.7.3 <u>Radiación solar</u>	35
3.7.4 <u>Evapotranspiración Penman-Monteith</u>	36
3.7.5 <u>Viento</u>	37
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	39
4.1 MATERIA SECA TOTAL	39
4.1.1 <u>Comportamiento en la evolución de materia seca</u>	40
4.1.2 <u>Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)</u>	41
4.2 EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN EL RENDIMIENTO	41
4.2.1 <u>Índice de cosecha de acuerdo a la disponibilidad hídrica</u>	43
4.2.2 <u>Eficiencia en el uso del agua EUA</u>	44
4.3 EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LOS COMPONENTES ..	45
4.3.1 <u>Número de granos</u>	45
4.3.2 <u>Peso de mil granos (PMG)</u>	46
4.4 BALANCE HÍDRICO.....	47
4.5 MEDIDAS DE HUMEDAD DEL SUELO	48
4.6 EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	50
5. <u>CONCLUSIONES</u>	54
6. <u>RESUMEN</u>	55
7. <u>SUMMARY</u>	56
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	57
9. <u>ANEXOS</u>	65

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Rendimientos nacionales y balance hídrico durante el mes de enero en Estación Experimental La Estanzuela.....	14
2. Características hídricas del suelo en el sitio del experimento.....	26
3. Evolución de la producción de MS (kg.há ⁻¹).....	40
4. Tasa de crecimiento del cultivo (kg).....	41
5. Índice de cosecha (IC)	43
6. Eficiencia en el uso del agua EUA	44
7. Balance hídrico del ensayo	47
Figura No.	
1. Escala fenológica maíz.....	4
2. Funciones lineales de productividad del agua para el maíz.....	6
3. Croquis del experimento.....	27
4. Representación de la distribución de los goteros.....	30

5. Medidor de humedad en grano modelo “Multi-grain Dickey John”.....	33
6. Precipitaciones (mm) promedio mensuales serie 1982-2017 y período 2016-2017.....	34
7. Temperaturas (°C) promedio mensuales serie 1982-2017 y período 2016-2017.....	35
8. Radiación solar (cal.m ² .día ⁻¹) promedio mensual serie 1982-2017 y período 2016-2017.....	36
9. Evapotranspiración “Penman Monteith” (mm) promedio mensual serie 1980-2017 y período 2016-2017.....	36
10. Viento (2m/km/24hs) promedio mensual serie 1980-2017 y período 2016-2017.....	38
11. Producción de materia seca (kg.MS.há ⁻¹).....	39
12. Rendimiento en grano (kg.ha ⁻¹) de cada tratamiento evaluado.....	42
13. Número de granos m ² para los tratamientos evaluados.....	45
14. Peso de mil granos (PMG) para los tratamientos evaluados.....	46
15. Evolución de la humedad del suelo medida con sonda FDR para tres profundidades y precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo.....	49
16. Evolución del contenido de agua total en el tratamiento sin riego, para profundidad de 60 cm.....	50

17. Evolución del contenido de agua total en el tratamiento de 3 mm, para profundidad de 60 cm.....	51
18. Evolución del contenido de agua total en el tratamiento de 6 mm, para profundidad de 60 cm.....	52
19. Evolución del contenido de agua en el tratamiento de 9 mm, para profundidad de 60 cm.....	53

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, desde el año 2002 se ha desarrollado un proceso de intensificación y expansión agrícola a partir de los cambios tecnológicos y al aumento de la demanda en el mercado internacional. Los principales cambios tecnológicos asociados son, la adopción de siembra sin laboreo, el uso de cultivos con eventos transgénicos, el cambio de una agricultura basada en cultivos de invierno a una basada en cultivos de verano fundamentalmente soja, la disminución de pasturas dentro de la rotación, etc. (Arbeletche et al., 2010).

Según MGAP. DIEA (2017), entre las zafras 2002/2003 y 2009/2010 los rendimientos de maíz estuvieron estancados, promedialmente entre 4000 a 5000 kg.ha⁻¹, desde la zafra 2010/2011 en adelante se ha producido un incremento en la producción, con valores promedios de 7000 kg.ha⁻¹.

Según Giménez (2014), el riego es la tecnología que permite levantar la limitante ambiental de mayor importancia para la producción de maíz, sin embargo es utilizado escasamente por diferentes motivos, entre los que se destacan las inversiones y los costos operativos para desarrollar cultivos con riego.

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto producido en el rendimiento por diferentes dosis máximas de reposición al déficit hídrico acumulado. Las dosis máximas de reposición tendrán el mismo efecto en el cultivo que el caudal de diseño impuesto en un equipo de riego con esas dosis. Estimar el potencial productivo para los ambientes de producción de Uruguay, sin restricciones hídricas y con deficiencias hídricas acumuladas dependiendo del tratamiento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN URUGUAY

La superficie total sembrada con cultivos de verano en la zafra 2016/2017 fue de 1.234.000 hectáreas, de las cuales 79.000 hectáreas son de maíz, representando el 6,4% de la superficie (MGAP. DIEA, 2017).

Según MGAP. DIEA (2017), se estimó el área de maíz regada en 7.784 hectáreas (equivalente a 12% del total sembrado), un 24% menor que la zafra 2015/2016, como consecuencia de las condiciones climáticas favorables; el rendimiento promedio de maíz bajo riego fue de 9.711 kg.há⁻¹, siendo un 13,6% superior al rendimiento obtenido en la zafra anterior y un 36% mayor al rendimiento obtenido con secano. En la zafra 2016/2017 el rendimiento medio del cultivo a nivel nacional se estimó en 7.136 kg.ha⁻¹, lo que implicó un aumento del orden del 21% con respecto al rendimiento obtenido en la zafra anterior (2015/2016), siendo el máximo histórico registrado por MGAP. DIEA hasta ahora.

La superficie bajo riego de cultivos temporales como lo son el maíz, soja, caña de azúcar, etc; para el año 2011 fue estimada en unas 227.577 hectáreas, de las cuales el maíz ocupa 13.700 hectáreas (6%), FAO (2015). Mientras que MGAP. DIEA (2017) estimó la superficie regada de cultivos de verano en 17.000 hectáreas.

Giménez (2012), concluye que el rendimiento potencial de maíz en los ambientes de producción agrícola del país, se encuentra en torno de las 15 tt.ha⁻¹, dicha conclusión se basa en los datos obtenidos por diferentes investigadores a nivel nacional, como Roselli et al. (1998), 11.450 kg.ha⁻¹ en secano y 13.550 kg.ha⁻¹ bajo riego; Giménez (2004, 11.500 kg.ha⁻¹ y 13.500 kg.ha⁻¹, respectivamente).

A nivel regional según serie de datos 1969/1994 de INTA "Manfredi", el cultivo en secano presentó rendimientos promedios de 5.620 kg ha⁻¹, mientras que el cultivo bajo riego fue de 13.040 kg ha⁻¹, comparando en "años medios", según contenido de humedad, presentan un aumento en el rendimiento del 43% (Salinas et al., 2014).

2. 1.1 Brecha de rendimiento

La brecha de rendimiento está definida por diversos factores, los denominados definitorios comprenden CO₂, temperatura, genotipo y radiación; también están los factores limitantes como agua, nutrientes específicamente nitrógeno y fósforo; y por último los reductores tales como malezas, enfermedades, plagas, granizo, etc. (Rabigne et al., citados por Giménez, 2012).

Según Giménez (2014), la disponibilidad de agua es la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de la brecha entre los rendimientos potenciales y los obtenidos a nivel comercial. El rendimiento obtenido de maíz en condiciones de secano presenta una brecha muy amplia en relación al logrado con riego suplementario (Sawchik y Formoso, 2000). Esa brecha puede disminuir en la medida que el riego cubra las necesidades hídricas del cultivo, en ausencia de otras limitantes como lo pueden ser el manejo adecuado de la fertilización, manejo sanitario, materiales genéticos adecuados, etc.

Según Arana (2012), en el período 2004-2012 el rendimiento promedio de los cultivos de maíz con riego en establecimientos de productores agrícolas muestra un incremento significativo en relación a la producción por hectárea usualmente obtenida en secano. En el caso del maíz produjo 6.100 kg.ha⁻¹ adicionales.

A nivel regional antes del año 1998 los rendimientos obtenidos en Argentina a nivel nacional fueron de 1.538 kg.ha⁻¹, mientras que en el período 1998-2013 estos valores fueron de 4.060 kg.ha⁻¹, donde dichas diferencias son atribuidas a posibles distintos factores, dentro de los cuales se encuentra la adopción al riego (Colazo y Rivarola, 2015).

Otero et al. (2017), mencionan que cuando el agua es el factor de producción que limita la capacidad del cultivo en alcanzar su rendimiento potencial, hay que tener en cuenta que la eficiencia en el uso del agua, así como la cantidad de agua utilizada y su distribución en el tiempo, representan los componentes más importantes para reducir la brecha.

2.2 FENOLOGÍA DEL MAÍZ

Cárcova et al. (2010a), describen que a lo largo del ciclo del cultivo de maíz se pueden distinguir distintas fases de desarrollo, determinadas por cambios cualitativos en los órganos en formación.

La escala fenológica más utilizada para describir el ciclo de un cultivo de maíz es la propuesta por Ritchie y Hanway (1982), que utiliza caracteres morfológicos externos o macroscópicos. En ella se identifican dos grandes períodos: el vegetativo, subdividido en estadios identificados con la letra V y un subíndice, correspondiente al orden de la última hoja completamente extendida (lígula visible) al momento de la observación (VE: emergencia, V1, V2,Vn y VT o panojamiento), y el reproductivo, identificado con la letra R y un subíndice que comienza en R1 (emergencia de los estigmas), R2 (cuaje o estado de ampolla), R3 (grano lechoso), R4 (grano pastoso), R5 (grano duro o indentado) y R6 (madurez fisiológica). Desde los estadios R3 hasta R5, inclusive, corresponde al llenado de los granos (Martínez, 2015).

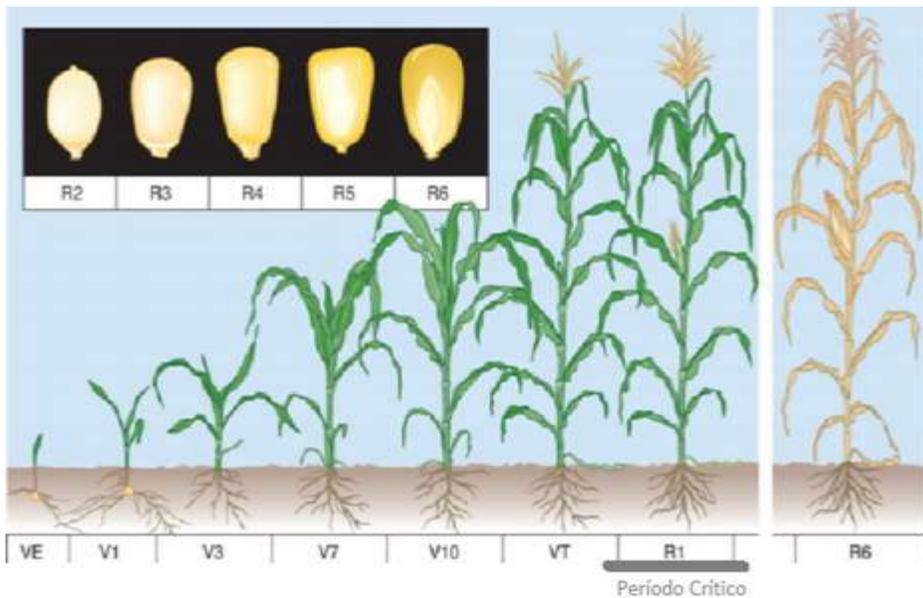


Figura 1. Escala fenológica maíz

Fuente: adaptado de Ritchie y Hanway (1982).

2.2.1 Período crítico

Cárcova et al. (2010a), definen el período crítico como aquel período del ciclo del cultivo en el cual las disminuciones en la tasa de crecimiento inciden marcadamente y explican en mayor medida las variaciones del rendimiento.

Andrade et al. (1996), mencionan que en el período de cuatro semanas centrado en la floración femenina del cultivo de maíz es particularmente sensible a cualquier estrés de crecimiento en cuanto al número final de granos logrados. Durante la primera mitad del período crítico previa a la aparición de los estigmas queda determinado el número de espigas por planta capaces de granar, mientras que en la segunda mitad se determina el número de granos fijados por espiga granada. El número de granos cosechados en el cultivo responde a las variaciones en la tasa de crecimiento que experimentó el cultivo durante el período crítico.

Hsiao (2012), menciona que como resultado de la naturaleza monoica del maíz, el estrés hídrico medianamente severo puede provocar un problema peculiar de reproducción, a través de la inhibición de la emergencia de la panoja, y estigmas. Cuando el crecimiento de los estigmas es más lento, se retrasa la emergencia de los estigmas desde las hojas que cubren la mazorca. La emergencia de la panoja también se retrasa a causa del estrés hídrico, pero en menor medida que en el caso de los estigmas. Esta diferencia en el retraso puede impedir la polinización porque, cuando los estigmas emerjan, es posible que no quede suficiente polen para polinizar el cultivo por completo. Por otro lado la polinización fallida de los estigmas tardíos en una panícula, y en panículas muy tardías de una población de plantas pueden incidir de manera negativa en el rendimiento.

Bolaños y Edmeades, citados por Hsiao (2012), mencionan que a medida que la severidad del estrés hídrico aumenta, este intervalo se alarga cada vez más y el rendimiento de grano se reduce drásticamente como resultado de la polinización fallida.

El maíz moderno es altamente determinado con un intervalo de tiempo estrecho de polinización, esto significa que no hay oportunidad de compensar la reducción de la polinización con flores tardías cuando llegue la precipitación o el riego (Hsiao, 2012).

Smith y Pasquale (2012), tomaron en cuenta la ecuación que estableció la FAO a finales de los setenta, en la cual se abordó la relación entre el rendimiento del cultivo y el uso del agua; para realizar estudios en riego

deficitario. Estos autores generaron diferentes funciones de respuesta del cultivo cuando se presentaba el déficit hídrico dependiendo de la etapa fenológica, en que se presentaba el déficit hídrico (Figura 2).

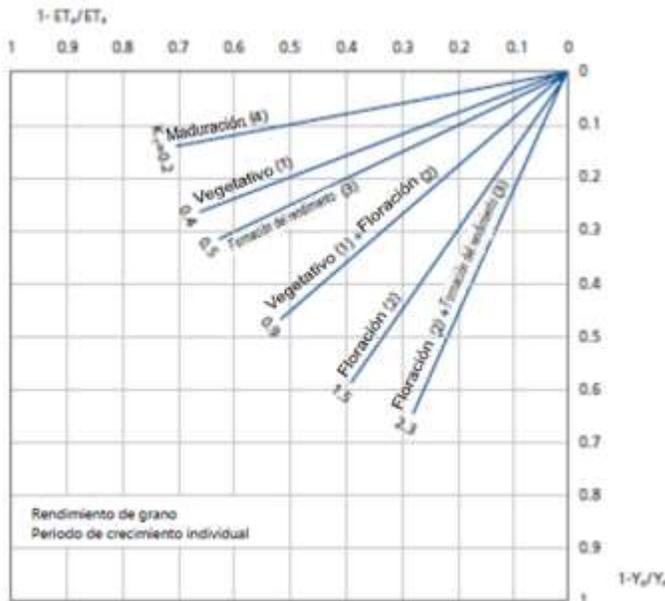


Figura 2. Funciones lineales de productividad del agua para el maíz

Como se observa en la gráfica el período de floración es el que representa mayores pérdidas en el rendimiento del cultivo de maíz, lo que se interpreta al ver la pendiente de esa curva de respuesta, la cual es mayor a 1. Es decir en este período la respuesta del cultivo es altamente sensible al déficit hídrico, con una disminución del rendimiento proporcionalmente mayor que la disminución del uso del agua debido al estrés.

2.2.2 Predicción fenológica de INIA

En la página web del INIA se ofrecen herramientas que permiten predecir los estados fenológicos, el cual se utilizó para hacer el seguimiento del cultivo. A modo de información se incorporaron las bases teóricas que se tomaron en cuenta al momento de hacer la herramienta.

Según Fassio et al. (2013), para cada especie la acumulación de información de su fenología, permite construir modelos para predecir con cierta exactitud, el inicio y la duración de los estados fenológicos para una determinada latitud, fecha del año y temperaturas.

El desarrollo del modelo consistió en una serie de ensayos llevados a cabo en INIA La Estanzuela, en los cuales se obtuvieron registros de los eventos fenológicos de los cultivos de soja, girasol, maíz y diferentes tipos de sorgo (cultivos de verano). Para generar los modelos de predicción los registros de temperatura y fotoperiodo se obtuvieron de las bases de datos meteorológicos de INIA La Estanzuela (34°20'S, 57°41'O) e INIA Salto Grande (31°16'S, 57°53'O, INIA, 2014). Dichos modelos estiman ciclos fenológicos a partir de la fecha y zona de siembra (Norte o Sur del país).

Los experimentos en INIA La Estanzuela que dieron sustento a los modelos, incluyen siembras desde el 1° de setiembre hasta fines de enero, a intervalos de 10 a 20 días aproximadamente. Durante ese período, se definieron entre 7 y 15 épocas de siembra utilizando cultivares de diferentes largo de ciclo. Se registraron los eventos fenológicos de emergencia, los estados vegetativos y reproductivos y la madurez fisiológica.

Para cada cultivo se utilizó la escala fenológica más ampliamente utilizada (Fehr et al. 1971, Vanderlip y Reeves 1972, Schneiter y Miller 1981, Ritchie y Hanway 1982).

Para cada especie se calculó la suma térmica (ST) expresada en grados día (°días). La ST se define como la sumatoria de las diferencias entre la temperatura media diaria y la temperatura base (Tb) expresadas en °días. Para la estimación del momento de la emergencia de las plántulas se utilizó la temperatura media diaria del suelo y la Tb del suelo, mientras que para la estimación de los demás estadios se utilizó la temperatura media del aire y la Tb del aire. A continuación se adjunta la ecuación:

$$TT (\text{°Cd}) = \sum n(T_m - T_b)$$

Donde TT tiempo térmico
 Tm temperatura media diaria
 Tb temperatura base

El análisis estadístico de los datos recabados permitió ajustar un modelo para cada cultivo, cuidando que el error de la predicción fuese aceptable.

El último estado fenológico que los modelos predicen es la madurez fisiológica, definido como el momento en que los granos completan su llenado, a la vez que comienza la pérdida de humedad de los mismos y la senescencia de la planta. El momento de cosecha no es estimado por los modelos porque

ésta depende de factores pocos predecibles, como la precipitación y la humedad del aire.

Estos pronósticos estiman los momentos en que se sucederán los eventos fenológicos con una exactitud de ± 5 días; son menos precisos en la medida que se presentan eventos climáticos severos tales como sequía, anegamiento y mayor frecuencia de heladas. La precisión también disminuye en la medida que el régimen térmico de la zona de siembra presente diferencias significativas con las bases de datos de las estaciones agroclimáticas de INIA La Estanzuela e INIA Salto Grande.

2.3 AMBIENTE DE PRODUCCIÓN EN URUGUAY

2.3.1 Precipitaciones

Las lluvias se caracterizan por su extrema irregularidad y variabilidad interanual, tanto en cantidad total anual como en frecuencia e intensidad. La precipitación anual varía entre 1100 mm en el Sur del país y 1600 mm en el Norte. Se produce un gradiente el cual es incremental de Suroeste a Noreste. Pluviometría abundante, pero irregular. Los vientos fuertes y continuos, algo fríos en invierno y cálidos en verano, soplan la mayor parte del año (FAO, 2015).

En cuanto a la distribución espacial a lo largo del año, se observa el cambio en el gradiente de la precipitación, de Oeste a Este en el invierno a un gradiente casi de Sur a Norte para los meses de verano y otoño. Considerando los valores acumulados de la lluvia a través del año, no existe una estación lluviosa bien definida, registrándose acumulados medios mensuales entre 60 mm.mes^{-1} litoral Oeste en invierno y 140 mm.mes^{-1} Noroeste en abril y octubre (Castaño et al., 2011).

Según Jiménez de Aréchaga (2007), en Uruguay se estima que un 40% de la precipitación total corre por la superficie, es decir escurre superficialmente, para ir a cañadas, arroyos, ríos y océanos, mientras que el 60% restante lo intercepta la vegetación, satura el suelo o infiltra en profundidad. La media anual de lluvias indica que unos 90 mil millones de m^3 de agua escurren superficialmente, de los cuales menos del 30% es aprovechado por el hombre. Del volumen aprovechado el 16% es para riego agrícola.

2.3.2 Temperaturas

Se trata de un clima templado, sin grandes oscilaciones térmicas anuales. La temperatura media anual varía desde 16°C en el Sureste hasta los 20°C en el Noreste. Las temperaturas máximas medias varían entre 28°C y 33°C y las mínimas medias entre los 6°C y 9°C en el Sureste y Noroeste respectivamente. Es frecuente la ocurrencia de heladas de mayo a septiembre (FAO, 2015).

La temperatura media anual sobre Uruguay es de unos 17,7 °C, variando desde unos 19,8 °C en la zona Noroeste (Bella Unión), hasta unos 16,6 °C en la costa Sur del país. Las isotermas tienen una tendencia incremental general desde el Sur hacia el Noroeste. Las temperaturas medias más altas se presentan en los meses de enero y febrero y las más bajas en junio y julio, de acuerdo a la región (Castaño et al., 2011).

2.3.3 Radiación solar

Según Campillo et al. (2012), uno de los factores más importantes que influye en el desarrollo de las plantas es la intercepción de la radiación por parte del cultivo. La radiación solar aporta energía a los procesos metabólicos de las plantas. Los principales son la asimilación fotosintética que permite sintetizar componentes vegetales a partir del agua, el CO₂ y la energía de la luz.

La radiación diaria promedio en el Uruguay es de 15,84 MJ.m⁻². La variación estacional es amplia, con valores mínimos en torno a 7,2 MJ.m⁻² en el mes de junio y los valores máximos que llegan a 25,2 MJ.m⁻² en los meses de diciembre y enero. Los sitios costeros al Sur del país (Rocha, Maldonado, Montevideo) son los que presentan menor irradiación media, en tanto los mayores valores aparecen en el Norte Artigas, Rivera, Salto, Paysandú (Abal et al., 2010).

Se considera que con la variación de radiación y heliofanía existente se produce un 15% de diferencia en el rendimiento potencial entre el Oeste y Este del país. La conclusión a la que se arriba, en relación a la disponibilidad de este factor, es que el país tiene la máxima radiación posible compatible con la agricultura de secano. La importancia de la radiación radica en dos aspectos, su metabolismo fotosintético C4 y porque el rendimiento en grano depende en última instancia de la fotosíntesis durante el llenado de grano (Carrasco, citado por Rameau et al., 2013).

La radiación solar incidente es menor en los años “Niño” en los cuales las precipitaciones son mayores al promedio en los meses de noviembre, diciembre y enero. Mientras que en los años “Niña” las precipitaciones están muy por debajo del promedio en los meses de diciembre, enero y febrero, donde la radiación solar incidente es mayor (Giménez y García Petillo, 2011).

2.3.4 Capacidad de almacenamiento de agua disponible de los suelos

Según Molfino y Califra (2001), casi un 30% de la superficie nacional posee tierras con muy baja y baja capacidad de almacenar agua disponible. En el mismo trabajo indican que la mayoría de los suelos sobre los que se realiza agricultura en el país presentan una Capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD), que varía entre 80 y 160 mm.

Según Giménez y García Petillo (2011), la CAAD de los suelos es baja en relación al consumo por parte de los cultivos, dado que cubre aproximadamente el 20-30% de las necesidades hídricas del total de ciclo del cultivo.

Según Sawchick et al. (2010), los suelos agrícolas del Uruguay pueden almacenar entre 80 mm y 160 mm de agua en el perfil, lo que representaría en el mejor de los casos el 33% de los requerimientos de agua de un cultivo de maíz de alto potencial.

Giménez y García Petillo (2011), concluyen que dada la escasa CAAD de los suelos, existe una elevada dependencia de las recargas hídricas para lograr un abastecimiento ajustado a las demandas de los cultivos de secano, y que dichas recargas provienen fundamentalmente de las precipitaciones. La CAAD del suelo cumple el rol de reservorio de agua para el crecimiento de los cultivos y es el regulador del ciclo hidrológico para los mismos.

Para obtener niveles elevados de producción de maíz en condiciones de secano, la CAAD es un factor limitante. Por este motivo las precipitaciones que ocurran durante el Período crítico de los cultivos son la principal determinante del rendimiento final (Ernst et al., 2009).

2.3.5 Régimen hídrico

Según Corsi et al. (1982), para caracterizar el régimen se utilizó el balance hídrico del suelo, por ser un método racional para cuantificar el factor agua en la agricultura. Este balance tiene en cuenta la precipitación como entrada de agua en el proceso agrícola y la evapotranspiración como salida de

agua en el mismo proceso; el suelo se comporta como un depósito que almacena agua.

Al realizar balances hídricos para las diferentes regiones del país, se observa la presencia de un período de deficiencia de agua entre los meses de noviembre a febrero inclusive y un período de exceso de agua en invierno y comienzo de primavera. En otoño se observa la recarga de agua en el suelo. En verano la precipitación y el agua almacenada en el suelo no son suficientes para atender las necesidades de agua o evapotranspiración potencial de los cultivos produciéndose las deficiencias mencionadas. Los menores valores de deficiencia están en la Región Central Norte del país con menos de 40mm anuales, con tendencia a aumentar las deficiencias en el Sur. Los menores valores de deficiencia de agua en la mitad Sur del país, se encuentran en la Región Sureste con menos de 50mm anuales (Corsi et al., 1982).

2.4 REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS PARA EL MAÍZ

2.4.1 Temperatura

La temperatura constituye uno de los factores que afecta la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), ya que interviene en las tasas de respiración y de fotosíntesis. A pesar de ello, el mayor efecto radica en la modificación de la duración de las distintas fases fenológicas del cultivo (Fassio et al., 1998).

Según Totis de Zeljkovich (2015), es común observar que en años “fríos” el desarrollo de las fases fenológicas de las plantas se atrasa, mientras que en años “cálidos” se adelanta. El desarrollo del maíz depende directamente de la temperatura en la medida que no se modifique la evolución fisiológica de las plantas por efecto de las ocurrencias de valores muy bajos o muy altos.

Según Martínez (2015), las temperaturas cardinales del maíz son la Temperatura base que varía de 5 y 10°C, de acuerdo al genotipo y a la etapa del ciclo ontogénico considerada. Mientras que la Temperatura media puede ser óptima por encima de la cual la velocidad de desarrollo deja de incrementarse en forma lineal está entre 30-34°C y la temperatura máxima o crítica a la cual cesa el desarrollo se ubica entre 40-44°C, según varios autores.

Teniendo en cuenta las temperaturas de primavera-verano de Uruguay y las temperaturas cardinales, se puede concluir que no hay limitantes en este aspecto para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Las limitantes de esta variable están asociadas a las altas temperaturas nocturnas ya que incrementan la tasa de respiración, afectando el peso seco acumulado durante

el día por la fotosíntesis, lo cual repercute en el crecimiento de la planta (Fassio et al., 1998).

2.4.2 Disponibilidad de agua

El rendimiento del cultivo de maíz depende de la cantidad de agua disponible para evapotranspirar Doorenbos y Pruitt (1977) mencionan que el maíz consume entre 400 y 700 mm⁻¹ de agua a lo largo del ciclo. Mientras que Fassio et al. (1998), establecen similar rango 450-600mm.

El uso estacional del agua del maíz varía dependiendo de la demanda evaporativa de la atmósfera y, por consiguiente, según el clima, el momento de la estación en la que se siembra el cultivo, la duración del ciclo biológico del cultivo y la disponibilidad de agua. En situaciones de buena distribución de agua, la ET estacional varía menos, de 500 a más de 800 mm, donde la ET estacional típica de una variedad de ciclo medio, que se siembra en un clima templado a una latitud de 35° a 40° está cerca de 650 mm (Hsiao, 2012).

2.5 IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ

Según Ritchie y Hanway (1982), la disponibilidad hídrica es uno de los principales factores para la expresión del potencial productivo dado que su propio efecto en la fisiología de la planta y su interacción con otros factores; luz, nutrientes, temperatura, plagas, enfermedades, malezas, etc.

Ceriani e Inella (2012), obtuvieron que en promedio bajo riego el rendimiento fue superior al seco en 4.274kg.há⁻¹ (un 51% superior). Dichas diferencias se debieron a las importantes diferencias en el número de granos por espiga (en promedio 456 y 300 en riego y seco respectivamente).

Azcón-Bieto y Talón (2008), indican que el efecto más importante del estrés hídrico es la reducción del crecimiento del cultivo. Los asimilados utilizados para el crecimiento provienen de la fijación fotosintética del CO₂ en los tejidos clorofílicos de las plantas. La apertura estomática permite la difusión de CO₂ desde la atmósfera hacia la cámara sub-estomática para la posterior fijación como estructuras carbonadas. La disminución de la tasa transpiratoria ante situaciones de déficit hídrico siempre va acompañada de una disminución en la absorción de CO₂ y por lo tanto de la fotosíntesis.

El efecto de la falta de agua asociado a la producción de granos es particularmente importante en tres estadios de desarrollo de la planta. El primer estadio se refiere a la iniciación floral y al desarrollo de la inflorescencia, momento en el que se determina el número potencial de granos; el segundo se refiere al período de fertilización, que es cuando se fija el potencial de producción; y el tercero es la fase de llenado de grano, en el cual ocurre la acumulación de materia seca (Magalhaes y Da silva, citados por Fassio et al., 1998).

Según Borrás et al. (2004), el cultivo de maíz es altamente sensible a reducciones de fuente de asimilados durante el llenado de los granos. Además responde muy escasamente a mejoras de la fuente durante el llenado de grano. Por este motivo, Cirilo et al. (1995), establecieron que en condiciones adversas durante la fijación de granos no se puede compensar con aumentos del peso de grano haciendo que esto se traduzca en mermas en el rendimiento.

Villaú (s.f.), establece cuatro etapas en las que el aporte de agua es fundamental. La primera es desde emergencia hasta V6, donde un déficit hídrico causa una reducción de la superficie foliar, consecuencia de un menor crecimiento; dicha reducción puede ser del entorno al 10% de pérdida en cosecha. La segunda etapa va desde V7 hasta floración, el déficit hídrico afectará el crecimiento y también al número final de hileras de la mazorca, a la longitud de la misma y al número de óvulos (granos) que pueden llegar a ser fecundables. Las pérdidas pueden llegar hasta 50% por un estrés severo. El periodo de máxima sensibilidad es el de polinización y fecundación, si hay falta de agua puede llegar a generar hasta un 100% de pérdidas de rendimiento final, ya que el descenso de viabilidad del polen y las sedas incrementan el número de óvulos no fecundados de la mazorca. Ya en la última fase, el llenado de grano, la consecuencia directa de la falta de agua es el sacrificio por parte de la planta de los granos de la punta de la mazorca a favor de los de la base, colateralmente también conlleva una bajada del peso específico del grano.

Según Claassen y Shaw, citados por Romero et al. (1996), el maíz es un caso extremo de sensibilidad a la falta de agua, lo que puede verse en los rendimientos experimentales obtenidos en La Estanzuela 1988-1994, los cuales presentan un coeficiente de variación del 37%. En maíz los rendimientos se relacionan negativamente con el déficit hídrico ocurrido en enero ($R^2= 35\%$). Dicha sensibilidad puede ser explicada por la reproducción en maíz (fecundación cruzada con estructura femenina y masculina separadas) y la posible desincronización entre polinización y emergencia de los estigmas.

En el Cuadro 1 se muestra los rendimientos obtenidos en “La Estanzuela” para parte del período anteriormente mencionado.

Cuadro 1. Rendimientos nacionales y balance hídrico durante el mes de enero en la Estación Experimental La Estanzuela

Año	Rend. nacional Kg.há⁻¹	Agua disponible mm	ETc mm
88-89	788	11	229
89-90	1891	61	198
90-91	1780	58	174
91-92	1563	63	162
92-93	1964	50	187
93-94	1630	59	165

Rend. nacional: rendimiento promedio nacional elaborado por DIEA

Agua disponible: contenido de agua disponible a 60cm para un suelo del área de La Estanzuela.

ETo: evapotranspiración estimada por Penman-Monteith para el área de La Estanzuela.

Fuente: adaptado de MGAP. DIEA E INIA (s.f.)

2.6 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA

Para Otegui (2009), el rendimiento potencial es aquel que para cada especie se obtiene en un ambiente dado en ausencia de estrés abiótico y biótico. En estas condiciones el rendimiento depende de la capacidad de fijar carbono a través de la fotosíntesis, lo cual estará regulado por la cantidad de radiación que el cultivo sea capaz de interceptar.

Giménez (2012), menciona que durante tres años de estudio donde cuantificó la producción de materia seca en condiciones sin limitantes hídricas ni nutricionales, libres de malezas y plagas, con una población 100.000 pl/ha a una distancia de 0,7m; en años caracterizados por presentar precipitaciones en promedio menor en los meses de diciembre, enero y febrero, registró una producción de MS total cercana a los 24.000 kg.ha⁻¹, mientras que en años donde la media de precipitaciones en los meses noviembre, diciembre y enero fue mayor al promedio, la producción alcanzó los 20.000 kg.ha⁻¹. Cabe aclarar que dichas diferencias están asociadas a la cantidad de días nublados, directamente vinculado a los días de lluvia y no al efecto directo de las lluvias, como hace referencia el autor.

A modo de conclusión como mencionan Andrade et al. (1996), bajo condiciones de riego y en situaciones de mayor radiación, la fijación de biomasa es superior, que en aquellos años en que la radiación incidente es menor.

Andrade et al. (1996), obtuvieron rendimientos máximos, en condiciones sin deficiencias hídricas ni nutricionales, asociados a una producción de biomasa aérea de 25.000 a 30.000 Kg.ha⁻¹ con una población final de 85 mil plantas en la localidad de Balcarce.

Giménez (2017), obtuvo 25.000 kg.ha⁻¹ para el tratamiento sin deficiencias hídricas, valor que se encuentra dentro del rango de los máximos logrables sin limitaciones hídricas, ni nutricionales y con manejo óptimo, dado los valores de radiación solar promedio de la región.

Alsina (2015), concluyó para la zona de San Luis (Argentina), que los rendimientos potenciales oscilan en 27.700 kg.ha⁻¹ y 28.800 kg.ha⁻¹.

2.7 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE GRANO

El rendimiento potencial es aquel teóricamente alcanzable que se obtiene en un ambiente determinado el cual está sujeto a factores no modificables como radiación solar, temperaturas, precipitaciones y aquellos modificables como fecha de siembra, densidad de siembra entre otros (Salvagiotti 2009, Giménez 2014, García y Lemos 2017).

Según Baccino (2001), el cultivo de maíz en buenas condiciones de suelos, fertilidad, control de malezas, y con adecuado riego suplementario, permite obtener rendimientos superiores a los 10.000 kg.ha⁻¹. Giménez (2017), obtuvo en dos zafas seguidas (2011 y 2012) rendimientos en torno a los 14.600 kg ha⁻¹ en condiciones sin deficiencias hídricas. En tanto Alsina (2015), logró rendimientos superiores a 15.000 kg.ha⁻¹, en cultivos de maíz conducidos sin restricciones hídricas, nutricionales y sanitarias en Argentina.

Según la evaluación de cultivares 2016/2017 de INIA e INASE, al Sur del Río Negro, "La Estanzuela", los rendimientos promedios obtenidos fueron 9.072 kg.ha⁻¹, para la época de siembra temprana, mientras que para la época tardía los rendimientos promedio obtenidos fueron algo menores, 8.437kg.ha⁻¹ (INIA e INASE, 2017).

2.7.1 Determinación del número de granos

Cirilo et al. (1994), Otegui (1995), señalan que el número de granos ésta estrechamente relacionado con las variaciones en el rendimiento. La cantidad de estructuras florales diferenciadas, potencialmente viables para dar

granos maduros, no es el principal determinante en maíz del número de granos que alcanza la cosecha sino la supervivencia de esas estructuras fecundadas.

En el período de cuatro semanas centrado en la floración femenina el cultivo de maíz es particularmente sensible a cualquier estrés de crecimiento en cuanto al número final de granos logrados (Hall et al. 1981, Fischer y Palmer 1984, Kiniry y Ritchie 1985). Durante dicho período ocurre el activo crecimiento de la espiga, la aparición de estigmas y el comienzo de llenado de grano (Otegui y Bonhomme, 1998). Durante la primera mitad del período crítico queda determinado el número de espigas por planta capaces de formar grano, mientras que en la segunda mitad se determina el número de granos fijados por espiga.

Según Cárcova et al. (2010a, 2010b), una mayor sincronía en la fecundación entre y dentro de las espigas favorece la capacidad de la planta de fijar granos en floración.

Según Cárcova et al. (2010a), el número de granos puede ser desglosado en las estructuras que lo determinan, como lo son el No. de estructuras reproductivas y el No. de plantas.m². Estos componentes se van generando en forma sucesiva a lo largo del ciclo del cultivo en momentos ontogénicos acotados. Existe una primera etapa vegetativa en la cual se determina el número de plantas por unidad de superficie y luego, una segunda etapa reproductiva en la cual se determina el número de estructuras reproductivas y la cantidad de granos por estructura reproductiva. Finalmente, queda definido el peso de los granos. La duración de estas etapas depende del cultivo y de su interacción con el ambiente.

Cárcova et al. (2010b), indican que a través de diferentes aproximaciones experimentales que llevaron a cabo, determinaron que el número de granos queda establecido en un período de aproximadamente 30 días centrado en la floración, motivo por el cual se definió a esta etapa como período crítico. La incidencia de un estrés hídrico (Hall et al. 1981, Westgate et al. 1986, Grant et al. 1989) o lumínico (Fischer y Palmer 1984, Kiniry y Ritchie 1995) provoca mayores mermas en el número de granos cuando tiene lugar en este período, que coincide con el crecimiento activo de la espiga, la emergencia de estigmas y el inicio del llenado de grano.

2.7.2 Determinación del peso de grano

Reddy y Daynard, Jones et al., citados por Rivetti (2006), mencionan que el peso medio de los granos depende de la duración del período efectivo de

llenado de grano desde fecundación hasta la formación de la capa de abscisión en la base del grano (capa negra), y de la tasa de acumulación. Esa acumulación reconoce tres etapas. La primera se extiende desde la fecundación del ovario hasta cerca de dos semanas posteriores. Durante esa etapa, conocida como fase “lag”, el peso seco del grano se incrementa muy levemente pero ocurre allí una activa división celular que determina el número de células endospermáticas y de amiloplastos que constituirán los sitios de deposición de almidón. En la etapa siguiente, llamada fase de llenado efectivo, el grano incrementa su peso seco sostenidamente en forma lineal y acumula más del 80% del peso final. En la etapa final, la tasa de llenado declina notoriamente hasta hacerse nula al momento de alcanzarse la madurez fisiológica, cuando pierden funcionalidad los haces vasculares que conectaban al grano con la planta madre y el grano alcanza su peso seco final. En la fase “lag”, durante la cual la espiga completa su alargamiento (Otegui et al., 1998) y queda determinado el número de granos cosechables (Cirilo y Andrade, 1994), queda también determinado el tamaño potencial de grano en función del número de células endospermáticas y gránulos de almidón diferenciados que definen la capacidad posterior del grano como destino de deposición de reservas (Capitanio et al., citados por Rivetti, 2006).

2.8 EFECTO DE LAS DEFICIENCIAS HÍDRICAS DURANTE EL CICLO

En maíz las deficiencias hídricas causan efectos diferenciales en el rendimiento de acuerdo a la intensidad y etapa del ciclo en que se produzcan (Claassen y Shaw, citados por Giménez, 2012).

Cakir (2004), concluyó que el crecimiento vegetativo se ve fuertemente afectado por el estrés hídrico en diferentes etapas de crecimiento. Un déficit de agua durante la etapa inicial del estado vegetativo disminuyó la altura de la planta. También (en estado vegetativo) observó que el IAF aumenta en condiciones favorables de humedad del suelo (70-80 días post-emergencia), luego disminuyó a medida que las hojas envejecían.

Durante el desarrollo reproductivo, el estrés hídrico reduce el número de granos debido a caídas en las tasas de fotosíntesis y en el flujo de asimilados a los órganos en desarrollo (Schussler y Westgate, citados por Giménez, 2012). Las deficiencias hídricas en floración incrementan la asincronía entre la liberación de polen y la emergencia de los estigmas, esto provoca fallas en la polinización (Hall et al., citados por Giménez, 2017).

Andrade et al. (1996), señalan que en situaciones de no deficiencia entre la emergencia y la floración del maíz se deposita el 40% de la MS total y

desde esta etapa a madurez fisiológica el cultivo fija el 60% restante. También indica que el crecimiento del maíz en ausencia de otras limitantes es directamente proporcional a la radiación solar incidente, lo mismo lo reportan Cárcova et al., citados por Giménez (2017), es decir cuando se controla la disponibilidad hídrica y el manejo del cultivo no presenta diferencias, los rendimientos dependen mayoritariamente de la radiación fotosintética activa interceptada, que correlaciona positivamente con la RS incidente.

2.9 BALANCE HÍDRICO

Consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado período de tiempo. El riego (R) y la precipitación (Pp) proporcionan agua a la zona radicular. Los flujos de agua que salen son el escurrimiento superficial (ES) (puede ser considerado tanto como entrada como salida, dado que puede llegar agua por escurrimiento) y la percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la napa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso trasferido horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro o fuera de la zona radicular (modelo basado en Allen et al., 1998). A continuación se definirán los diferentes componentes del balance hídrico.

2.9.1 Evapotranspiración

Allen et al. (2006), consideraron a la evapotranspiración como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. Ambos procesos ocurren simultáneamente. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el canopeo del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la evapotranspiración ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la evapotranspiración ocurre como transpiración.

La ETo es la evapotranspiración de un cultivo de referencia con determinadas características como, gramínea que cubre la superficie del suelo con una altura de 8 a 15 cm de altura y uniforme, que se encuentra en activo crecimiento, y que no tiene limitantes nutricionales, hídricas ni sanitarias (Andrade et al., 2000).

Otegui (2009), la demanda atmosférica es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la evapotranspiración potencial de referencia (ETo). La principal fuerza motriz de la demanda es la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre, fuente de la energía necesaria para promover el cambio de estado del agua de líquido (en el suelo y plantas) a gaseoso (en la atmósfera). En condiciones de buena disponibilidad hídrica, el consumo de agua por parte de los cultivos (ETc) se encuentra fuertemente relacionado con la cobertura, representado por el IAF y el contenido de humedad del horizonte superficial.

2.9.2 Coeficiente del cultivo (Kc)

Allen et al. (2006), señalan que el Kc integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del cultivo de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente el suelo. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de Kc variará a lo largo del período de crecimiento del mismo.

Desde siembra hasta que el cultivo cubra aproximadamente el 10% de la superficie se denominará Kc inicial, la duración esta etapa depende del tipo de cultivo, variedad, fecha de siembra y clima. A partir que se alcanza la cobertura completa se denomina Kc medio, mientras que el valor inmediato previo a la cosecha se denomina Kc final.

2.9.2.1 Coeficiente del cultivo ajustado (Ks)

El Ks describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo (Allen et al., 1998). Dichos autores señalan que las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por parte de las raíces. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo. Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado. Cuando se

producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo, $K_s < 1$. Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo, $K_s = 1$. El cálculo de dicho coeficiente está establecido en la siguiente ecuación para cuando $D_r > AFA$:

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} = \frac{ADT - D_r}{(1 - p) ADT}$$

Donde K_s es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo (0-1).
 D_r agotamiento de humedad en la zona radicular (mm)
 ADT agua disponible total en la zona radicular del suelo (mm)
 p fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico (-)
 AFA agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm).

2.9.3 Precipitación efectiva

Es definida por FAO (2000), como la porción de la precipitación total que retiene el suelo y que está disponible para la producción de cultivos.

No toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede realmente ser utilizada por las plantas. Parte del agua de lluvia se infiltra a través de la superficie y parte fluye sobre el suelo en forma de escorrentía superficial. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo. Del total del agua que se infiltra, parte percola por debajo de la zona de raíces, mientras que el resto permanece almacenada en dicha zona y podría ser utilizada por las plantas. El agua de lluvia evaporada, la de percolación profunda y la de escorrentía superficial no pueden ser utilizadas por el cultivo, o sea no son efectivas. A la porción restante, almacenada en la zona de raíces se le denomina precipitación efectiva. En otras palabras, el término "precipitación efectiva" es utilizado para definir esa fracción de la lluvia que estará realmente disponible para satisfacer al menos parte de las necesidades de agua de las plantas. Este parámetro puede determinarse por experimentos o se estima por medio de ecuaciones empíricas (FAO, 1993).

2.10 MANEJO DEL RIEGO

El riego deficitario surge de la necesidad de gestionar el uso del agua en la agricultura y se basa en someter al cultivo a déficit hídricos a lo largo de su ciclo; mediante la aplicación de riego por debajo de las necesidades hídricas totales del cultivo (evapotranspiración), atendiendo la sensibilidad de la planta a los mismos, tanto en su intensidad y duración (Ferres y Soriano 2007, Girona et al. 2014, Lemos y García 2017).

Para Molina (s.f.), el riego deficitario, desde el punto de vista de la gestión del agua, es la disminución de la cantidad de agua de riego influyendo lo menos posible en el rendimiento del cultivo.

Según Domingo (2016), son prácticas de riego deliberadas y sistemáticas donde solo una fracción de las necesidades de agua de los cultivos no satisfechas por las lluvias, es reemplazada por el riego.

Payero et al., Payero et al., Payero et al., citados por Foster y Rovegno (2015), señalan que el riego deficitario estabiliza e incrementa los rendimientos comparando con los obtenidos en secano.

Para Fabeiro et al., citados por Foster y Rovegno (2015), los riegos deficitarios de alta frecuencia consisten en regar todo el ciclo por debajo de la demanda del cultivo pero utilizando una frecuencia de aportes suficientemente alta para evitar la aparición de situaciones de estrés trascendentes.

Una estrategia de riego deficitario controlado, según Domingo (2016), contempla tanto la fenología del cultivo como su capacidad para resistir situaciones de déficit hídrico. Consiste entonces en la aplicación de cantidades de agua inferiores a las necesidades totales durante determinados períodos del ciclo del cultivo en los que la producción y la calidad de las cosechas sean poco o nada afectadas y la aplicación total de dichas necesidades durante el resto del ciclo, en especial en aquellos períodos críticos en los que la producción y/o calidad son más afectados por la falta de agua.

2.10.1 Lámina de riego

Por definición es el volumen de agua a aplicar por unidad de superficie, expresada en mm. Para determinarla es necesario conocer los factores los que depende entre ellos el crecimiento o profundidad radicular y el umbral de riego, ambos factores dependientes del suelo y del cultivo. Primero depende del suelo (textura y estructura), después del cultivo (determina capacidad de exploración radicular y umbral de riego).

2.10.1.1 Crecimiento radicular

Uno de los elementos en la determinación de la lámina de riego es la profundidad efectiva explorada por las raíces de la planta. La profundidad radicular varía a lo largo del ciclo del cultivo, siendo máxima cuando el cultivo alcanza el máximo crecimiento. Esta puede verse limitada por las características físicas como la presencia de “suela de arada” y/o características químicas como la presencia de Aluminio intercambiable, entre otros (Roselli et al., 1998).

Doss et al., citados por Roselli et al. (1998), demostraron que la profundidad de extracción de las plantas de maíz no superaban los 46 cm, cuando las plantas alcanzaban los 46 cm de altura, en situaciones de secano. Mientras que Allen et al. (2006), para situaciones sin estrés hídrico la exploración radicular es de 1,0-1,7 m aproximadamente.

2.10.1.2 Umbral de riego

Depende de la tasa de evapotranspiración (demanda atmosférica) lo cual varía a lo largo del ciclo del cultivo. También depende de la velocidad de absorción de agua, conformada por diversos factores tales como la capacidad propia del cultivo, textura, contenido de agua, fuerzas de retención del agua del suelo.

Allen et al. (2006), establecieron un umbral de riego para condiciones de $ET_c = 5 \text{ mm.día}^{-1}$, para condiciones sin estrés hídrico, es decir fracción de agotamiento de la humedad en el suelo (p), de 0,55. Sin embargo puede ser ajustado para diferentes valores de ET_c de acuerdo a la siguiente expresión:

$$p = p_{\text{tabla}} + 0,04(5 - ET_c)$$

2.10.2 Planificación del riego

Según Otero et al. (2017), la planificación del riego evalúa el momento y la cantidad de agua a aplicar. Con la misma se puede definir estrategias de riego deficitario a fin de poder reducir el volumen de agua utilizado sin afectar el rendimiento de los cultivos. Hay varios procesos involucrados para programar el riego, entre los cuales se destaca la evapotranspiración del cultivo.

Según Tarjuelo, citado por Otero et al. (2017), el objetivo del riego es suministrar a los cultivos y pasturas, de forma eficiente y sin alterar la fertilidad del suelo, el agua adicional a la precipitación que necesitan para su crecimiento óptimo y cubrir las necesidades de lavado de sales, en caso de que se requiera, de forma que evite su acumulación en el perfil del suelo, asegurando la sostenibilidad del riego.

Según Rivetti (2006), con programaciones adecuadas de riego y con altos coeficientes de uniformidad se conseguiría aumentar la eficiencia del riego y se aseguraría una alta producción. Lo cual mejora la productividad del agua aplicada.

2.11 MEDICIÓN DEL AGUA DEL SUELO

Uno de los métodos para monitorear la humedad del suelo es la sonda FDR la cual permite estimar el contenido de humedad del suelo a través de la medición de la constante dieléctrica del suelo, Decagon (2006). La constante dieléctrica del suelo es una medida muy sensible al contenido volumétrico de agua, el mismo se relaciona directamente con la permisibilidad dieléctrica del suelo porque la constante dieléctrica del agua (80) es mucho más grande que la de los otros constituyentes del suelo como puede ser la materia orgánica (4), los minerales del suelo (4) o el aire (1). Por esto, los cambios en el contenido de agua en el suelo se pueden relacionar directamente con cambios en la capacitancia del mismo (Otero et al., 2017).

2.12 EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA

Espósito et al. (2012), definen la eficiencia en el uso del agua EUA, como la relación entre la producción de granos y el total de agua recibida.

La EUA varía entre especies, explicado por el tipo de metabolismo, composición de la biomasa, y las características del uso del agua, condicionado

por la demanda atmosférica de cada ambiente (Aloé y Toribio, citados por García y Lemos, 2017).

Es necesario considerar como entradas de agua a las precipitaciones efectivas y el agua aportada mediante riego suplementario. En el caso de riego suplementario es prioritario alcanzar altas eficiencias de uso del agua de riego (Roselli et al., 1998).

La eficiencia puede verse afectada por estrés que se presente durante el desarrollo de la planta. El efecto sobre la EUA, es dependiente del estado fenológico del cultivo al momento que éste se presente (Roselli et al., 1998).

La EUA para la producción de granos con estrés hídrico durante floración, se vio afectada (Capurro, citado por Roselli et al., 1998). Mientras que Eck, citado por Roselli et al. (1998) encontró que los tratamientos de estrés vegetativo y maduración de grano, no afectaron la EUA.

El riego es una medida de manejo que puede incrementar la EUA ya que actúa en forma inversa a un estrés (Wagger et al., citados por Roselli et al., 1998), encontraron incrementos de la EUA total para la producción de grano, debido al riego, principalmente en los años secos.

A nivel nacional según Fassio et al. (1998), aproximadamente 20 kg grano ha⁻¹ son producidos por cada mm de agua evapotranspirado.

Según Espósito et al. (2012) en INTA Manfredi la EUA es de 22 kg grano mm⁻¹ agua, para una serie de 7 años.

El riego suplementario presenta una elevada respuesta durante el período crítico, determinándose respuestas de alrededor de 20 kg grano mm⁻¹ de agua consumida durante dicho período; hasta 40 kg grano mm⁻¹ de agua consumido según el grado de estrés hídrico (Andrade y Sadras, citados por Ceriani et al., 2012).

2.13 POTENCIALIDADES PARA EL DESARROLLO DEL RIEGO

Según MGAP. DIEA (2015), Uruguay tiene una experiencia histórica en la agricultura regada principalmente en la producción del arroz que representa más del 76% del área regada nacional (184.000 ha de las 242.000 ha regadas según MGAP. DIEA, 2011).

El país cuenta con una superficie apta para la agricultura regada de 1.8 millones de hectáreas según FAO (2015) y con disponibilidad de agua que le permitirían sustentar una política de riego para incrementar en forma sustantiva su producción agropecuaria y mitigar los posibles impactos de la variabilidad climática actual y de los cambios climáticos.

Durante el período 1996 a 2001, el Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego (PRENADER), realizó una importante labor en la promoción del riego, y construcción de obras de almacenamiento de agua con destino el riego.

El objetivo general de la Estrategia fue *“promover y crear las condiciones favorables para el desarrollo del riego, aprovechando las oportunidades de aumento de la competitividad del sector agropecuario nacional, garantizando el uso sostenible de los recursos naturales y una mayor adaptación a la variabilidad climática actual y a los cambios climáticos futuros”* (FAO, 2015).

La superficie bajo riego ha crecido de 52.000 ha en 1970 en los inicios de las políticas públicas, a 184.000 ha al 2011 (FAO, 2015).

Según MGAP. DIEA (2017), para la zafra 2016/2017 el área regada de maíz se estimó en 7.784 hectáreas (12% del total sembrado), un 24% menos que en la zafra 2015/2016.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento se desarrolló en la zafra 2016/2017 en el campo experimental de la Facultad de Agronomía “Centro Regional Sur (C.R.S)”, 34° 36` latitud Sur, 56° 13` longitud Oeste, próximo a la ciudad de Progreso, Canelones. El suelo se clasificó como Brunosol Eutrítico Típico LAc perteneciente a la unidad de suelos “Tala Rodríguez”, según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976). Las características hídricas se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características hídricas del suelo en el sitio del experimento

Prof. (cm)	CC (mm.10cm⁻¹)	PMP (mm.10cm⁻¹)	D_{Ap} (g.cm⁻³)	AD (mm.horiz⁻¹)
0-20	38,9	22,5	1,25	32,8
20-45	43,6	25,1	1,43	37
45-60	38,6	21,4	1,43	34,4
60-85	38,4	21,4	1,4	42,5

Prof.= Profundidad CC= Capacidad de campo PMP= Punto de marchitez permanente
D_{Ap}= Densidad aparente. AD= Agua Disponible

3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento consistió en evaluar cuatro regímenes de disponibilidad hídrica: sin riego, aplicación de lámina bruta máxima de 3 mm, 6 mm y 9 mm por día.

Cada parcela midió 12 m de longitud y por 6 m de ancho, con un total de 72m² por parcela, contabilizando un área total del ensayo de 1152m². Cabe mencionar que no había bordes secos o sin plantas entre las parcelas para evitar el efecto de borde que puedan afectar las condiciones microclimáticas dentro del experimento. Otro ítem a resaltar es que los muestreos de materia seca se concentraban en la parte central de la parcela.

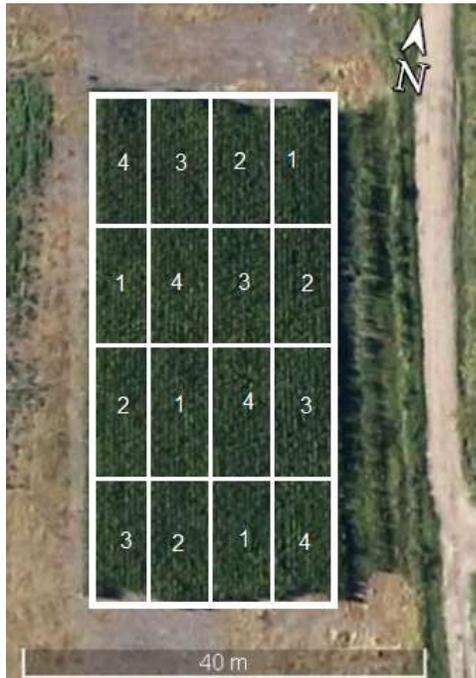


Figura 3. Croquis del experimento

3.2.1 Descripción de los tratamientos

Los tratamientos a evaluar fueron cuatro disponibilidades de agua diferentes, sin riego (T1), donde el único aporte de agua que recibe el tratamiento es producto de las precipitaciones; seguido por el tratamiento que tiene como máximo establecido aportar 3mm (lámina bruta máxima de 3mm T2); continuando con el tratamiento que tiene preestablecido un aporte de 6mm (lámina bruta máxima de 6mm T3) y por último el tratamiento con un límite máximo establecido en 9mm (lámina bruta máxima de 9mm T4), de cada tratamiento se realizaron cuatro repeticiones, simplificado se esquematizan a continuación:

- *T1 Secano, solo recibió agua de las precipitaciones.
- *T2 Máximo aporte diario por riego de 3mm (lámina bruta)
- *T3 Máximo aporte diario por riego de 6mm (lámina bruta)
- *T4 Máximo aporte diario por riego de 9mm (lámina bruta)

3.3 MANEJO DEL CULTIVO

3.3.1 Control de malezas pre-siembra y pos-siembra

El manejo realizado en pre-siembra fue barbecho químico mediante la aplicación de glufosinato, herbicida de acción sistémica, que actúa inhibiendo la actividad fotosintética provocando la muerte de las plantas, el cual se aplicó dos días previos a la siembra.

En cuanto al manejo de malezas no fue preciso hacer algún tipo de control químico, debido a que no se consideró que fuese una alta población, pero si se decidió combatir manualmente. En cuanto a plagas, y/o ocurrencia de enfermedades no se aplicó ningún producto químico, puesto que no se observó ningún tipo de daño que así lo amerite y no se evidenciaron síntomas de enfermedades.

3.3.2 Fecha de siembra, densidad y material genético

La fecha de siembra fue en época tardía el 9 de noviembre específicamente, y la emergencia se registró ocho días más tarde, el 17 de noviembre.

La sembradora fue regulada para sembrar 100.000 semillas.ha⁻¹, el método de laboreo fue bajo siembra directa, es decir labranza cero.

Finalmente se logró una población de 98.000 pl.ha⁻¹, que es adecuada para ensayo bajo riego, dado que se levanta una limitante (el agua) a modo de poder lograr los rendimientos potenciales. Cada parcela quedó conformada por doce hileras de 12 m de longitud y a una distancia entre hileras de 50 cm, totalizando así los 6 m de ancho de cada parcela.

El material genético utilizado fue AX 7822 (NIDERA S.A), con los eventos transgénicos BT11 "*Bacillus thuringiensis*", mediante la introducción del gen cry1A(b) en el genoma del maíz para la síntesis de la toxina Bt, para el control de lepidópteros. Y el evento MIR162, le confiere resistencia altamente específica a ciertos insectos lepidópteros, y es especialmente importante para complementar a campo al evento Bt11 en el control de "*Diatraea saccharalis*". El cultivar presenta además tolerancia al principio activo glufosinato de amonio. Según la evaluación de cultivares de INIA para el período 2015-2016, el cultivar es un híbrido simple, con tipo de grano semi-dentado.

La duración del ciclo del cultivo fue de 125 días aproximadamente en el período comprendido entre el 9 de noviembre y el 16 de marzo del año siguiente. La fecha de cosecha fue el 25 de marzo de 2017.

3.3.3 Manejo de la fertilización

El manejo realizado a siembra fue con fosfato diamónico, cuya fórmula química es 18-46-0. La dosis aplicada fue de 200 kg.ha⁻¹ de P₂O₅.

En el estadio V6 de la escala fenológica (Ritchie y Hanway, 1982), se refertilizó a todas las parcelas por igual con una dosis de 200 kg.ha⁻¹ de Urea cuya fórmula química es 46-0-0. La aplicación se realizó manualmente.

3.3.4 Manejo del riego

Para asegurar una adecuada humedad en el suelo para la correcta imbibición y germinación de la semilla se aplicaron 2 riegos de 20 mm, con un equipo de riego por aspersión portátil en todos los tratamientos. Además con estos riegos se llevó el suelo a capacidad de campo lo cual permitió iniciar el balance hídrico de todos los tratamientos en las mismas condiciones de humedad de suelo.

Los riegos de cada tratamiento se realizaron con equipo de riego por goteo. Los goteros eran de 4 L.h⁻¹, a un metro de distancia, con una línea porta gotero en cada fila de plantas. La intensidad de aplicación del equipo fue de 8 mm.h⁻¹.



Figura 4. Representación de la distribución de los goteros

El criterio para decidir si se regaba o no, fue el de balance hídrico diario. El cual considera las precipitaciones efectivas (P_{Pe}), el riego (R) como entradas al sistema y la evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) como salida del sistema, tal como se muestra en la siguiente ecuación. Para el cálculo del balance hídrico no se tomó en cuenta el escurrimiento dado las condiciones generadas debido al tipo de manejo del riego utilizado, no habría escurrimiento causado por el riego ni percolación, dado que se utilizaron caudales y tiempos de riego bajos lo que le da una baja IPP.

Ecuación 1 Balance hídrico

$$\text{BALANCE HÍDRICO (BH)} = P_{Pe} + R - E_{Tc}$$

El cálculo de la E_{Tc} se hace multiplicado los factores E_{To} y K_c. E_{To} es proporcionado por INIA “Las Brujas”, estación meteorológica más cercana al experimento. La E_{To} se obtiene de realizar la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y el valor de K_c son los propuestos por FAO (Allen et al., 1998), los cuales varían en cada etapa del cultivo y etapa fenológica.

3.3.5 Medición del contenido de humedad

La medición del contenido de humedad del suelo se realizó utilizando la sonda de FDR. Dicha sonda fue calibrada para el suelo que se instaló el experimento. Para la calibración se extrajeron muestras de suelo de cada horizonte en el tratamiento sin riego, en diferentes momentos y con diferentes contenidos de humedad. Al mismo tiempo que se extraía la muestra se registraban las lecturas de la sonda en el tubo de acceso a dicho tratamiento, en las mismas profundidades de donde se extrajo la muestra. Con esto se obtuvieron una serie de pares de punto con los cuales se construyeron las rectas de calibración para las diferentes profundidades (Otero et al., 2017).

3.4 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

3.4.1 Hipótesis biológicas

El riego deficitario y completo permite obtener los rendimientos potenciales para los sistemas de producción nacionales.

3.4.2 Hipótesis estadísticas

$H_0: \tau \text{ sin riego} = \tau_{3\text{mm}} = \tau_{6\text{mm}} = \tau_{9\text{mm}}$

$H_a: \text{al menos 1 } \tau_i \text{ es diferente}$

3.4.3 Diseño experimental

El diseño experimental fue un Diseño en Bloques Completos al Azar (D.B.C.A), formado por cuatro bloques, y cuatro tratamientos, en total 16 unidades experimentales.

Modelo: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \xi_{ij}$

Y_{ij} : rendimiento en kg.há⁻¹

μ : media poblacional del rendimiento

τ_i : efecto relativo del i-ésimo tratamiento

β_j : efecto relativo del j-ésimo bloque

ξ_{ij} : error experimental asociado al i-ésimo tratamiento en el j-ésimo

bloque

Siendo $i = 1, 2, 3, 4$

$j = 1, 2, 3, 4$

Supuestos al modelo

Es correcto (en relación al material experimental)
Es aditivo
No existe interacción bloque por tratamiento
A los errores experimentales:
Son variables aleatorias
 $\xi_{ij} \sim N$
 $E(\xi_{ij}) = 0$ para todo i, j
 $V(\xi_{ij}) = \sigma^2$ para todo i, j
Son independientes

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico libre "RStudio" versión 1.1.453

Con este se realizaron:

Análisis de varianza (ANAVA), mediante análisis este se descompone la variación total en tantos componentes como tenga el modelo.

Pruebas de Comparación Múltiple, se realizó una prueba de Tukey con 5% de significancia.

3.6 DETERMINACIONES EFECTUADAS

3.6.1 Producción de materia seca

Se efectuaron tres muestreos de materia seca (MS), por tratamiento y por parcela es decir, 16 muestras por cada fecha de muestreo, en un intervalo de aproximadamente 15 días

Los muestreos consistieron en extraer 2 m lineales de la misma hilera, los cuales se realizaron para cada parcela, siempre evitando los bordes, es decir cosechando en el centro de la parcela.

Las muestras obtenidas fueron particionadas en biomasa de hojas y tallo, para un más rápido y homogéneo secado a estufa a 60°C. Además del peso, se midió altura de planta.

3.6.2 Contenido de humedad en suelo

Con la finalidad de realizar un adecuado manejo del riego, se monitoreó la humedad de suelo con una alta frecuencia, de dos a tres veces por semana (en algunos casos antes y después del riego) utilizando sonda de FDR modelo Pr2/6 100 cm, para ver los mm de agua en el suelo, y para verificar un correcto manejo del riego.

3.6.3 Cosecha de granos

La cosecha se realizó de forma manual, se tomaron 3 submuestras de 2 m lineales, de hileras centrales de la parcela, totalizando 6 m², para estimar así rendimiento en grano, y los componentes del mismo. Dentro de esta muestra se debió submuestrear para obtener el dato de rendimiento lineal, donde se estimó número de hileras por espiga, granos por hilera de cada espiga, número de espigas por planta y por último el peso de mil granos (PMG). Las mediciones fueron corregidas a 14% de humedad, dado que entre muestras presentaban una gran variación en cuanto al porcentaje de humedad.

3.6.4 Contenido de humedad en grano

Se realizaron 3 a 4 medidas por muestra, con un aparato medidor de humedad de grano, modelo “Multi grain dickey John”, el cual calcula automáticamente el contenido de humedad en la muestra (ver Figura 5).



Figura 5. Medidor de humedad en grano modelo “Multi-grain Dickey John”

3.7 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DE EVALUACIÓN

Las siguientes figuras muestran los promedios mensuales para la serie histórica de 1972-2017, y los promedios mensuales para la zafra 2016-2017, para la estación de crecimiento del maíz, proveniente de la estación de INIA “Las Brujas”, para los diferentes parámetros climáticos relevantes, como las precipitaciones, temperaturas, radiación solar. Para el caso de la variable de evapotranspiración de Penman-Monteith (ET_o) se utilizó una serie de 1980-2017.

3.7.1 Precipitaciones

La Figura 6 muestra que para los meses de octubre y noviembre los valores de precipitaciones se ubican por debajo de la media histórica. En el mes de diciembre y enero llovió más que el promedio histórico, pero en los meses de febrero y marzo, las precipitaciones fueron menor al promedio de la serie.

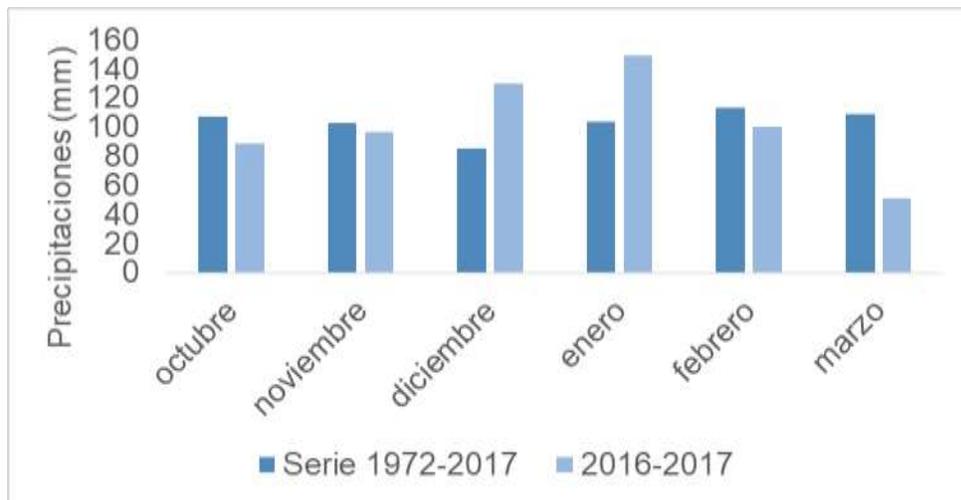


Figura 6. Precipitaciones (mm) promedio mensual serie 1972- 2017 y período 2016- 2017

Fuente: elaborado en base a datos de estación meteorológica INIA LB.

3.7.2 Temperaturas

Observando la gráfica de temperatura, los valores promedio de la serie histórica con respecto a los valores promedio registrados en el año del ensayo no presentan diferencias, es decir presentan un comportamiento o patrón similar. Sin embargo en el mes de febrero, las temperaturas de la zafra son superiores a los promedios de la serie histórica.

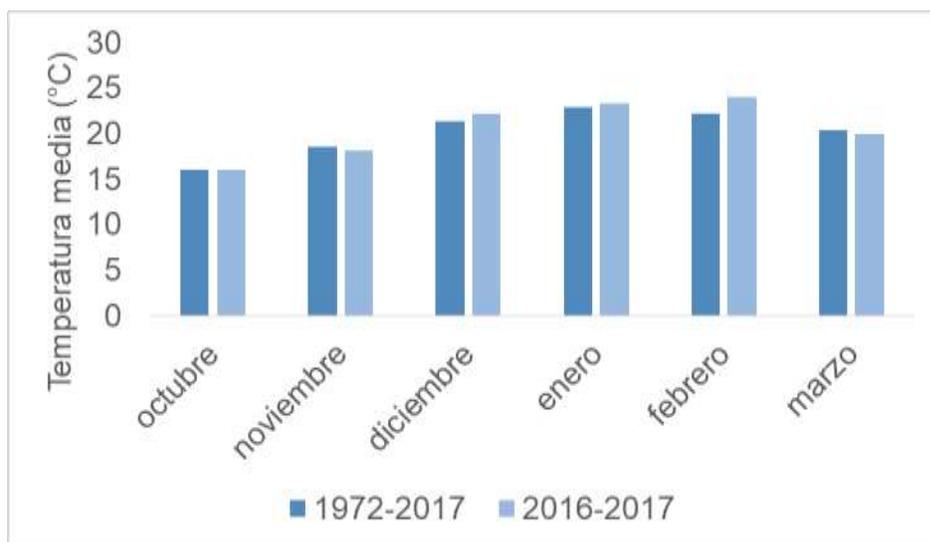


Figura 7. Temperaturas (°C) promedio mensual serie 1972- 2017 y período 2016- 2017

Fuente: elaborado en base a datos de estación meteorológica de INIA LB.

3.7.3 Radiación solar

Para los meses de noviembre y diciembre los valores de radiación fueron mayores a los registrados por la serie. En el mes de enero no hay diferencias con la serie histórica, pero hay que recordar que fue el mes que presentó valores de PP mayores al promedio de la serie, donde sería esperable una menor radiación solar, producto de una mayor cantidad de días nublados.

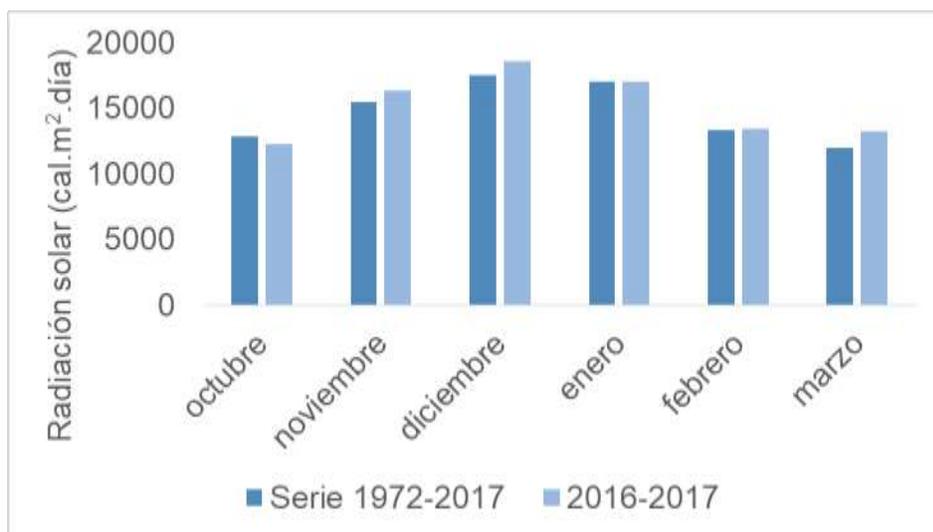


Figura 8. Radiación solar (cal.m².día) promedio serie 1972- 2017 y período 2016- 2017

Fuente: elaborado en base a datos de estación meteorológica INIA LB.

3.7.4 Evapotranspiración Penman-Monteith

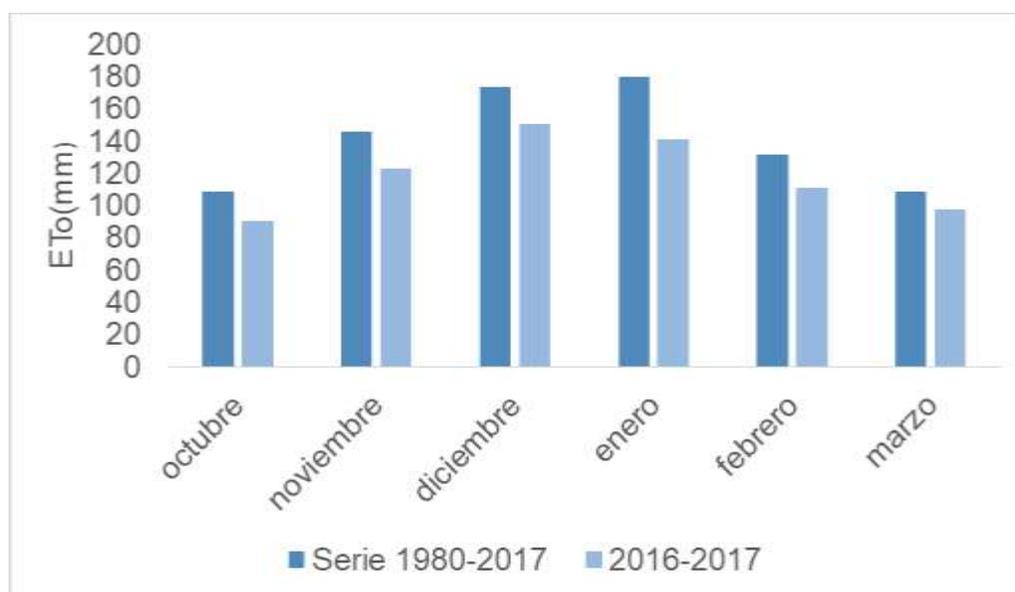


Figura 9. Evapotranspiración “Penman Monteith” promedio mensual 1980- 2017 y período 2016- 2017

Fuente: elaborado en base a datos de estación meteorológica INIA LB.

Al observar la gráfica de radiación solar Figura 8, se visualiza que la diferencia es mínima en los meses de noviembre y diciembre para el año en estudio, mientras que en la gráfica de ETo Figura 9, no hay diferencias en el patrón de distribución de las columnas, si se ve una menor magnitud, la cual no es explicada por la radiación solar, dada que está no varía con respecto a la serie histórica, es decir que hay más variables climáticas que estarían explicando el comportamiento diferencial de la ETo, que pueden ser la humedad relativa, velocidad del viento o incluso las temperaturas.

Como comentario de la gráfica se puede decir que el valor promedio para el mes de enero fue el mínimo registrado para la serie establecida (1980-2017) correspondiente al mes de enero, coincidiendo con el valor obtenido en el mes de enero del ensayo correspondiente a la zafra 2016-2017, el cual es de un valor de 4,6 mm.

3.7.5 Viento

Según FAO (1990), el viento es uno de los factores climáticos que influye en la tasa de evaporación, dado que el mismo se encarga de remover el vapor hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se sustituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye, que es lo que ocurre en el período del ensayo, si se observa los valores de vientos registrados, fueron promedialmente menores que el promedio de la serie histórica.

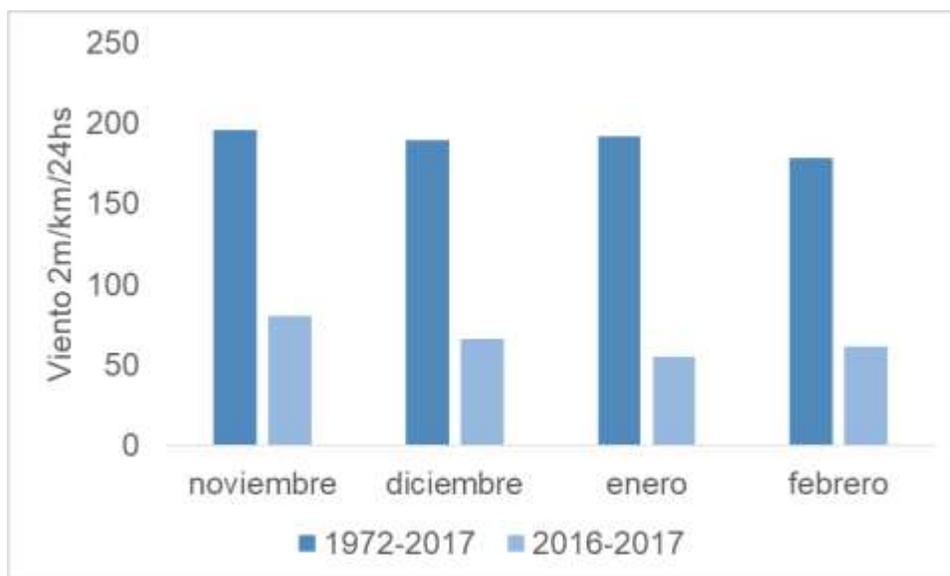


Figura 10. Viento (2m/km/24hs) promedio mensual serie 1972- 2017 y período 2016- 2017

Fuente: elaborado en base a datos de estación meteorológica INIA LB.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 MATERIA SECA TOTAL

Las condiciones climáticas de la zafra fueron determinantes de una menor radiación durante el PC del cultivo y a su vez mayor disponibilidad de agua, producto de las precipitaciones ocurridas durante el mes de enero, permitiendo así la máxima deposición de MS, dado que en dicho período se expresa su máxima TCC (Andrade et al. 1996a, 2000a).

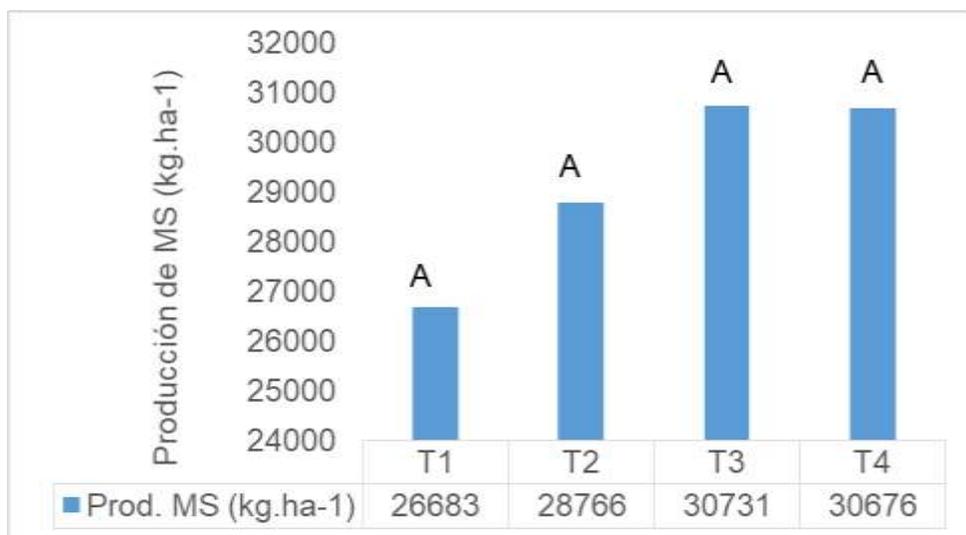


Figura 6. Producción de materia seca (Kg.MS ha⁻¹)

Los valores de materia seca son coincidentes con los volúmenes de agua recibidos durante el ciclo del cultivo. A medida que se aumenta la lámina de riego el cultivo expresó un mayor potencial de crecimiento.

El T1 obtuvo un potencial de producción de materia seca de 26 tt/há⁻¹, mientras que el T2 obtuvo un 8% más de producción, y por último los tratamientos 3 y 4 que presentaron una superioridad de producción de materia seca del 15% con respecto al T1.

Andrade et al. (1996), obtuvieron rendimientos máximos, en condiciones sin deficiencias hídricas ni nutricionales, asociados a una producción de biomasa aérea de 25.000 a 30.000 kg.ha⁻¹.

Para las zafras 2005-2006 a 2012-2013 Espósito et al. (2015), obtuvieron rendimientos promedio de 18.745 kg.ha⁻¹, bajo condiciones de riego,

presentando valores mínimo de 16.300 kg.ha⁻¹, y máximos de 22.365 kg.ha⁻¹. Cabe mencionar que las condiciones climáticas donde se desarrollaron dichos experimentos, son diferentes a las de Uruguay, como lo es la cantidad y distribución de las lluvias a lo largo del año.

En la localidad de Río Cuarto (Córdoba) los valores de precipitaciones promedio son de 850mm, mientras que en Uruguay son 1000-1100 mm hay un gradiente creciente desde la zona Sureste a Noroeste. Por otro lado la amplitud térmica, es similar para ambos sitios con valores de 22-10 °C para Río Cuarto y 21,3- 12,3 °C Montevideo.

Según Andrade et al. (1996), en ambientes con alta radiación solar y elevada amplitud térmica el maíz produce, en ausencia de estreses bióticos y abióticos, muy buenos potenciales de rendimiento, que es lo que ocurrió en este trabajo, dado que se generaron dichas condiciones.

Según INIA e INASE (2019) para el período 2018-2019 bajo condiciones de riego y para la localidad de Melilla obtuvieron una producción de biomasa de 32.415 kg.ha⁻¹, para el cultivar utilizado en el ensayo.

Mediante un análisis de varianza se evaluaron los valores de materia seca obtenidos, los mismos arrojaron que no hay diferencias significativas entre los tratamientos sin riego vs. regados para esta variable en cuestión. Dicho análisis presentó un elevado valor de diferencia mínima significativa la cual es de 6694 kg.há⁻¹.

4.1.1 Comportamiento en la evolución de materia seca

Cuadro 3. Evolución de la producción de materia seca en kg.há⁻¹

Trat./fecha	16/12/2016	27/12/2016	16/1/2017	16/2/2017
T1	2076	4248	14866	26683
T2	2087	5697	15295	28766
T3	2143	6225	15915	30767
T4	2342	5580	16870	30731

En el Cuadro 3, se muestra el comportamiento que presentan los diferentes tratamientos en cuanto a la evolución de la generación de Materia Seca (MS) según disponibilidad hídrica, el cual es similar entre los diferentes tratamientos a medida que avanzaba el cultivo en su estación de crecimiento, y a su vez lo es a medida que aumenta la disponibilidad hídrica, permitiendo explotar la capacidad del cultivo de generar materia seca y así poder expresar su potencial.

4.1.2 Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

La tasa de crecimiento del cultivo expresada en kgMS.día^{-1} hace referencia a la diferencia entre la materia seca producido entre dos fechas de muestreo, dividido entre el intervalo de días que transcurrieron, véase en el siguiente cuadro.

Cuadro 4. Tasa de crecimiento del cultivo (kgMS.día^{-1})

Tratamiento	TCC 27-12	TCC 16-01	TCC16-02	TCC promedio
T1	197,5	530,9	381,2	396,9
T2	328,2	479,9	434,5	430,3
T3	371,1	484,5	479,1	461,7
T4	294,4	564,5	447,1	457,9

El Cuadro 4 muestra que si bien en la primera fecha de muestreo no hay una tendencia clara, excepto en el tratamiento sin riego, los demás tratamientos reciben la misma cantidad de agua por riego. Dicha tendencia se incrementa a lo largo de las sucesivas fechas de muestreo. Salvo en los tratamientos que recibieron más riego como el de 6 mm y el de 9 mm donde no hay diferencias, podría verse una pequeña diferencia en el tratamiento regado con 3 mm.

4.2 EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN EL RENDIMIENTO

En la siguiente Figura 12 se muestran los resultados del rendimiento de los distintos tratamientos estudiados. El análisis estadístico indica que hay diferencias significativas para $\alpha = 0.05$, entre el tratamiento sin riego (T1) y el tratamiento de 9mm (T4). No evidenciándose diferencias entre los tratamientos de 3mm (T2) y 6mm (T3).

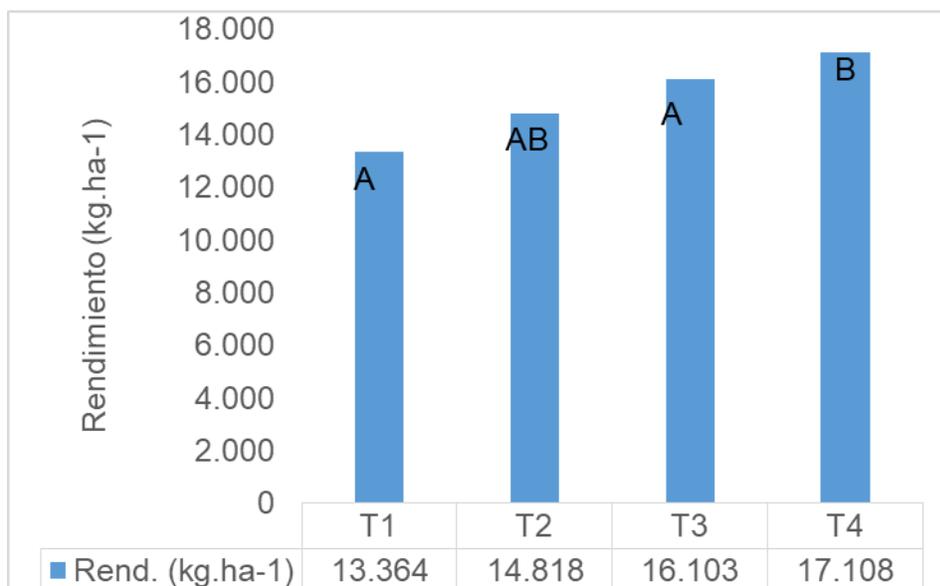


Figura 7. Rendimiento en grano (kg.ha⁻¹) de cada tratamiento evaluado

En cuanto al rendimiento en grano se observa que el T1 presenta diferencias significativas con respecto al T4. Sin embargo los T2, T3 y T4 no presentan diferencias significativas entre estos.

Cabe destacar el alto rendimiento obtenido en el T1 el cual fue de 13 t/há⁻¹, siendo este rendimiento obtenido gracias al aporte hídrico de las precipitaciones. Mientras que los demás tratamientos además del aporte de las precipitaciones se debe agregar el aporte de agua mediante el riego, lo que explica la superioridad obtenida en los T2, T3 y T4 con valores de 11%, 20% y 28% respectivamente por encima de T1.

La máxima producción medida la presentó el T4 cuyo rendimiento promedio se ubica en 17.000 kg.ha⁻¹, siendo superior al potencial de rendimiento reportado por García et al. (2017), los cuales obtuvieron un valor de 12.500 kg.ha⁻¹. Además en concordancia Giménez (2017) reportó valores de rendimiento de 14.600 kg.ha⁻¹, a igual densidad de siembra que el ensayo, es decir 100.000 plantas/há.

Alsina (2015), logró rendimientos potenciales superiores a 15.000 kg.ha⁻¹, en cultivos de maíz conducidos sin restricciones hídricas, nutricionales y sanitarias en Argentina.

Los altos valores obtenidos para el T1, presentó un valor de 13.000 kg.ha⁻¹, aún sin haberse registrado precipitaciones en el período crítico del

cultivo. Para esa zafra la evaluación de cultivares de INIA e INASE obtuvieron rendimientos promedios de 10.800 kg.ha⁻¹ para la localidad de “Young” mientras que para “La Estanzuela” obtuvieron valores promedios que oscilaron entre los 9.000 kg.ha⁻¹ y los 8.500 kg.ha⁻¹, diferenciándose estos por la época de siembra, temprana y tardía respectivamente. Destacándose con máximos rendimientos por encima de los 11.500 kg.ha⁻¹, para dicha evaluación.

Resultados obtenidos por Doorenbos y Pruitt (1986), a nivel experimental, indican que alcanzaron rendimientos de aproximadamente 17 t/ha⁻¹, sembrados con un óptimo suministro de agua y nutrientes minerales, bajo condiciones ideales y excelente control de plagas y malas hierbas. Normalmente se alcanzan rendimientos a nivel comercial de entre 11y 14 t/ha⁻¹, bajo condiciones de riego y alta fertilidad.

Según la evaluación de cultivares INIA e INASE para el período 2018-2019 donde se evaluó el cultivar bajo condiciones de riego en la localidad de Melilla se obtuvo un rendimiento de 21.610 kg.há⁻¹, siendo este valor muy superior a los obtenidos en el ensayo (INIA e INASE, 2019).

4.2.1 Índice de cosecha de acuerdo a la disponibilidad hídrica

Para los diferentes tratamientos se calculó el índice de cosecha, dicho indicador mide la relación entre el rendimiento en kilogramos obtenidos y la producción de materia seca lograda, los mismos se muestran en un cuadro a continuación.

Cuadro 5. Índice de cosecha (IC)

Tratamiento	IC = (rendimiento kg.há ⁻¹ / materia seca kg.há ⁻¹)
T1	0,50
T2	0,51
T3	0,52
T4	0,56

Como se observa en el Cuadro 5, el índice de cosecha aumenta a medida que lo hace el rendimiento y también la producción de materia seca, pero para que la relación sea más alta, el aumento del rendimiento tiene que ser mayor que el de la producción de materia seca. Esto ocurre a medida que aumenta la disponibilidad hídrica.

4.2.2 Eficiencia en el uso del agua EUA

La EUA se estimó teniendo en cuenta el rendimiento en grano de cada uno de los tratamientos y el aporte de agua proveniente del riego y de las precipitaciones efectivas.

Cuadro 6. Eficiencia en el uso del agua EUA

Trat.	EUA (kg grano/ mm agua consumidos)
T1	31
T2	30
T3	31
T4	32

La ocurrencia de precipitaciones a lo largo de todo el ciclo del cultivo hizo que la EUA no se diferenciara entre los tratamientos, ya que no se lograron condiciones importantes de déficit hídrico en ninguno de ellos.

Los valores de EUA obtenidos son mayores a los reportados por algunos autores como Fassio et al. (1998), los cuales obtuvieron valores de 20 kg grano/ mm agua consumido. Por otro lado Andrade y Sadras, citados por Ceriani e Inella (2012), obtuvieron valores de EUA desde 20 kg grano/ mm agua consumido hasta los 40 kg grano/ mm agua consumido.

4.3 EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE LOS COMPONENTES

4.3.1 Número de granos

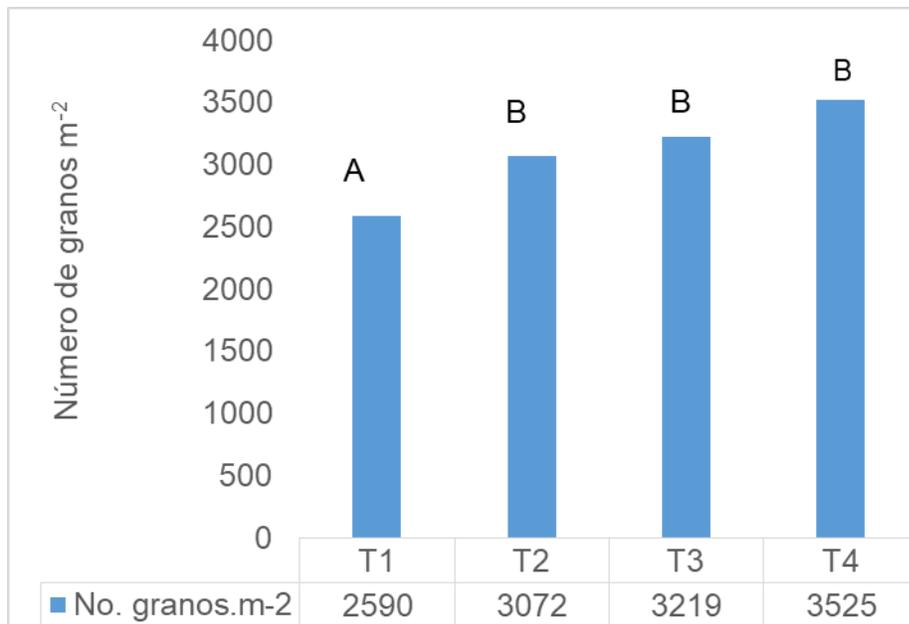


Figura 8. Número de granos m^2 para los tratamientos evaluados

En la Figura 13 se aprecia que el T1 presenta menores valores promedio, si se compara con todos los tratamientos regados. Del análisis estadístico se desprende que el T1 difiere significativamente de todos los tratamientos regados, y que a su vez los tratamientos regados no se diferencian entre sí. Los tratamientos regados es decir T2, T3 y T4 presentan una superioridad del orden del 19%, 24% y 36% respectivamente por encima de T1.

4.3.2 Peso de mil granos (PMG)

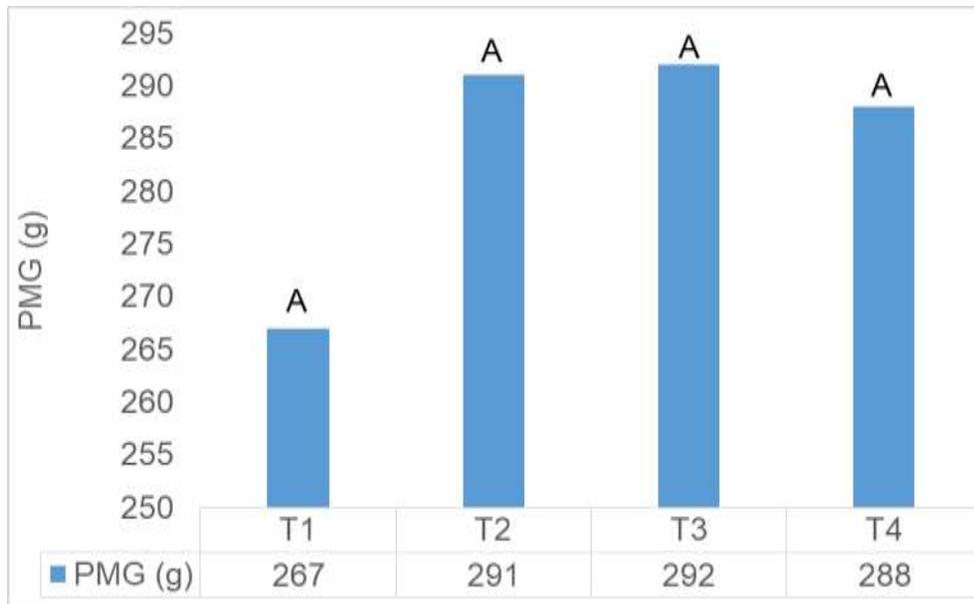


Figura 9. Peso de mil granos (PMG) para los tratamientos evaluados

No hay diferencias significativas entre ellos, pero cabe mencionar que quizás esto se deba a una gran diferencia mínima significativa, la cual es de 49.53g.

Cabe resaltar que el PMG obtenido para cualquiera de los tratamientos evaluados dista del potencial estimado para el cultivar (310g), a pesar de tener condiciones de radiación favorables durante la etapa de llenado de grano, las temperaturas medias fueron superiores a la media de la serie histórica, y según Fassio et al. (1998), la temperatura acelera el desarrollo, mediante la acumulación de °días en menor tiempo, dado una mayor temperatura base, acortando así la fase de llenado.

4.4 BALANCE HÍDRICO

Se realizó un balance hídrico de paso diario para el manejo del riego y para la determinación de la efectividad de la lluvia.

Cuadro 7. Balance hídrico del ensayo

Trat	Riego efectivo (mm)	PPe (mm)	Agua total (mm)	Ks	ETc ajust. (mm)	Variación (mm)
T1	40	368	408	0,88	480	-72
T2	138	348	486	0,96	529	-43
T3	179	342	521	0,99	550	-29
T4	187	347	534	1,00	556	-22

PPe: precipitaciones efectivas

Del Cuadro 7 se observa que el agua total lo que sería visto como “oferta” no cubre la demanda atmosférica. Ante esto, se plantea la interrogante de por qué aun así los tratamientos regados se diferenciaron del seco. Una posible respuesta es que se deba al patrón de distribución de las precipitaciones, dado que durante el período crítico del cultivo no se registraron precipitaciones.

La columna riego corresponde al riego efectivo (mm), calculado a partir del riego aplicado una eficiencia de aplicación del 90 %. A modo de aclaración el T1 presenta 34 mm que corresponden a dos riegos que recibieron todas las parcelas, a efectos de garantizar la correcta implantación del cultivo.

Como precipitaciones efectivas (mm), se consideraron los milímetros que devolvieron la humedad del suelo en la profundidad radical a capacidad de campo. No se descartaron los milímetros escurridos, por lo tanto el error cometido estaría en los eventos de pocos milímetros y de alta intensidad. Los datos climáticos utilizados son de la Estación meteorológica de la Estación Experimental de INIA Las Brujas, ubicada a 12 km del sitio del ensayo. Los datos de lluvia fueron medidos localmente colocándose un pluviómetro cerca del sitio del ensayo ya que los eventos de lluvia varían localmente.

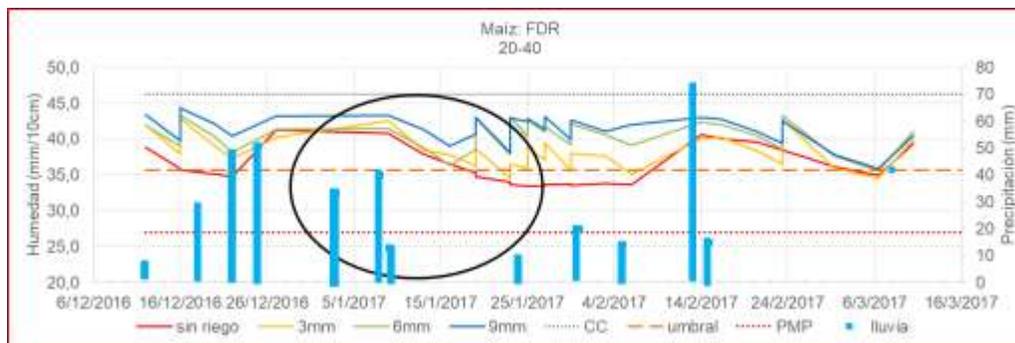
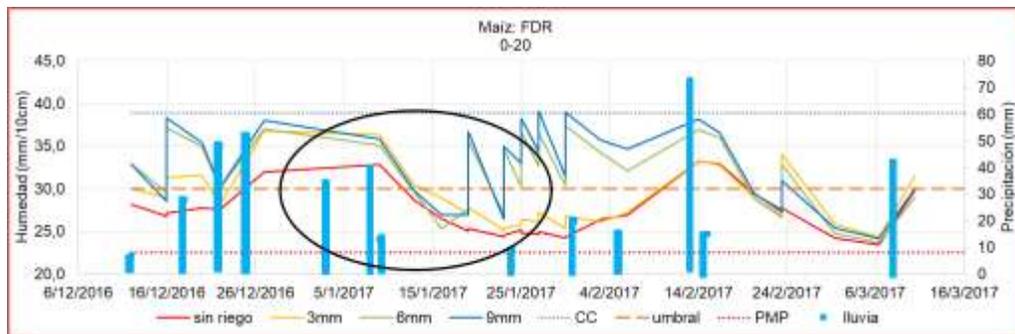
La columna denominada Ks hace referencia a un factor de ajuste estomático producto del estrés hídrico que sufre el cultivo en ese momento; el mismo se da en los tratamientos deficitarios donde el nivel de humedad del suelo llegó y superó al umbral recomendado para el cultivo en términos de agotamiento de agua disponible. Respecto a los valores que éste adquiere cabe

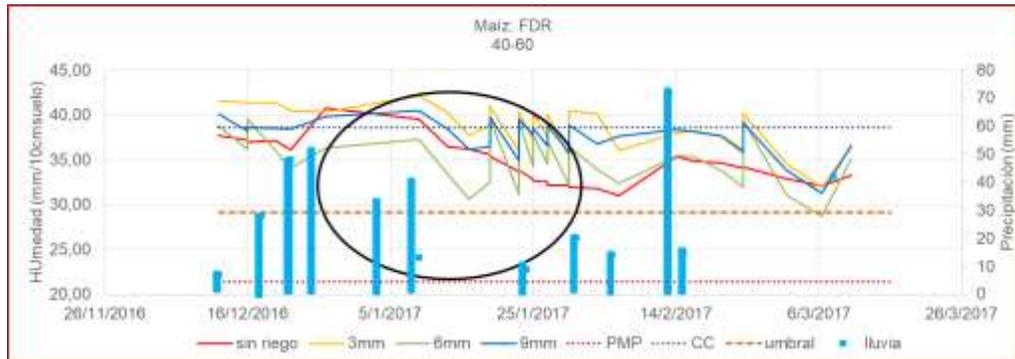
mencionar que efectivamente hubo ajuste estomático en el T1 y T2, mientras que en el T3 y T4 no hubo ajuste estomático por ende el valor del mismo es de 1.

La columna denominada “Variación (mm)” corresponde a la diferencia entre el agua disponible (mm) la cual a su vez está compuesta por el riego efectivo (mm) y las precipitaciones efectivas (mm); y la demanda atmosférica establecida mediante ETo (mm) corregida por el coeficiente del cultivo (Kc) obteniendo la ETc (mm). En el T1, T2 y T3 el agua disponible no llega a cubrir la ETc registrándose un déficit del 11%, 9% y 5% respectivamente.

4.5 MEDIDAS DE HUMEDAD DEL SUELO

A continuación se muestran las medidas de humedad del suelo para tres estratos de profundidad, 0-20 cm; 20-40 cm y 40-60 cm, realizadas con la sonda FDR.





Área encerrada en un óvalo indica período crítico del cultivo.

Figura 10. Evolución de la humedad del suelo medida con sonda FDR para tres profundidades y precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo

En el tratamiento sin riego, el nivel de humedad descendió por debajo de nivel umbral en los primero dos estratos de profundidad. Esta condición ocurrió específicamente durante el período crítico del cultivo, es decir entorno a floración, si bien ocurren eventos de precipitaciones en dicho período no son suficientes para elevar el contenido de humedad más allá del umbral. Sin embargo al finalizar dicho período ocurre un evento importante de precipitación que eleva el contenido de humedad más allá del valor umbral.

En el tratamiento de 3 mm, el nivel de humedad estuvo por debajo o muy próximo al nivel de umbral, pero el nivel de estrés fue menor con respecto al tratamiento sin riego, lo que se ve reflejado en el Cuadro 4, donde el valor de K_s es de 0,96, si bien ocurre un ajuste estomático producto de las deficiencias hídricas, éste no tiene un gran impacto.

Finalmente en los tratamientos de 6 y 9 mm el nivel de humedad en el suelo se mantuvo por encima del nivel umbral, no generándose condiciones de estrés en ningún momento del ciclo del cultivo, producto del aporte de agua de riego y de las precipitaciones ocurridas durante todo el ciclo del cultivo, que permitieron que el mismo no presentará valores de humedad próximos al umbral del cultivo.

4.6 EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

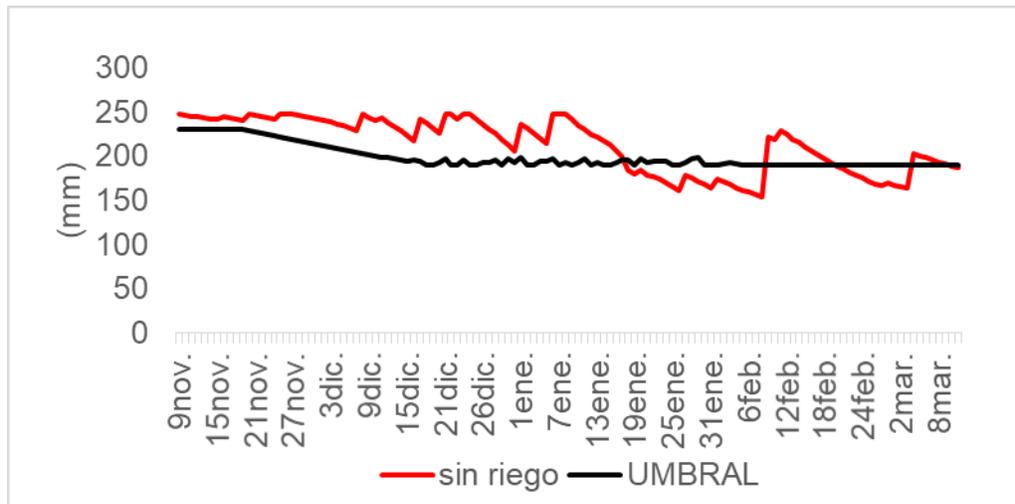


Figura 16. Evolución del contenido de agua total en el tratamiento sin riego, para profundidad de 60 cm

En el T1, el agua disponible desciende más allá del umbral, más que nada durante el período que va desde el 19 de enero al 12 de febrero, donde no ocurren precipitaciones. En este período el balance se hace utilizando un valor de K_s menor a 1, dado que el cultivo se encuentra estresado, debido a las deficiencias hídricas. Dicho coeficiente de estrés (K_s) se calcula como la relación entre el agua fácilmente disponible y el déficit acumulado en el suelo.

Haciendo referencia al Cuadro 4, para el T1 el aporte de agua total es decir, lluvias más riego, y observando la demanda ET_c , hay un "déficit", por ende se asociaría que el cultivo no sufre estrés, pero no es así, dado que las gráficas de evolución del contenido de humedad muestran otra cosa. El contenido de agua desciende más allá del umbral establecido para el cultivo, a partir del 19 de enero, levantando esa restricción a partir del 12 de febrero, gracias a las precipitaciones ocurridas, saliendo así de la situación de déficit, hasta volver a descender por debajo del umbral el 18 de febrero, donde en ese período no hubo una recarga del suelo; y un último período de recarga el 4 de marzo, pero en esta fecha el cultivo ya estaba en un estado fisiológico avanzado como para responder a la disponibilidad hídrica. Estos períodos de recarga, ocurrieron de forma desfasada con el período crítico del cultivo, donde las mismas serían aprovechadas con mayor eficiencia.

A lo largo del ciclo del cultivo el T1 recibió 483 mm de agua provenientes exclusivamente de las precipitaciones, y según data en la bibliografía el maíz requiere entre 400 y 700 mm para alcanzar altos rendimientos, Doorenbos y Pruitt (1977) lo cual también apoyaría la idea de que fue un buen año para el maíz, que tuvo el agua necesaria en el momento justo, que es considerado el período crítico en el mes de enero, en donde durante el mes llovieron 119 mm superando la media mensual que es de 100mm.

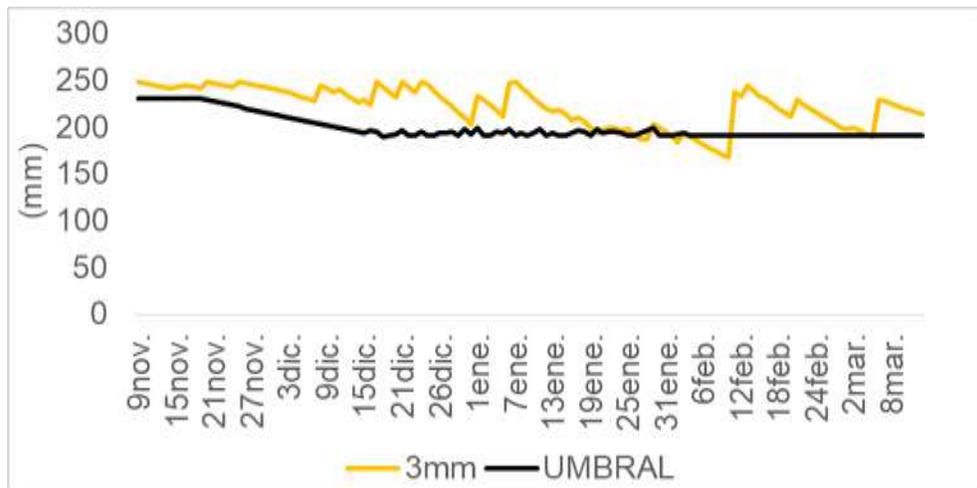


Figura 17. Evolución del contenido de agua del tratamiento de 3 mm, profundidad de 60 cm

El T2 presentó un comportamiento similar al T1, pero además hay que sumarle el efecto del riego, lo que favoreció que el agua disponible no descendiera demasiado por debajo del umbral. La excepción es en el mismo período que afectó al tratamiento sin riego, donde las elevadas ETo, y temperaturas, disminuyeron el agua disponible, dado un mayor consumo por parte del cultivo. A partir del 15 de febrero la ETc comenzaron a disminuir, pero no se registraron lluvias demasiado importantes (15mm), y luego hasta marzo no se registraron lluvias, lo que está contribuyendo entonces a la “recarga del suelo”, es el agua aportada por el riego.

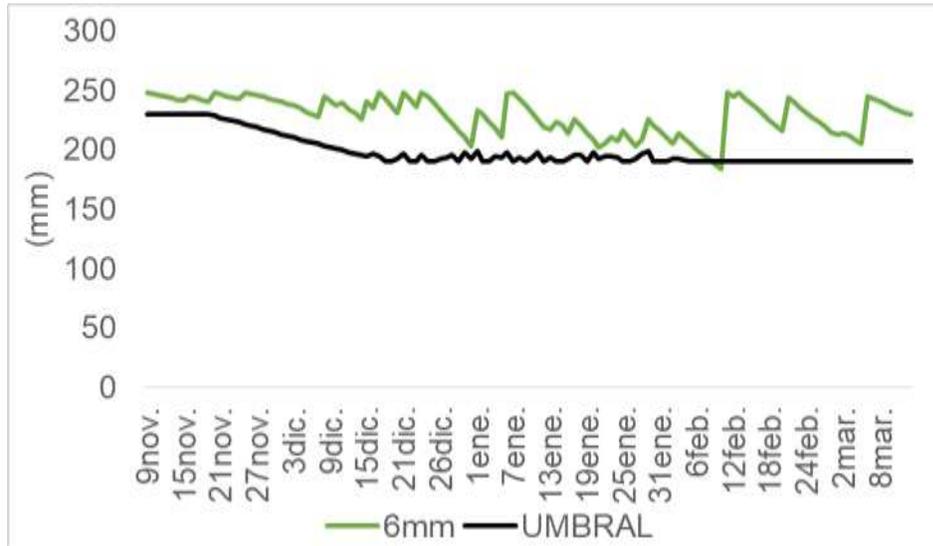


Figura 18. Evolución del contenido de agua en el tratamiento de 6 mm, profundidad de 60 cm

En T3, casi que en ningún momento el agua disponible disminuyó por debajo del valor de umbral. Salvo dos veces en que estuvo próximo al valor de umbral, 1º. de enero, lo que es posible atribuírselo a las altas demandas atmosféricas, temperaturas propias del verano, y ausencia de precipitaciones importantes, de igual manera el riego fue suficiente para no descender más allá del umbral. En el caso de 12 de febrero, los factores que actuaron el primero de enero, aquí están actuando en mayor magnitud, donde el valor de K_s es menor a uno, afectando así el consumo de agua por parte del cultivo.

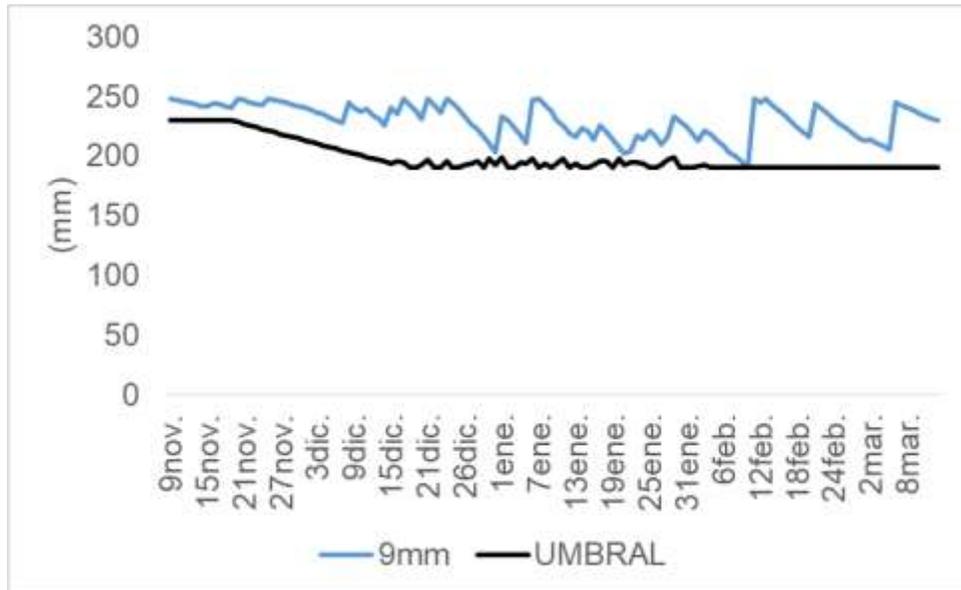


Figura 19. Evolución del contenido de agua en el tratamiento de 9 mm, profundidad de 60 cm

En el T4, en ningún momento la humedad del suelo disminuyó por debajo del umbral, algo factible dado que en este año en particular la demanda atmosférica no fue demasiado elevada. Gracias a un constante aporte del agua de riego, éste no permitió descender demasiado el nivel de agua disponible, y cuando no, el mismo fue aumentado por el aporte de las precipitaciones.

5. CONCLUSIONES

Se dieron diferencias significativas en el rendimiento entre los tratamientos regados vs sin riego, a pesar de haber sido un año con precipitaciones por encima de la media.

En el tratamiento sin riego la mala distribución de las precipitaciones, impacto negativamente en el rendimiento, dado que las mismas no ocurrieron durante el Período crítico del cultivo, destacándose así su importancia.

Hay un efecto significativo del componente número de granos por unidad de superficie en las diferentes disponibilidades hídricas a favor de los tratamientos regados en relación al sin riego.

En el componente de peso de mil granos, no existieron diferencias significativas, entre los tratamientos estudiados, esto se explica en que el PMG es un componente del rendimiento que está determinado genéticamente, y que por ende las condiciones del cultivo no influyen en él.

Las necesidades del cultivo (ETc) y de riego para este año en particular fueron de 556mm y 187mm respectivamente en el tratamiento bien regado (T4).

El uso de la herramienta de balance hídrico para el manejo del riego resultó de utilidad para determinar de forma más precisa los momentos y láminas de riego a utilizar, mejorando la eficiencia del riego.

6. RESUMEN

Durante la zafra 2016-2017 se llevó a cabo en el “Centro Regional Sur” ubicado próximo a Progreso, Canelones, un experimento en el cual se evaluó el efecto del riego deficitario y completo en el cultivo de maíz. El ensayo consistió en cuantificar rendimiento y componentes del mismo al final del ciclo de crecimiento. Además se cuantificó a lo largo del ciclo del cultivo la evolución de la deposición de Materia Seca (MS) de los diferentes tratamientos evaluados. Los tratamientos evaluados fueron: un testigo sin riego sólo el aporte de las precipitaciones (T1), aporte de agua máximo de 3mm/día (T2), 6mm/día (T3) y 9mm/día (T4). Si bien fue un año con precipitaciones superiores a la media durante los meses de diciembre a enero, se vieron diferencias significativas entre los tratamientos regados y el sin riego. El T1 presentó un rendimiento de 13.300 kg.ha⁻¹, un 11%, 20% y 28% más que el T1 presentaron T2, T3 y T4 respectivamente. En cuanto a los componentes del rendimiento en el caso de número de granos.m² se evidenciaron diferencias significativas, lo que explicó las diferencias en rendimiento entre los tratamientos dado que no se evidenciaron diferencias significativas en el componente de Peso de mil granos.

Palabras clave: Maíz; Deficiencia hídrica; Riego.

7. SUMMARY

During the 2016-2017 harvest, it was carried out in the "South Regional Center" located next to Progreso, Canelones, an experiment in which the effect of deficit and complete irrigation on corn cultivation was evaluated. The test consists of quantifying yield and components thereof at the end of the growth cycle. In addition, the evolution of the dry matter deposition (MS) of the different treatments evaluated was quantified throughout the crop cycle. The treatments evaluated were: a control without irrigation only the contribution of rainfall (T1), maximum water supply of 3 mm / day (T2), 6 mm / day (T3) and 9 mm / day (T4). Although it was a year with rainfall over the media during the months of December to January, the specific differences between irrigated treatments and irrigation without. The T1 presented a yield of 13,300 kg.ha⁻¹, 11%, 20% and 28% more than the T1 presented T2, T3 and T4 respectively. Regarding the yield components in the case of number of grains.m² significant differences were evidenced, which specified the differences in performance between the treatments given that there were no significant differences in the component of Weight of one thousand grains.

Key words: Corn; Water deficiency; Irrigation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abal, G.; Angelo, D. M.; Cataldo, J.; Gutiérrez, A. 2010. Mapa solar del Uruguay: versión 1.0 (en línea). Montevideo, Facultad de Ingeniería. 57 p. Consultado 1 mar. 2018. Disponible en <https://www.fing.edu.uy/if/solar/memoria-mapa-solar-v1.pdf>
2. Allen, R. G.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, H. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma, FAO. 300 p. (Irrigations and Drainage no. 56).
3. Alsina, S. 2015. Determinación del rendimiento potencial de maíz (*Zea mays*) en la localidad de Villa Mercedes (San Luis). Tesis Ing. Agr. San Luis, Argentina. Universidad de Nacional de San Luis. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. 46 p.
4. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echevarría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento del Uruguay: clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t. 1, 96 p.
5. Andrade, F.; Gardiol, J. 1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. INTA. Balcarce. Boletín técnico no. 132. 23 p.
6. _____.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui, M. E. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. La Borrosa, Dekalb, INTA/ UNMP. FCA. 292 p.
7. _____. 1998. Posibilidades de expansión de la producción agrícola. *Interciencia*. 23 (4): 218-226.
8. _____.; Sadras, V. O. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, Editorial Médica Panamericana. pp. 173- 206.
9. Arana, S. 2012. El agua como factor de producción en sistemas agrícolas. Una oportunidad estratégica hacia el desarrollo sostenible del sector. *In*: Congreso de Ingenieros Agrónomos (10°), Encuentro Regional de Ingeniería Agronómica (3°, 2012, Montevideo, Uruguay). Desafiando el presente, creando el futuro. Montevideo, MGAP. pp. 1- 38.

10. Arbeletche, P.; Ernst, O.; Hoffman, E. 2010. La agricultura en Uruguay y su evolución. *In*: García Préchac, F.; Ernst, O.; Arbeletche, P.; Pérez Bidegain, M.; Pristch, C.; Ferenczi, A.; Rivas, M. eds. Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Montevideo, Tradinco. pp. 13-27
11. Azcón-Bieto, J.; Talón, M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. 2ª. ed. Madrid, ES, McGraw-Hill Interamericana. 631 p.
12. Baccino, G. 2001. Riego por gravedad en el cultivo de maíz. (en línea). Revista Plan Agropecuario no. 99: s.p. Consultado 7 mar. 2018. Disponible en http://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R99/R99_47.htm
13. Baethgen, W. E.; Terra, R. 2010. El riego en un clima cambiante. *In*: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay.) Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 7-18.
14. Borrás, L.; Slafer, G.; Otegui, M. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Fields Crop Research*. 86: 132-146
15. Cakir, R. 2004. Effect of wáter stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*. 86 (1): 1-16.
16. Callero, W. H. 2014. Maíz, efecto de las deficiencias hídras sobre el rendimiento. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 51 p.
17. Campillo, C.; Foster, R.; Prieto, M. 2012. Solar radiation effect on crop production. (en línea). *In*: Babatunde, E. B. ed. Solar radiation. s.l., InTech. pp. 167-194. Consultado 22 jul. 2018. Disponible en <https://www.intechopen.com/books/solar-radiation/solar-radiation-effect-on-crop-production>
18. Cárcova, J.; Abeledo, L.; López, M. 2010a. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. *In*: Pascale, A. ed. Producción de granos: bases funcionales para su manejo.

Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 75- 95.

19. _____.; Borrás, L.; Otegui, M. 2010b. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y calidad en maíz. In: Pascale, A. ed. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 135- 157.
20. Carter, G.; Petrella, P. 2013. Estudio de distintas poblaciones y dosis de nitrógeno en maíz bajo riego. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 56 p.
21. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R.; Bidegain, M. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. 34 p. (Serie Técnica no. 193).
22. Ceriani, M.; Inella, J. A. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 66 p.
23. _____.; Andrade, F.; Otegui, M.; Madonni, G.; Vega, C.; Valentinuz, O. 2017. Ecofisiología del cultivo de maíz. In: Eyhérbide, G. H. ed. Bases para el manejo del cultivo de maíz. Buenos Aires, Argentina, INTA Pergamino. pp. 25-56.
24. Colazo, J.; Rivarola, R. 2015. Producción de maíz en la Provincia de San Luis. In: Garay, J.; Colazo, J. eds. El cultivo de maíz en San Luis. San Luis, Argentina, INTA. pp. 1- 7 (Información técnica no.188).
25. Corsi, W. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. CIAAB. Miscelánea no. 40. 28 p.
26. Della Maggiora, A. I.; Gardiol, J. M.; Irigoyen, A. I. 2000. Requerimientos hídricos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, INTA. Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 155-171.

27. Domingo, R. 2016. El riego deficitario como estrategia de sostenibilidad de la agricultura mediterránea. (en línea). Cartagena, Universidad Politécnica de Cartagena. 41 p. Consultado 5 feb. 2018. Disponible en <http://www.um.es/documents/3456781/3691285/R.Domingo+JAS+Murcia+2016.pdf/baeb8f34-d277-4a98-aa9a-d1d748286541>
28. Doorenbos, J. Pruitt, W. O. 1977. Crop Water Requirements. Rome, FAO. 144 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper no. 24).
29. Ernst, O.; Mazzili, S.; Siri-Prieto, G. 2009. Manejo de la reserva de agua en el suelo para situaciones de estrés hídrico. In: Simposio Nacional de Agricultura (1º., 2009, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. pp. 1-17.
30. Espósito, G.; Balboa, G.; Cerliani, C.; Balboa, R.; Castillo, C. 2012. Rendimiento potencial con uso eficiente de agua e insumos (Córdoba- Argentina). (en línea). In: Reunión Internacional de Riego (3ª., 2012, Manfredi). Rendimiento potencial de maíz en Río Cuarto. s.n.t. s.p. Consultado 30 mar. 2016. Disponible en http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmplibro_3_reunin_internacional_de_riego_2012.
31. _____.; _____.; _____.; _____.; _____. 2015. Rendimiento potencial de maíz. In: Garay, J.; Cruz, J. eds. El cultivo de maíz en San Luis. San Luis, Argentina, INTA pp. 32-52 (Información técnica no. 188).
32. Fassio, A.; Carriquiry, A. I.; Tojo, C.; Romero, R. 1998. Maíz: aspectos sobre fenología. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 1-59 (Serie Técnica no.101).
33. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1978. Effective rainfall. Rome, Italy. s.p.
34. Ferres, E.; Soriano. M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany. 58 (2): 147-159.
35. García, C. 2010. Estrategias para la incorporación del riego en sistemas de producción extensivos. In: Seminario Internacional de Riego en

Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 135- 140.

36. García Petillo, M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 23-31.
37. _____.; Puppo, L.; Hayashi, R.; Morales, P.; Bentancor, L. 2013. Curso de riego y drenaje. Montevideo, Facultad de Agronomía. 266 p.
38. García Préchac, F.; Durán, A.; Califra, A.; Hill, M. s.f. Propiedades hídricas de los suelos. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
39. García y Santos, F.; Lemos, S. 2017. Riego deficitario en maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 71 p.
40. Giménez, L.; Bocking, B., García Petillo, M.; García, C.; Sawchik, J. 2010. Prologo; marco de referencia del seminario. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 3-4.
41. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 15(2): 100-108.
42. _____. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay?. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 33-41.
43. _____. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Uruguay)*. 18 (1): 53-64.
44. _____. 2017. Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*. 21 (2): 77-90.

45. Girona, J.; Bonastre, N.; Marsal, J. 2014. Estrategias de gestión del riego eficiente y sostenible: riego deficitario controlado una oportunidad inteligente en el uso de recursos naturales. *In*: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (3º., 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 78 - 94.
46. Hsiao, T. 2012. Maíz. *In*: Pasquale, S.; Hsiao, T.; Fereres, E.; Raes, D. eds. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Roma, Italia. pp.119-130 (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 66).
47. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2016. Evaluación de cultivares 2016. (en línea). Montevideo. 47 p. Consultado 8 feb. 2018. Disponible en http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CV/Ano2016/PubMaizGranoySilo2016.pdf
48. _____. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agro-clima y Sistemas de Información, UY). 2017. Banco de datos agroclimático. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 8 feb. 2018. Disponible en <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
49. Jiménez de Aréchaga, P. 2007. El riego es necesario a pesar de las abundantes lluvias. (en línea). Uruguay Ciencia. nov.:9 -12. Consultado 16 ago. 2018. Disponible en <http://www.uruguay-ciencia.com/imagenes/sumario3/articulos/riego.pdf>
50. Martínez, D. 2015. Ecofisiología del cultivo de maíz. *In*: Garay, J.; Cruz, J. eds. El cultivo de maíz en San Luis. San Luis, Argentina, INTA. pp. 7- 31 (Información técnica no. 188)
51. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Encuesta agrícola “invierno 2017”. (en línea). Montevideo. 28 p. Consultado 17 oct. 2017. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas-y-documentos/produccion-vegetal/agricultura-de-secano/encuesta-agr%C3%ADcola-invierno-2017>

52. Medrano, H.; Bota, J.; Flexas, J.; Ribas-Carbó, M.; Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. (en línea). Alicante, España, Universidad de Alicante. 43 p. Consultado 1 feb. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17604304>
53. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay: segunda aproximación. Montevideo, MGAP. 12 p.
54. Otegui, M. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivo para grano conducido en secano. Informaciones Agronómicas. no. 44: 16-20.
55. Otero, A. 2014. Construyendo los componentes de un sistema productivo con la inclusión del riego. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (3º., 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 43- 52.
56. Rameau, M.; Rosa, A. L. 2013. Efectos de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de sorgo granífero. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 59 p.
57. Ritchie, S. W.; Hanway, J. 1982. How a corn planta develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Special Report no. 48. 24 p.
58. Rivetti, A. 2006. Efecto del riego complementario sobre el rendimiento en grano de maíz y sus componentes. (en línea). Buenos Aires, Asociación Maíz y Sorgo Argentino (MAIZAR). s.p. Consultado 1 feb. 2018. Disponible en <http://www.maizar.org.ar/vertext.php?id=188>
59. Romero, R. 1996. Relaciones agua planta en el sistema suelo-planta-atmósfera. In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 115-124 (Serie Técnica no. 76).
60. Roselli, S.; Texeira, J. 1998. Efecto del manejo del agua de riego sobre las características productivas de maíz para grano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 93 p.
61. Sadras, V. O.; Ferreiro, M.; Gutheim, F.; Kantolic, A. G. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. In: Andrade,

F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Médica Panamericana. pp. 29-60.

62. Salvagioti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. Santa Fé, INTA. 2 p.
63. Salinas, I. A. 2010. Riego suplementario en cultivos extensivos, panorama de Argentina y experiencia en la región central del país. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 39-47.
64. Sawchik, J. 2009. Criterios de manejo para mejorar la eficiencia de uso del agua. Revista INIA. no. 17: 79-80.
65. _____. 2012. Necesidades de riego en cultivos y pasturas. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 56- 67.
66. Smith, M.; Pasquale, S. 2012. Respuesta del rendimiento al agua: función original de producción del agua de la FAO. In: Pasquale, S.; Hsiao, T.; Fereres, E.; Raes, D. eds. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Roma, Italia. pp. 6- 13 (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 66).
67. Totis de Zeljkovich, L. 2017. Requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz. (en línea). In: Eyherávide, G. ed. Bases para el manejo del cultivo de maíz. Pergamino, Argentina, INTA. pp. 7-25. Consultado 30 nov. 2017. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_bases_para_el_manejo_de_maiz_reglon_100-2_2.pdf
68. Villaú, J. M. s.f. Manejo del riego en el cultivo de maíz (en línea). s.n.t. s.p. Consultado 5 feb. 2018. Disponible en http://www.pioneer.com/CMRoot/International/Spain/images/Publications/manejo_del_riego_en_el_maiz.pdf

9. ANEXOS

Anexo No. 1. Escala fenológica del maíz de acuerdo a la fecha 9-11-2016

Estadios	Fecha	Duración
Emergencia	16-11	7
V2 (2 hojas)	22-11	13
V4 (4 hojas)	1-12	22
V6 (6 hojas)	10-12	31
V8 (8 hojas)	20-12	41
V10 (10 hojas)	27-12	48
V12 (12 hojas)	3-1	55
V14 (14 hojas)	8-1	60
V16 (16 hojas)	11-1	63
FM (Flor masculina)	14-1	66
R1 (Flor femenina)	16-1	68
R2 (ampolla)	28-1	80
R3 (lechoso)	5-2	88
R4 (pastoso)	11-2	94
R5 (línea de leche)	23-2	106
R6 (madurez fisiológica)	16-3	128

Fuente: INIA. GRAS (2017).