



TESINA DE GRADO

“Cálculo de los requerimientos hídricos del maíz y ajuste del Kc mediante el uso de lisímetros de drenaje en el Valle Inferior del río Negro”

JOAQUÍN JESÚS TORRETTA BASSI
INGENIERÍA AGRONÓMICA

Director: Lucio Reinoso.

Co-Director: Roberto Simón Martínez.

VIEDMA

ARGENTINA

2017

“Cálculo de los requerimientos hídricos del maíz y ajuste del Kc mediante el uso de lisímetros de drenaje en el Valle Inferior del río Negro”

Resumen: La utilización del riego constituye una práctica fundamental para la producción en el Valle Inferior del río Negro. En este tipo de producción suele suceder a menudo que los productores utilicen más agua de la necesaria, reponiendo la lámina de riego antes de que se haya consumido menos del 20% de agua disponible en el suelo, resultando así en pérdidas de este recurso por percolación.

El objetivo del trabajo fue hallar los requerimientos hídricos del cultivo de maíz en sus diferentes estadios y el cálculo de sus correspondientes coeficientes de cultivo, o Kc. Para ello se utilizó un lisímetro de drenaje que consiste en un recipiente en el cual se agrega agua en un volumen conocido medido a través de un caudalímetro, y se retira el excedente. La diferencia entre ambos constituye el volumen de agua evapotranspirado por el cultivo. Los ensayos se realizaron durante las campañas 2014/15 y 2015/16, con fechas de siembra de diciembre y noviembre respectivamente. La medición de los volúmenes de agua se realizó semanalmente y se volcaron los datos a una planilla de cálculo que permitió estimar los valores de Kc inicial, medio y final. Se determinó además el volumen de materia seca producida, el rendimiento y las eficiencias de uso de agua.

Los valores de ETc hallados fueron de 628 mm para la campaña 2014/15 y de 580 mm para la campaña 2015/16, los rendimientos obtenidos fueron de 13,5 y 13,8 tn.ha⁻¹ respectivamente. Las eficiencias en el uso del agua (EUA) que se calcularon fueron de 4 kg.mm⁻¹ para el primer año y de 3,91 kg.mm⁻¹ para el segundo. Los coeficientes de cultivo encontrados dieron como resultado valores de Kc inicial de 0,35 para la temporada 2014/15 y 0,2 para 2015/16, un Kc medio de 1,3 y 0,94, y un Kc final de 0,45 y 0,66 respectivamente.

Palabras clave: coeficiente de cultivo, evapotranspiración, ETc, eficiencia del uso del agua, EUA, riego.

“Calculation of the Hydric Requirements of Corn and Adjustment of the Kc by Using a Drainage Lysimeter in the Valle Inferior of the Negro river”.

Summary: The usage of the irrigation constitutes an essential practice for the production in the Valle Inferior of the Negro river. In this kind of production, it is likely to happen that the producers may make more use of the water than needed, replenishing the irrigation schemes before the 20% of the available water in the soil has been consumed, resulting in a loss of this resource by percolation. The aim of this project was to find the hydric requirements of the corn crop in its different conditions and the calculation of its appropriate crop coefficients, which are also known as Kc.

To achieve this goal, a drainage lysimeter was used, consisting of a container in which water is added in a certain volume, measured by a flowmeter. The excess is withdrawn and the divergence between both constitutes the water volume evaporated and transpired by the cultivation.

The tests were made during the 2014/15 and 2015/16 campaigns and seeded in December and November respectively. The water volumes measurement were carried out weekly and the values were uploaded to a spreadsheet which let us gauge the values of initial, middle and final Kc. It was also determined the volume of the produced dry material, the output and the efficiency of the water usage. The ETc values found were of 628mm in the campaign of 2014/15 and 580mm in the campaign 2015/16, and the output obtained was 13.5 and 13.8 tn.ha⁻¹ respectively. The efficiency of the water usage that was calculated consisting of 4 kg.mm⁻¹ in the first year and 3.91 kg.mm⁻¹ in the second year. The Kc that were found giving a result, an initial Kc of 0.35 in season 2014/15 and 0.2 in 2015/16, a middle Kc of 1.3 and 0.94, and a final Kc of 0.45 and 0.66 respectively.

Dedicatoria:

A mis padres, Rubén y Fernanda.

A mis hermanas, Florencia y Sofia.

A mis tíos, Maria del Carmen y Eduardo.

Agradecimientos:

Habiendo alcanzado el objetivo planteado hace ya 6 años, es momento de agradecer a todos los que de alguna u otra forma colaboraron con este logro.

A mis directores de tesina, Lucio Reinoso y Simón Martínez, por sus consejos, apoyo y experiencia que me nutrieron de sobremanera durante el desarrollo de todo el trabajo.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) por el financiamiento del trabajo y en especial, a los profesionales del área de Cereales y Riego, los cuales hicieron que todas las labores fueran realizadas con buen humor y un mate de por medio.

A la Universidad Nacional de Río Negro, que permitió el desarrollo de mis estudios en la ciudad en la cual vivo hace ya más de 22 años.

A mi familia que les debo todo:

A mis padres, que me formaron para llegar a ser lo que soy hoy en día, el más grande agradecimiento es hacia ellos, ya que con su sacrificio y ejemplo de lucha me inspiraron día a día.

A mis hermanas por el acompañamiento y apoyo diario.

A mi tía María del Carmen por su amor incondicional, consejo y confianza, y a su marido Eduardo por su ejemplo, el cual trato de seguir a diario.

Sin la participación de cada uno de los antes mencionados, este logro no podría haber sido alcanzado, es por ello que los agradecimientos son totales y eternos.

INDICE

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	1
Introducción.....	1
Hipótesis.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	4
Desarrollo y crecimiento del maíz.....	4
Fenología.....	4
Componentes del rendimiento.....	10
Necesidades hídricas del cultivo.....	11
ETo, ETc y Kc.....	11
Kc inicial, medio y final.....	13
Factores que afectan el Kc.....	16
Importancia del Kc.....	16
Lisímetros.....	17
Programación del riego, uso de sensores y eficiencia del uso del agua.....	18
Programación del riego.....	18
Sensores.....	20
Eficiencia de uso del agua (EUA).....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
Localización del sitio.....	23
Caracterización edafoclimática del valle inferior del Río Negro.....	24
Caracterización climática.....	24
Suelos y topografía.....	26
Diseño experimental.....	27
Cultivo de maíz.....	28
Lisímetros.....	28
Metodologías de medición.....	30
Medición del agua ingresada.....	30
Medición del agua percolada.....	31
Medición del caudal de los goteros.....	32
Medición de la ETc:.....	33
Medición de la ETo:.....	34
Obtención del Kc:.....	34
Programación del riego.....	35
Evaluaciones realizadas en el cultivo.....	37
Materia seca, EUA, peso de 1000, número de granos por m ² y rendimiento.....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
Temperaturas durante las campañas 2014/15 y 2015/16.....	40
Evolución de la humedad en el suelo.....	41

Fenología y tiempo térmico.....	42
Evolución de la dinámica del agua.....	45
Materia seca y EUA.....	47
Peso de 1000, número de granos por m ² y rendimiento.....	48
Evolución de ETo para las campañas 2014/15 y 2015/16.....	50
Evolución de la ETc del maíz para las campañas 2014/15 y 2015/16.....	52
Evolución del Kc del maíz para las campañas 2014/15 y 2015/16.....	55
Comparación Kc teórico vs Kc calculado.....	57
CONCLUSIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o), bajo condiciones estándar (ET _c) y bajo condiciones no estándar (ET _c aj) (Allen <i>et al.</i> , 2006).....	13
Figura 2. Secuencia general y la proporción de cada una de las etapas de crecimiento mencionadas, correspondiente a diferentes tipos de cultivos (FAO , 1997).....	15
Figura 3. Sensor ECH2O utilizado durante las campañas 2014/15 y 2015/16 para la medición del contenido volumétrico de humedad del suelo dentro del lisímetro.....	21
Figura 4. Vista aérea de la localización del ensayo.....	23
Figura 5. Déficit hídrico medio estimado para el valle inferior del río Negro según la ETP o ET _o (Blaney y Criddle, 1962) y lluvias (Reinoso, 2014).....	24
Figura 6. Temperaturas medias mensuales de la serie 1965-2008. EEA Valle Inferior (Reinoso, 2014).....	25
Figura 7. Sumas mensuales de horas de sol efectivas en tres ciudades Argentinas (FAO, 1969 citado por Reinoso, 2014).....	26
Figura 8. Esquema básico de un lisímetro de drenaje.....	29
Figura 9. Caudalímetro utilizado para la medición del volumen de agua aportado al lisímetro.....	31
Figura 10. Bomba sumergible utilizada para la extracción del agua depositada en el fondo del lisímetro.....	32
Figura 11. Medición del caudal de los goteros.....	33
Figura 12. Controlador Hunter X-Core utilizado para la programación del riego durante el ciclo del cultivo.....	36

Figura 13. Electroválvulas utilizadas durante el ciclo del cultivo.....	37
Figura 14. Evolución de la temperatura máxima, mínima y media durante la campaña 2014/15.....	40
Figura 15. Evolución de la temperatura máxima, mínima y media durante la campaña 2015/16.....	41
Figura 16. Evolución del contenido de humedad del suelo durante la campaña 2014/15.....	42
Figura 17. Dinámica del agua en maíz durante la campaña 2014/15.....	46
Figura 18. Dinámica del agua en maíz durante la campaña 2015/16.....	47
Figura 19. Evolución de la ETo para Viedma durante la campaña 2014/15.....	51
Figura 20. Evolución de la ETo para Viedma durante la campaña 2015/16.....	52
Figura 21. Evolución de la ETc de maíz para la campaña 2014/15.....	53
Figura 22. Evolución de la ETc de maíz para la campaña 2015/16.....	54
Figura 23. Evolución del Kc para maíz durante la campaña 2014/15.....	56
Figura 24. Evolución del Kc para maíz durante la campaña 2015/16.....	56
Figura 25. Kc medidos para el cultivo de maíz durante la campaña 2014/15 y 2015/16 y Kc bibliográfico.....	58
Figura 26. Relación entre la ETc medida en el lisímetro y la ETc calculada por medio de la formula FAO Penman-Monteith y Kc estandar para el cultivo de maíz durante la campaña 2014/15 y 2015/16.....	59
Figura 27. Comportamiento del coeficiente de cultivo (Kc) calculado en base a la ETc del lisímetro y la ETo por FAO Penman-Monteith con su ecuación de ajuste.....	60
Figura 28. Relación entre la ETc medida en el lisímetro y la ETc calculada por medio de la formula FAO Penman-Monteith y Kc ajustado en base a la ecuación de la figura 27 para el cultivo de maíz bajo riego por goteo durante la	

campaña 2014/15 y 2015/16.....61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estadíos vegetativos y reproductivos de una planta de maíz (Fassio et al., 1998).....	5
Tabla 2. Fenología del cultivo, fecha, días transcurridos desde la siembra y tiempo térmico para maíz durante la temporada 2014/15.....	43
Tabla 3. Fenología del cultivo, fecha, días transcurridos desde la siembra y tiempo térmico para maíz durante la temporada 2015/16.....	44
Tabla 4. Volumen de agua aportada, en forma de riego y precipitación, drenada y evapotranspiración del cultivo durante las campañas 2014/15 y 2015/16.....	45
Tabla 5. Valor de ETc, MS y EUA obtenidos por Otegui y Torretta para maíz..	48
Tabla 6. Peso de mil granos, número de granos por metro cuadrado y rendimiento obtenido para las campañas 2014/15 y 2015/16. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0,05$)	49
Tabla 7. Análisis estadístico Tuckey para NG m-2, P 1000 y rendimiento para las temporadas 2014/15 y 2015/16.....	49
Tabla 8. Eficiencia en el uso del agua para grano y eficiencia en el uso de agua para hoja y tallo, obtenido para las campañas 2014/15 y 2015/16.....	50
Tabla 9. Valor de Kc medido para las campañas 2014/15 y valor teórico para las etapas inicial, desarrollo, mediados de temporada y fin de temporada.....	57

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Introducción

El Valle Inferior del río Negro (VIRN) ocupa unas 80.000 ha sobre la margen sur del río del mismo nombre, en el sudeste de la provincia de Río Negro (Argentina) abarcando desde el paraje conocido como Primera Angostura hasta la desembocadura en el Océano Atlántico, con una longitud aproximada de 100 km.

El VIRN se encuentra próximo a los 40° 48´ de latitud sur y 63° 05´ de longitud oeste. En este lugar es donde se desarrolla una zona agrícola bajo riego, localizada en el proyecto IDEVI (Instituto de Desarrollo del Valle Inferior), que corresponde a un área hasta el momento de unas 22.000 ha sistematizadas para el riego superficial.

Las producciones de forraje y cereales son las más importantes y con una tendencias al crecimiento sostenido, vinculado con el crecimiento de la actividad ganadera. Dentro de los cereales el maíz y la avena son los cultivos con mayor superficie cultivada, con casi 1000 ha (Schindler, 2013).

Estos cultivos, especialmente el maíz, encuentran en esta zona condiciones agroclimáticas favorables para la producción bajo riego, pudiéndose obtener altos rendimientos productivos mediante el manejo adecuado de aspectos básicos del cultivo. Además se ha demostrado que la radiación incidente y la temperatura afectan el rendimiento de maíz alrededor de todo el mundo, hallándose evidencia de que altos rindes se relacionan con zonas de altas radiaciones y temperaturas medias bajas como las que se dan en el VIRN (Margiotta *et al.* 2004; Arriaga *et al.*, 1984).

El rendimiento del maíz tiene una relación directa con la disponibilidad de agua, siendo muy baja la incidencia de lluvias durante su período de desarrollo, quedando sujeto al suministro mediante el riego en el VIRN. Es importante que

el maíz disponga de agua a lo largo de todo el ciclo, pero el período más crítico dentro del cual un déficit afecta en forma muy marcada el rendimiento es alrededor de la floración (15 días antes a 20 días después), que de acuerdo con fecha de siembra y ciclo se encuentra frecuentemente en enero, justamente cuando hay una mayor demanda atmosférica (Reinoso, 2014).

El agua suministrada a la planta es una de las variables más importantes y más fácilmente manejable para la producción de un maíz rentable. Deficiencias en el agua suministrada significarán disminuciones en la turgencia celular y consecuentemente, pérdidas en el rendimiento (Ko y Piccininni, 2008).

Las características del riego gravitacional, como el utilizado en el VIRN, implican que en cada riego se aplique una lámina de agua suficiente como para llevar el suelo a capacidad de campo (CC), no obstante, luego de un determinado intervalo de tiempo, se realiza una nueva aplicación llevando nuevamente el suelo a CC sin un control preciso, por parte del productor, de la cantidad de agua aplicada. Bajo estas condiciones, estudios realizados por la entonces Agua y Energía Eléctrica de la Nación (1987), revelaron que los productores riegan antes que se haya consumido el 60% del agua disponible para las plantas, llegando los excedentes al sistema de drenaje disminuyendo la eficiencia del uso de agua (Reinoso, 2014).

Debido a esto se hace vital el conocimiento de la evapotranspiración a nivel local para así poder realizar un manejo eficiente del riego durante las distintas etapas del cultivo, esto se puede lograr a través de la utilización de los coeficientes de cultivo. Los que se utilizan en nuestra zona para maíz, con frecuencia se han obtenido de información extranjera (generalmente Allen *et al.*, 2006) obtenidos en condiciones distintas de ambiente y manejo a las presentes localmente. Una de las herramientas más importantes para la obtención de estos coeficientes de cultivo, son los lisímetros.

Hipótesis

El Kc del maíz, que puede obtenerse en la bibliografía, difiere del calculado para el Valle Inferior del río Negro

Objetivo general

Determinar el requerimiento hídrico del cultivo de maíz mediante medidas de balance hídrico y obtención del índice Kc para distintas etapas fenológicas en el Valle Inferior del río Negro.

Objetivos específicos

1. Conocer el volumen de agua consumido por el cultivo de maíz en distintas etapas fenológicas por medio de lisímetros de drenaje.
2. Calcular la evapotranspiración del cultivo (ETc) a lo largo de todo el ciclo.
3. Comparar la ETc con la evapotranspiración de referencia (ETo) (Penman FAO) y calcular el Kc en distintas etapas fenológicas del cultivo.
4. Determinar momentos de mayor demanda hídrica del cultivo.
5. Conocer los requerimientos del cultivo respecto a los consultados en bibliografía.

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Desarrollo y crecimiento del maíz

Fenología

El desarrollo del cultivo consiste en una sucesión obligatoria de etapas o fases dadas en un orden riguroso e irreversible, correspondiendo a la iniciación de órganos nuevos, es un fenómeno puramente cualitativo. Se llama ciclo de desarrollo al conjunto de fases que van desde la germinación de la semilla hasta la floración y formación del fruto. Este ciclo comprende dos etapas bien definidas: desarrollo vegetativo y desarrollo reproductivo (Fassio *et al.*, 1998).

La clasificación utilizada en este trabajo divide al desarrollo de la planta en vegetativo y reproductivo (Tabla 1). Las subdivisiones del estadio vegetativo (V) son designadas como V1, hasta V(n), siendo (n) la última hoja antes del panojamiento (VT) para el cultivar considerado (Fassio *et al.*, 1998). El número de hojas varía de acuerdo al cultivar y el efecto ambiental.

Tabla 1. Estadíos vegetativos y reproductivos de una planta de maíz (Fassio *et al.*, 1998).

Vegetativo	Reproductivo
VE emergencia	R1 barbas
V1 primera hoja	R2 ampolla
V2 segunda hoja	R3 lechoso
V3 tercera hoja	R4 pastoso
V(n) n hoja	R5 dentado
VT panojamiento	R6 madurez fisiológica

Etapa de germinación y emergencia

Se entiende por germinación a la serie de procesos que incluyen desde la imbibición o absorción de agua por parte de la semilla, hasta emergencia de la radícula; y por emergencia, a la etapa desde que emerge la radícula hasta la aparición del coleóptilo sobre el suelo (Fassio *et al.*, 1998).

Estadío V3

Aproximadamente a los ocho días la planta presenta dos hojas y a los 12 días tres hojas. En V3 el ápice del tallo (punto de crecimiento) aún se encuentra por debajo de la superficie del suelo.

En este momento se inician todas las hojas y espigas que la planta podría eventualmente producir. La ocurrencia de granizo, viento o heladas que puedan dañar las hojas expuestas en V3 tienen un efecto pequeño o nulo sobre el punto de crecimiento (subterráneo) o el rendimiento final de grano (Fassio *et al.* 1998).

Estadío V6

En el estado V6 (en promedio, 24 días posemergencia) el punto de crecimiento sobresale de la superficie del suelo y el tallo comienza un período de rápida elongación. En este momento las raíces adventicias son el principal sistema

funcional. En este estadio, son visibles algunos macollos. Los macollos se forman generalmente en nudos por debajo de la superficie del suelo, pero no muestran un crecimiento avanzado. El grado de desarrollo de macollos variará en función del cultivar elegido, la densidad de siembra, la fertilidad y las condiciones ambientales (Fassio *et al.*, 1998).

Estadio V9

El estadio V9 comienza en promedio a los 32 días posteriores a la emergencia. Durante dicho estadio, a partir de cada nudo aéreo se desarrolla una espiga potencial (con excepción de los seis a ocho nudos por debajo de la panoja). Al principio cada una de estas se desarrolla más rápidamente que la que se origina por encima de ella en el tallo. Sin embargo, el crecimiento de las espigas de la parte inferior del tallo se realiza gradualmente más despacio y sólo la primera o las dos primeras espigas superiores se desarrollarán en espigas productivas. Los cultivares que producen más de una espiga cosechable en el tallo principal se llaman prolíficos.

La panoja se desarrolla rápidamente y el tallo continúa una rápida elongación a través de la elongación de sus entrenudos. Cada entrenudo va a comenzar la elongación antes que el que se encuentra por encima de él en el tallo, en forma similar al desarrollo inicial de los primordios de espiga (Fassio *et al.*, 1998).

Estadio V10

Cerca de V10 (35 días en promedio, posemergencia) la planta comienza un rápido incremento en la acumulación de materia seca que continuará hasta la etapa reproductiva avanzada. Se requieren altas cantidades de nutrientes y agua del suelo para cumplir con la demanda (Fassio *et al.*, 1998).

Estadio V12

El estadio V12 ocurre en promedio a los 48 días posemergencia. Aunque las espigas potenciales se forman justo antes de la formación de la panoja (V5), el número de hileras en cada espiga y el tamaño de la espiga se establecen en

V12. No obstante, la determinación del número de óvulos (granos potenciales) no se completará hasta una semana antes de la emergencia de barbas o cerca de V17.

Deficiencias de agua o de nutrientes en esta etapa pueden reducir seriamente el número potencial de granos y el tamaño de la espiga cosechada. El potencial para estos dos componentes del rendimiento está también relacionado con la duración del período para su determinación, principalmente la duración desde el estadio V10 hasta el V17. Los cultivares de maduración temprana (ciclo corto) generalmente progresarán a través de estos estadios en un tiempo más corto y tendrán espigas de menor tamaño que los de maduración más tardía. (Fassio *et al.*, 1998).

Estadio V15

La planta de maíz presenta en promedio, 14 hojas, 56 días después de la emergencia y 15 hojas a los dos meses de la misma y está a 12 días de la etapa R1. Este estadio es el comienzo del período más importante en términos de determinación del rendimiento de grano. El crecimiento de las espigas superiores supera al de las inferiores y un nuevo estadio vegetativo ocurre cada uno a dos días. Empiezan a crecer las barbas de las espigas superiores (Fassio *et al.*, 1998).

Estadíos reproductivos y desarrollo del grano

Los seis estadíos reproductivos que se describen a continuación se refieren principalmente al desarrollo del grano y sus partes. La descripción de R2, R3 y R4, si bien, generalmente se aplica a todos los granos de la espiga, se basa en los que se posicionan en el medio de la misma. La descripción de los granos en R5 o R6 corresponde a todos los granos de la espiga (Fassio *et al.*, 1998).

Estadío R1 - Emergencia de barbas

La etapa R1 comienza cuando algunas barbas son visibles fuera de las vainas (chala), aproximadamente 66 días después de la emergencia. La polinización ocurre cuando los granos de polen se depositan sobre las barbas.

Un grano de polen capturado requiere 24 horas para crecer dentro de la barba hasta el óvulo donde ocurre la fertilización y el óvulo es fecundado. Generalmente se necesitan entre dos y tres días para que todas las barbas de una espiga queden expuestas y sean polinizadas. Las barbas van a crecer 2,5-3,8 cm por día y continuarán elongándose hasta ser fertilizadas (Fassio *et al.*, 1998).

Estadío R2 - Ampolla

Aunque el embrión todavía se está desarrollando lentamente durante esta etapa, la radícula, el coleóptile y la primera hoja embrionaria ya se han formado. La mazorca está casi por alcanzar, o ya alcanzó, su tamaño completo. Las barbas, habiendo completado su función de floración, se oscurecen y comienzan a secarse. (Fassio *et al.*, 1998). Los granos presentan cerca de 85% de humedad, porcentaje que irá descendiendo gradualmente hasta la cosecha (Fassio *et al.*, 1998).

Estadío R3 - Lechoso (18-22 días después de emergencia de barbas)

En R3 el grano es externamente de un color amarillo y el fluido interno es blanco lechoso debido a la acumulación de almidón. El embrión en esta etapa crece rápidamente (Fassio *et al.*, 1998).

Los granos presentan una rápida acumulación de materia seca y contienen aproximadamente 80% de humedad. En R3 las divisiones celulares del endosperma están esencialmente terminadas, por lo que el crecimiento es debido principalmente a la expansión celular y la acumulación de almidón en las células. El rendimiento final depende del número de granos que se desarrolle y del tamaño final o peso de los granos. Aunque no tan severo como en R1, deficiencias en R3 pueden tener un efecto profundo en el rendimiento reduciendo ambos componentes de rendimiento. A medida que el grano madura, la reducción de rendimiento potencial debido a la ocurrencia de algún estrés es menor (Fassio *et al.*, 1998).

Estadio R4 - Pastoso (24-28 días después de emergencia de barbas)

La continua acumulación de almidón en el endosperma provoca que el fluido interno adquiera una consistencia pastosa. Normalmente en esta etapa ya se han formado cuatro hojas embrionarias y el embrión ha crecido considerablemente en tamaño con respecto a la etapa R3 (Fassio *et al.*, 1998).

Estadio R5 - Dentado (35-40 días después de emergencia de barbas)

Los granos se secan comenzando por la parte superior donde aparece una capa dura de almidón de color blanco. Condiciones adversas en esta etapa reducirán el rendimiento a través de una disminución del peso de los granos y no del número de granos (Fassio *et al.*, 1998).

Estadio R6 - Madurez fisiológica (55-65 días después de emergencia de barbas)

El estadio R6 se define cuando todos los granos en la espiga han alcanzado su máximo peso seco o máxima acumulación de materia seca y se forma una zona de absición marrón o negra en la zona de inserción del grano a la mazorca (punto negro o capa negra). Esta absición es un buen indicador de la máxima acumulación de materia seca (madurez fisiológica) y señala el final de crecimiento del grano. El promedio de humedad de grano en R6 (formación del punto negro) es 30-35% y aún no está pronto para un almacenamiento seguro,

para lo cual se requiere 13-15% de humedad (Fassio *et al.*, 1998).

Componentes del rendimiento

El rendimiento del cultivo de maíz puede ser descompuesto en dos elementos principales: el número de granos por m^2 ($NG.m^{-2}$), y el peso unitario de grano (PUG). La componente de rendimiento $NG.m^{-2}$ sintetiza los mecanismos relacionados con la definición del número de órganos reproductores que se realiza en etapas sucesivas: número de plantas, número de espigas por planta y número de granos por espiga. Este último se descompone en número de hileras por espiga y número de granos por hilera (Maturano 2002).

El $NG.m^2$ queda determinado en el estado límite de aborto de granos, es decir aproximadamente, 15 a 20 días después de la floración. La componente PUG resulta de la competencia entre el número de granos y la oferta de fotoasimilados (Maturano 2002). Se ha demostrado que el $NG.m^{-2}$ es el principal componente del rendimiento en grano del cultivo de maíz en diferentes ambientes (Maturano 2002).

El período crítico para la definición del número de granos comprende desde 1 a 2 semanas, antes de floración femenina hasta 3 semanas posteriores (Maturano 2002). La translocación de fotoasimilados a la espiga durante este período, está altamente relacionado con la definición del $NG.m^{-2}$. Una deficiencia de nitrógeno afecta esta translocación, ya que disminuye los valores de índice de área foliar (IAF), la duración del área foliar y, en consecuencia, la intercepción de la radiación y la eficiencia en el uso de la misma (Maturano, 2002).

Necesidades hídricas del cultivo

ETo, ETc y Kc

Para determinar la necesidad hídrica de un cultivo y su evapotranspiración potencial (ETc) con el fin de programar el riego, se necesita conocer la evapotranspiración de referencia (ETo) y el coeficiente correspondiente de ese cultivo para esa etapa fenológica (Kc ini, med o fin) (Allen *et al.*, 2006).

$$ETc = ETo * Kc.$$

Dónde:

ETc.: evaporación de cultivo, mm.día⁻¹.

ETo: evaporación potencial, mm.día⁻¹.

Kc: coeficiente cultivo.

ETo es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera, se denomina así a la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia que ocurre sin restricciones de agua.

Se utiliza para calcular la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del suelo y del tipo y estado de desarrollo del cultivo, por tanto los únicos factores que afectan la ETo son los parámetros climáticos, siendo por lo tanto un parámetro climático que se puede medir a partir de datos meteorológicos (Allen *et al.*, 2006).

ETc se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ETc requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se

presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo. En la Figura 1 se encuentran esquematizados estos conceptos (Allen *et al.*, 2006).

Para Otegui (1992), los valores de E_{Tc} obtenidos en ensayos en maíz para la localidad de Balcarce, rondan los 280 mm, experimentándose los mayores consumos en fechas próximas a R1 (emergencia de barbas).

El coeficiente del cultivo (K_c) expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente K_c a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo, la cual generalmente suele presentar 3 etapas conocidas como K_c inicial, K_c medio y K_c final (Allen *et al.*, 2006).

Distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c (Allen *et al.*, 2006).

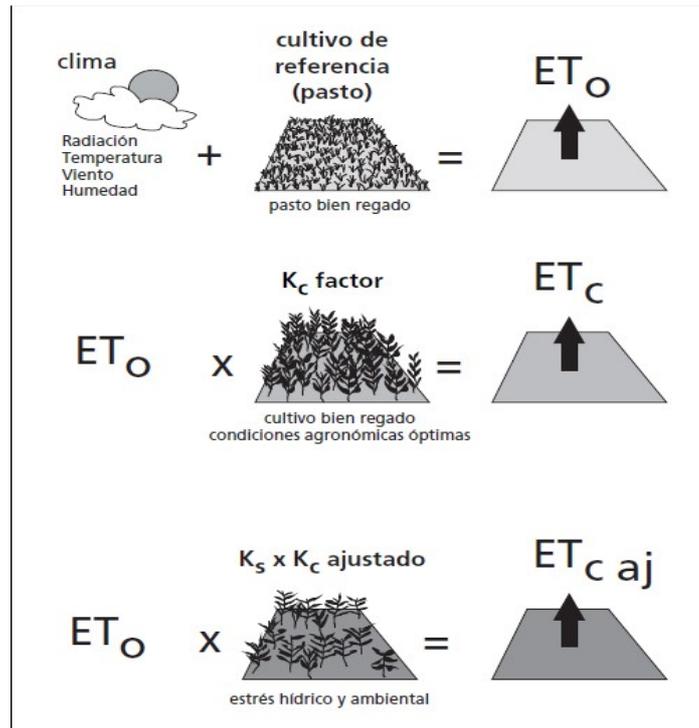


Figura 1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$) (Allen *et al.*, 2006).

Kc inicial, medio y final

A medida que el cultivo se desarrolla, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo del periodo de crecimiento del mismo (Figura 2). Este periodo de crecimiento puede ser dividido en tres etapas (Maldonado, 2012).

1° Etapa inicial

Durante el periodo inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el periodo inicial ($K_{c\ ini}$) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca. El tiempo que tardara el suelo en secarse dependerá del intervalo de tiempo entre eventos que humedezcan al suelo, del poder evaporante de la atmosfera (ET_0) y de la magnitud del evento de

humedecimiento (Maldonado, 2012).

2° Etapa de mediados de temporada

La etapa de mediados de temporada comprende el periodo de tiempo entre la cobertura completa del suelo hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ETo de referencia.

Durante la etapa de mediados de temporada, el coeficiente Kc alcanza su valor máximo. El valor de Kc en esta etapa (Kc med) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales (Maldonado, 2012).

3° Etapa de finales de temporada

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el periodo entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de Kc y ETc finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas.

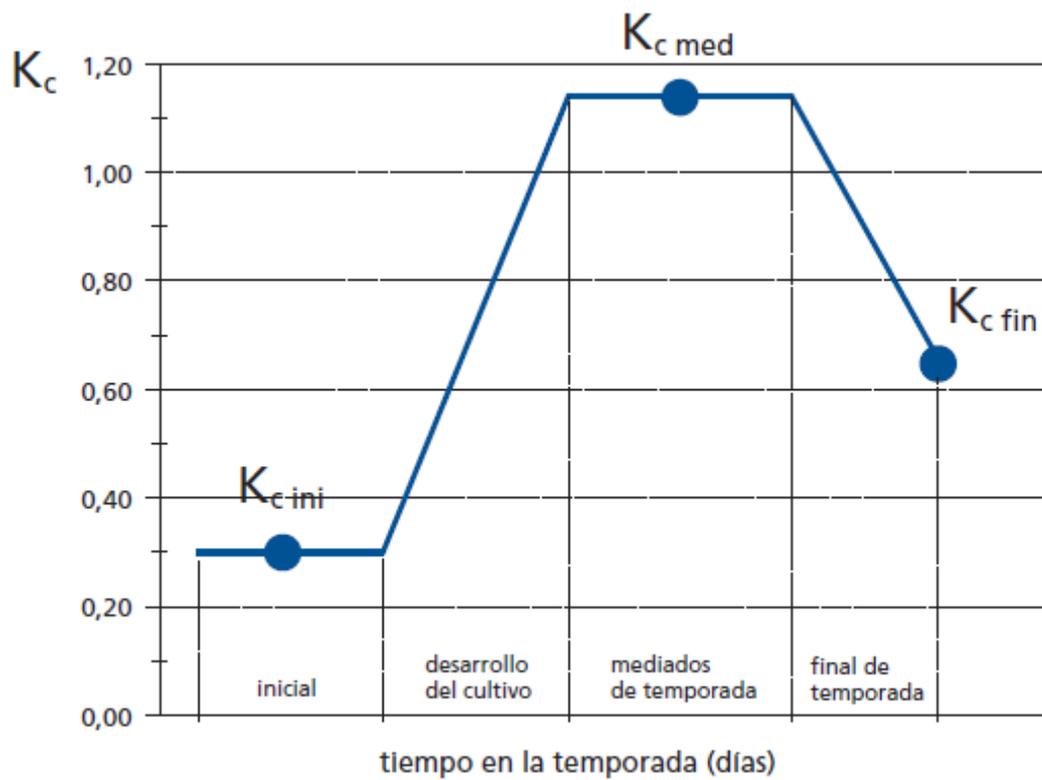


Figura 2. Secuencia general y la proporción de cada una de las etapas de crecimiento mencionadas, correspondiente a diferentes tipos de cultivos (Maldonado, 2012).

Para el cultivo de maíz, con ciclos cercanos a los 150 días, Allen *et al.* 2006, delimitan los estadios en:

Inicial: 25 días.

Desarrollo del cultivo: 40 días.

Mediados de temporada: 45 días.

Final de temporada: 30 días.

Factores que afectan el Kc

Según Maldonado (2002) los factores que afectan los valores de Kc son:

- Sistema de conducción.
- Tipo de manejo.
- Lugar.
- Características del cultivo.
- Fechas de siembra.
- Ritmo de crecimiento.
- Desarrollo del cultivo.
- Duración del periodo vegetativo.
- Condiciones de nutrición.
- Frecuencia de la lluvia o riego, especialmente en la primera etapa de crecimiento.

Importancia del Kc

El Kc permite estimar la evapotranspiración de un cultivo a partir de la ETo, un dato que se puede obtener de una estación meteorológica, en base a ello, se puede programar el riego.

El Kc es afectado por una multiplicidad de factores y son obtenidos de forma experimental, variando según la especie, la fecha de siembra, el manejo, etapa fenológica, etc. por eso es importante el cálculo de este coeficiente localmente.

Los coeficientes que se utilizan actualmente en IDEVI para el cálculo de la ETC del maíz son extraídos de información extranjera. Estos ensayos son realizados en otras condiciones climáticas, con otros manejos, etc. que no coinciden con la situación local. Es esencial obtener datos generados en nuestra zona, que permitan estimar con certeza la evapotranspiración del cultivo. De ese modo se podrá ajustar el riego y mejorar la eficiencia en el uso de este recurso.

Un manejo correcto del riego permite apuntar a rendimientos altos, con estabilidad entre años, y a una calidad óptima del producto cosechado, haciendo posible un uso racional del agua y de la energía, minimizando el desperdicio de ambos recursos y la contaminación del medio ambiente. Asimismo este dato es fundamental para un correcto diseño de los sistemas de riego con los consiguientes beneficios que esto acarrea.

Lisímetros

Los lisímetros son dispositivos destinados a medir el agua perdida del suelo ya sea, en forma de drenaje, evaporación o transpiración. Consta de un receptáculo en el cuál crecen las plantas que serán objeto de estudio.

Los lisímetros además pueden aprovecharse para determinar el contenido de sales solubles y nutrientes que el suelo pierde por lixiviación analizando el agua percolada (Maldonado, 2012, pp. 3).

A continuación se enumeran los objetivos de los lisímetros (Maldonado, 2012):

1. Obtener medidas directas de evaporación y transpiración, permitiendo estudiar los factores que afectan dichos procesos.
2. Proporcionar una medida absoluta y exacta del flujo evaporativo, como una primera etapa en la interpretación de fenómenos físicos encerrados en la atmósfera adyacente.
3. Servir como un factor de comparación para la evaluación indirecta de

métodos de medida o predicción de la evapotranspiración.

4. Servir como un factor de comparación en la evaluación de instrumentos diseñados para medir precipitaciones en la forma de lluvia o rocío.
5. Medir exactamente las pérdidas de evaporación de agua desde un suelo desnudo como consecuencia del ascenso capilar.
6. Estudiar la lixiviación de los diferentes nutrientes del suelo.
7. Determinar la cantidad de agua que escurre a través del suelo por drenaje.
8. Como medio para determinar las cantidades de agua, fertilizantes y nutrientes que es necesario agregar al suelo.

Los lisímetros también permiten la medición de la evapotranspiración del cultivo (ETc) y el cálculo del Kc de distintos cultivos.

Programación del riego, uso de sensores y eficiencia del uso del agua

Programación del riego

Tanto en zonas áridas como húmedas, con ocurrencia de sequías estacionales que producen reducciones y variabilidad en los rendimientos entre años, es fundamental realizar una correcta programación del riego. Una correcta programación del riego tendrá como objetivo ahorrar agua y prevenir excesos de agua en el perfil del suelo que puedan conducir a la contaminación de aguas subterráneas (Maturano 2002).

En la utilización de la técnica de riego, uno de los interrogantes más importantes es el referido al momento y a la cantidad de agua a aplicar en cada riego con el objetivo de lograr el máximo rendimiento económico y con la mayor eficiencia en el uso del agua. Para una correcta programación del riego es necesario conocer la respuesta del cultivo al momento, frecuencia y láminas de

riego en interacción con el ambiente estudiado (Maturano *et al.*, 1997).

Uno de los criterios más utilizados ha sido el nivel de consumo del agua útil a partir del cual se repone el agua en el perfil de suelo hasta valores cercanos a la capacidad de campo (Phene *et al.*, 1990). Distintos métodos han utilizado niveles de consumo del agua útil del 50 al 65% como criterio de riego (Maturano, 2002).

Para la conducción del riego existen métodos que se basan en mediciones directas en suelo (potencial agua en el suelo, método resistenciométrico y atenuación de neutrones, entre otros), y en planta (diferencia entre temperatura foliar y temperatura del aire ($T_c - T_a$), potencial agua en planta, entre otros); y otros que se basan en estimaciones indirectas -modelos para cálculo de la ET_c y modelos de crecimiento de cultivos, entre otros (Maturano, 2002).

Caldwell *et al.* (1994) concluyen que el rendimiento de maíz no es afectado cuando el promedio del déficit hídrico en el suelo es menor del 20%. La frecuencia de riego cada 7 días, y con una disminución del agua útil de 50.8 mm, mostró el menor drenaje debajo de la zona radicular y una mayor eficiencia en el uso del agua de riego que frecuencias de 1, 3 y 5 días. Finalmente el drenaje por debajo de la zona radicular puede ser minimizado y la eficiencia de uso del agua de riego puede ser maximizada manteniendo el nivel de agua del suelo en un contenido menor que la capacidad de campo (Maturano, 2002).

En los últimos años, ha habido un interés creciente en el estudio de la programación del riego con el objetivo de conservar el agua y prevenir las pérdidas por percolación profunda, que pueden conducir a la contaminación del agua subterránea. Esto es especialmente cierto en regiones húmedas donde el riego es suplementario y el perfil del suelo se recarga completamente al comienzo de la estación de crecimiento del cultivo de maíz. Uno de los estados fenológicos del maíz en el que puede ser reducida la aplicación de agua es en pre-antesis (Maturano, 2002).

Sensores

Las sondas de humedad de Decagon Devices ® se emplean en todo el mundo para medir y controlar el comportamiento del agua en el suelo.

Las sondas de humedad del suelo ECH2O son sondas capacitivas (FDR) que miden la permisividad dieléctrica del suelo para calcular el contenido volumétrico de agua (VWC) a diferentes profundidades y en forma continua.

La reflectometría del dominio de la frecuencia (FDR por sus siglas en inglés) es un método para la medición del contenido de agua del suelo. En esta técnica la humedad del suelo depende más de las constantes dieléctricas del suelo (capacitancia eléctrica) que de su conductividad (el inverso de la resistividad) y es, teóricamente, menos vulnerable a la salinidad del mismo (Choi *et al.*, 2015).

El principio de funcionamiento de una sonda de capacitancia FDR depende del hecho que la constante dieléctrica entre el agua y el aire difieren en un factor de 80. Por tanto, la presencia de agua en el suelo entre las placas de la sonda produce un cambio altamente significativo en su capacitancia (Fernández *et al.*, 2016).

Las sondas (Figura 3) permiten mediante gráficas de contenido de humedad en el suelo, tomar decisiones de relación agua-aire, frecuencia y tiempo de riego, de esta manera se puede controlar el contenido de agua del suelo, evitando que este valor caiga por debajo de límites que produzcan estrés en el cultivo mermando su rendimiento.



Figura 3. Sensor ECH2O utilizado durante las campañas 2014/15 y 2015/16 para la medición del contenido volumétrico de humedad del suelo dentro del lisímetro.

Eficiencia de uso del agua (EUA)

La eficiencia de uso del agua (EUA), se define por la relación entre el volumen de agua transpirado por un cultivo y los gramos de materia seca producidos. Las especies más eficientes en el uso de agua producen más materia seca por mm de agua transpirado. Es de destacar que los cultivos difieren en su capacidad para extraer agua, de acuerdo a su metabolismo, la arquitectura de sus hojas, y el momento del ciclo de crecimiento considerado (Medrano *et al.*, 2007).

Así, diversos autores (Hanks, 1983; Sinclair *et al.*, 1984), destacan la constancia respecto a este valor, esto quiere decir, que el valor de materia seca aérea producida por el cultivo es directamente proporcional al volumen de agua evapotranspirada.

De este modo, se podría considerar a la producción de materia seca de una planta o un cultivo en función de la eficiencia para convertir agua transpirada en biomasa (por Otegui 1992) según el siguiente modelo:

$$B = \text{EUA} \times \text{ETc}$$

Dónde:

B= Biomasa aérea producida (g.m^{-2})

EUA= Eficiencia de uso del agua ($\text{g.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$).

ETc= Evapotranspiración (mm).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del sitio

La zona donde se realizaron los ensayos fue en el noreste de la Patagonia, ubicado dentro del VIRN. Los mismos se desarrollaron durante los ciclos agrícola 2014/15 y 2015/16 en la Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior del Río Negro (EEAVI) convenio provincia de Río Negro – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

La EEAVI está ubicada en las siguientes coordenadas geográficas: latitud: 40° 48' S; longitud: 63° 05' O; y altitud: 4 m sobre el nivel del mar (Figura 4).

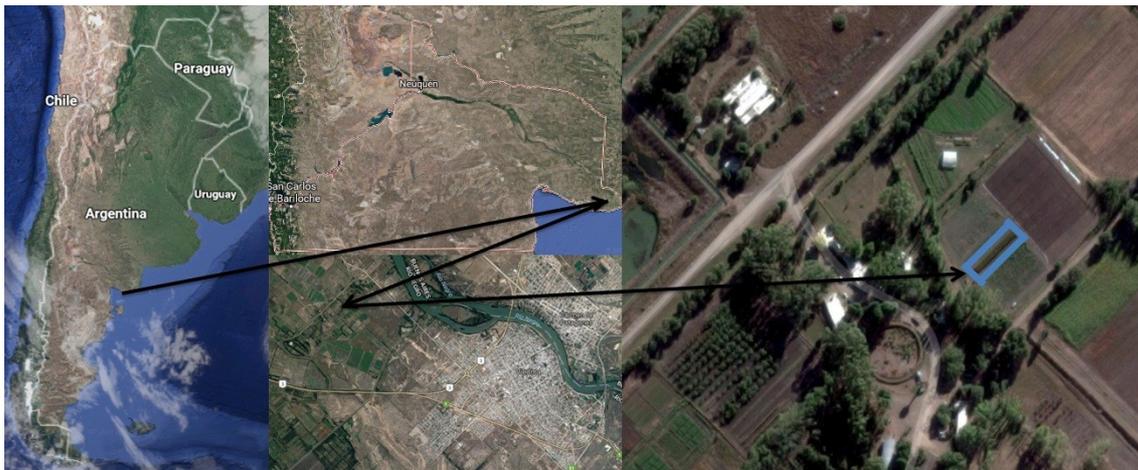


Figura 4. Vista aérea de la localización del ensayo.

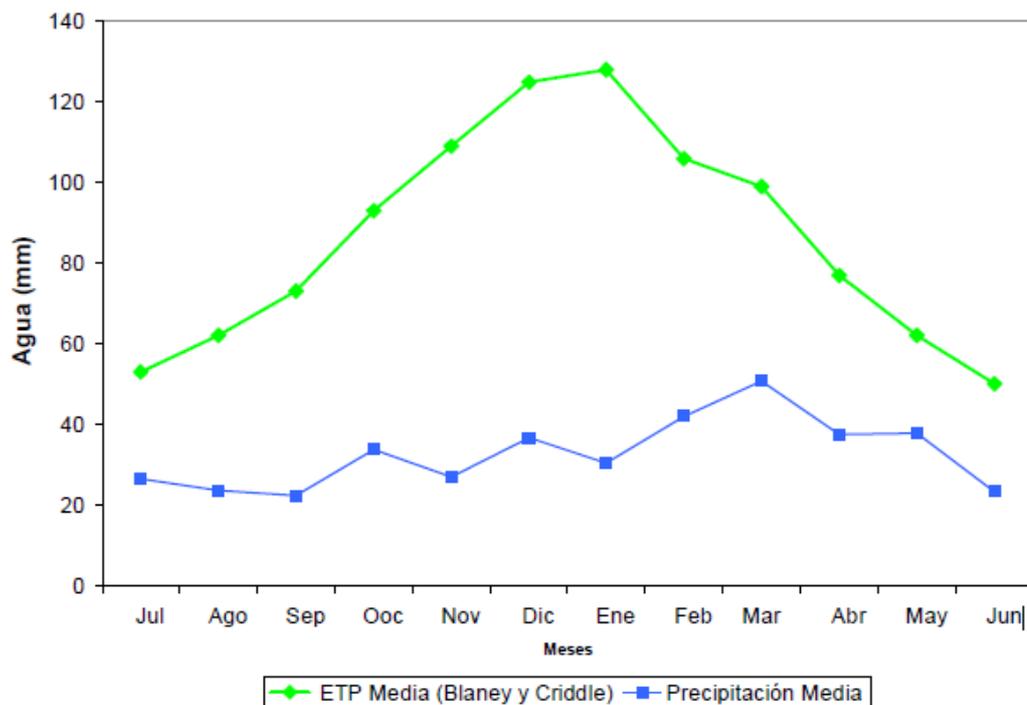
Caracterización edafoclimática del valle inferior del río Negro.

Caracterización climática

La zona de IDEVI se caracteriza como árida o semiárida, según los registros de la EEAVI, en una serie de 44 años, el valle presenta una precipitación media anual de 408 mm.

Estacionalmente, el régimen de precipitaciones se concentra en la época primavera-estival, contribuyendo con el 65% del total anual. De todos modos su distribución no es homogénea ya que los meses de diciembre y enero se caracterizan por su escasez de precipitaciones (no superando los 65 mm) (Reinoso, 2014).

La evapotranspiración (ETo) anual ronda los 1030 mm anuales, dando por tanto un déficit hídrico o necesidad de riego de unos 650 mm (Figura 5) (Reinoso 2014).



Figur

a 5. Déficit hídrico medio estimado para el valle inferior del río Negro según la ETP o ETo (Blaney y Criddle, 1962) y lluvias (Reinoso, 2014).

Los registros de la estación agrometeorológica de la EAAVI muestran para IDEVI que la temperatura media anual es de 14,1 °C, la temperatura máxima media anual es de 20,9 °C, registrándose en los meses de enero, febrero y diciembre las temperaturas medias máximas más elevadas. La temperatura mínima media anual es de 7,9 °C, ubicándose en los meses de junio, julio y agosto los valores menores del año (Figura 6).

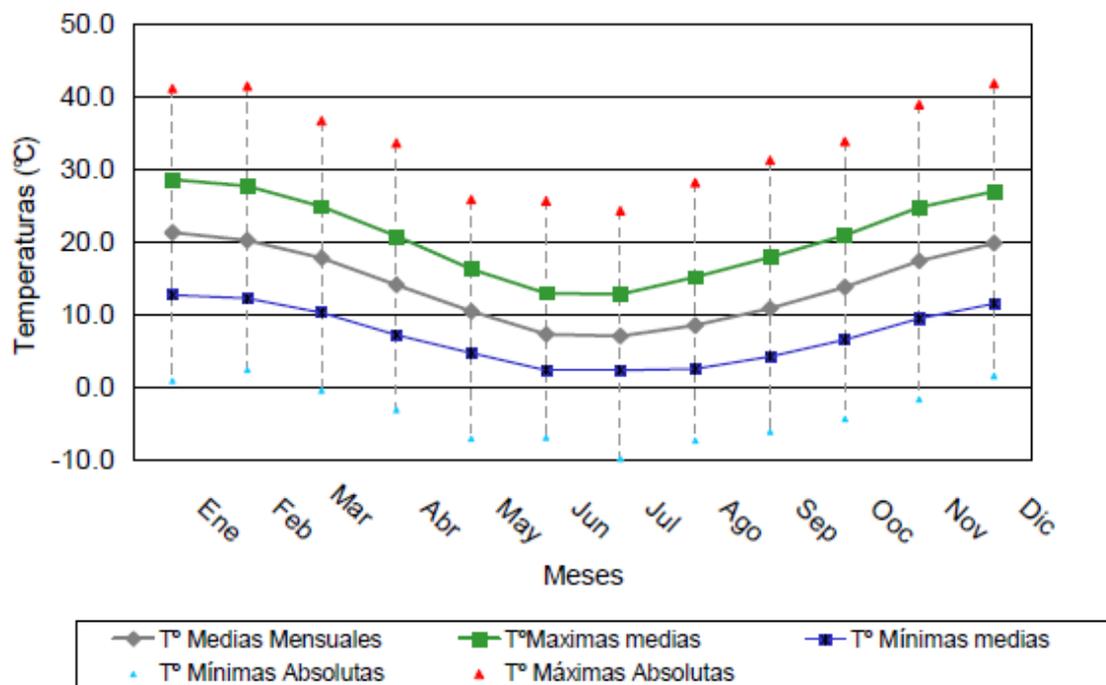


Figura 6. Temperaturas medias mensuales de la serie 1965-2008. EEA Valle Inferior (Reinoso, 2014).

El promedio de días libres de heladas meteorológicas es de 199 días, con fecha media de primera helada correspondiente al 1° de mayo, y la fecha media de la última al 13 de octubre.

En cuanto a la radiación solar, se puede observar que los valores medidos en Viedma, comparados con otras grandes zonas productoras como Pergamino y Balcarce, presenta niveles aceptables incluso por encima de los valores hallados en las localidades antes mencionadas (Figura 7).

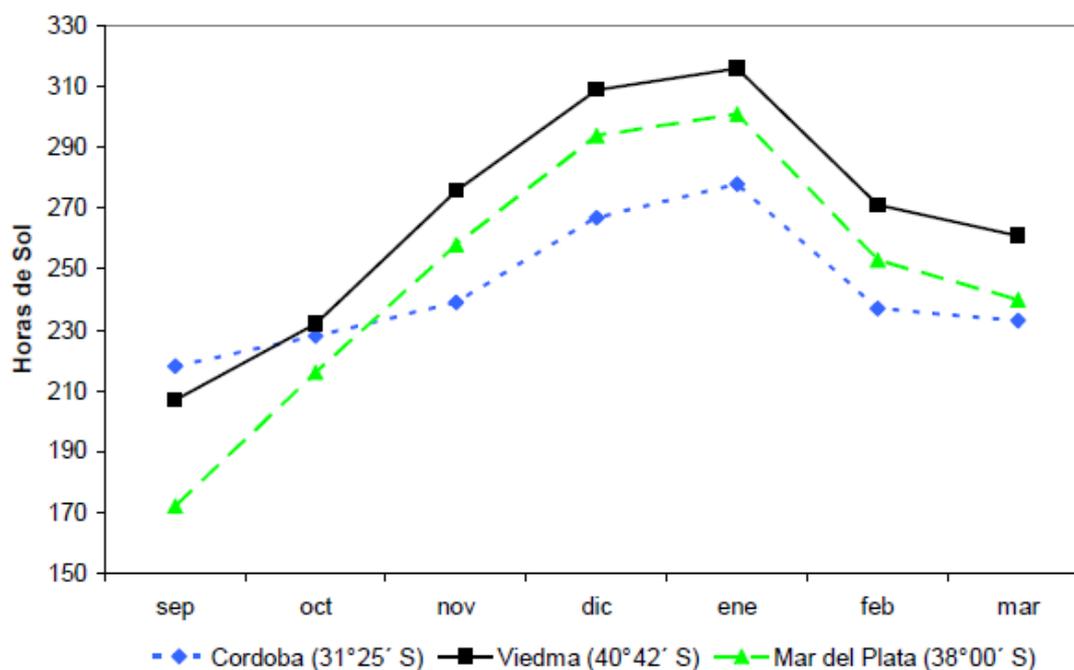


Figura 7. Sumas mensuales de horas de sol efectivas en tres ciudades Argentinas (FAO, 1969 citado por Reinoso, 2014).

Por su cercanía al mar y latitud, el régimen térmico es moderado. Los veranos, aunque de relativamente corta duración, presentan temperaturas acordes para un adecuado crecimiento, extendiéndose moderadamente más allá del otoño, lo que permite al cultivo contar con más días de fotosíntesis. La combinación de estos factores permite que el maíz, en el valle inferior del río Negro, pueda expresar sus rendimientos potenciales (Reinoso, 2014).

Suelos y topografía

La zona bajo riego del VIRN (Arg.), se encuentra desarrollada sobre sedimentos aluvionales depositados por procesos fluviales recientes, con presencia de estratificaciones cuyo origen se debe a dos reiteradas introgresiones marinas donde, en general, dominan suelos de textura media a fina. El relieve es plano a muy suavemente ondulado con formación de cordones que superan en algunos casos los dos metros de altura (Reinoso, 2014).

Las pendientes generales tanto en sentido longitudinal como transversal al río son prácticamente nulas. Su elevación media sobre el nivel del mar oscila alrededor de los 4 m. Las cotas más altas del terreno, entre 5 y 6 m, corresponden a lomadas que en forma de cordones se distribuyen por toda la superficie del valle, pero con prevalencia en el sector norte.

Diseño experimental

El estudio se llevó a cabo en un lote de la Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior (EEAVI), ubicado en 40° 79' S, 63° 06' O donde se instaló un lisímetro de drenaje en una parcela de 30m x 3,5 m constituyendo una superficie de 105 m². El cultivo de maíz se implantó ambos años en un marco de 0,16 x 0,70 m, representando una densidad de 85.000 pl/ha, acorde a lo recomendado para esta zona (Reinoso, 2014).

El experimento se condujo durante las campañas 2014/15 y 2015/16. Las fechas de siembra fueron el 19/12 y 19/11 para los ciclos 2014/15 y 2015/16 respectivamente. Se respetó la ubicación del ensayo en la parcela.

En cada línea (5) se ubicaron cintas con goteros autocompensados instalados cada 0,2 m que suministraron un caudal de 2 l.h⁻¹. La frecuencia, duración y por consiguiente, el volumen de la lámina de riego fueron regulados por un programador de riego y una electroválvula.

En ambas campañas se aplicó N en superficie en forma de urea (46 – 0 – 0) constituyendo un total de 300 kg del nutriente, divididos en 2 aplicaciones iguales entre V4 y V6.

Se midió el volumen de agua aportada al lisímetro y percolada por debajo de este dos veces por semana. Dichos datos fueron volcados a una planilla de cálculo semanalmente.

Cultivo de maíz

Se utilizó el híbrido Sursem 466 RR, la cama de siembra se preparó mediante una pasada de rastra y una de cincel a una profundidad de 0,25 m, posteriormente se elaboraron los surcos, espaciados a 0,7 m. Las fechas de siembra fueron diferentes para los distintos años, debido principalmente a inclemencias climáticas (incesantes lluvias) que imposibilitaban la instalación del lisímetro durante la campaña 2014/15.

En ambos casos, la siembra se realizó de forma manual colocando 2 semillas por golpe, y raleando hasta obtener una densidad de 85.000 pl/ha.

En posemergencia, estado V4, se aplicó *glifosato* con una concentración de 62% i.a. a razón de 4 l.ha⁻¹ de producto comercial. En ambas campañas el cultivo antecesor fue maíz y se mantuvo libre de plagas y enfermedades durante todo el desarrollo.

Lisímetros

El lisímetro artesanal que se utilizó es un recipiente de plástico de 1m³, el cual fue enterrado en el terreno sobre la línea central del cultivo. Contó desde la siembra hasta la cosecha con el aporte de agua de 4 goteros que brindaban un caudal de 2 l.h⁻¹ cada uno.

El recipiente plástico presenta en su base una concavidad la cual permitió la acumulación del agua que no fue aprovechada por el cultivo.

La construcción del lisímetro contó con una serie de capas, separadas entre sí, en su base una capa de piedras canto rodado, a continuación se le colocó una membrana geotextil y por encima el suelo desplazado para instalarlo. Los lisímetros de drenaje, como el utilizado en este trabajo, permiten obtener datos confiables de ETc si el cultivo no es sometido a estrés y las alteraciones del suelo no afectan significativamente el crecimiento de las plantas (Requena

2012).

En una de sus esquinas presenta un tubo de acceso con un sistema colector de PVC que permite el acceso al agua percolada.

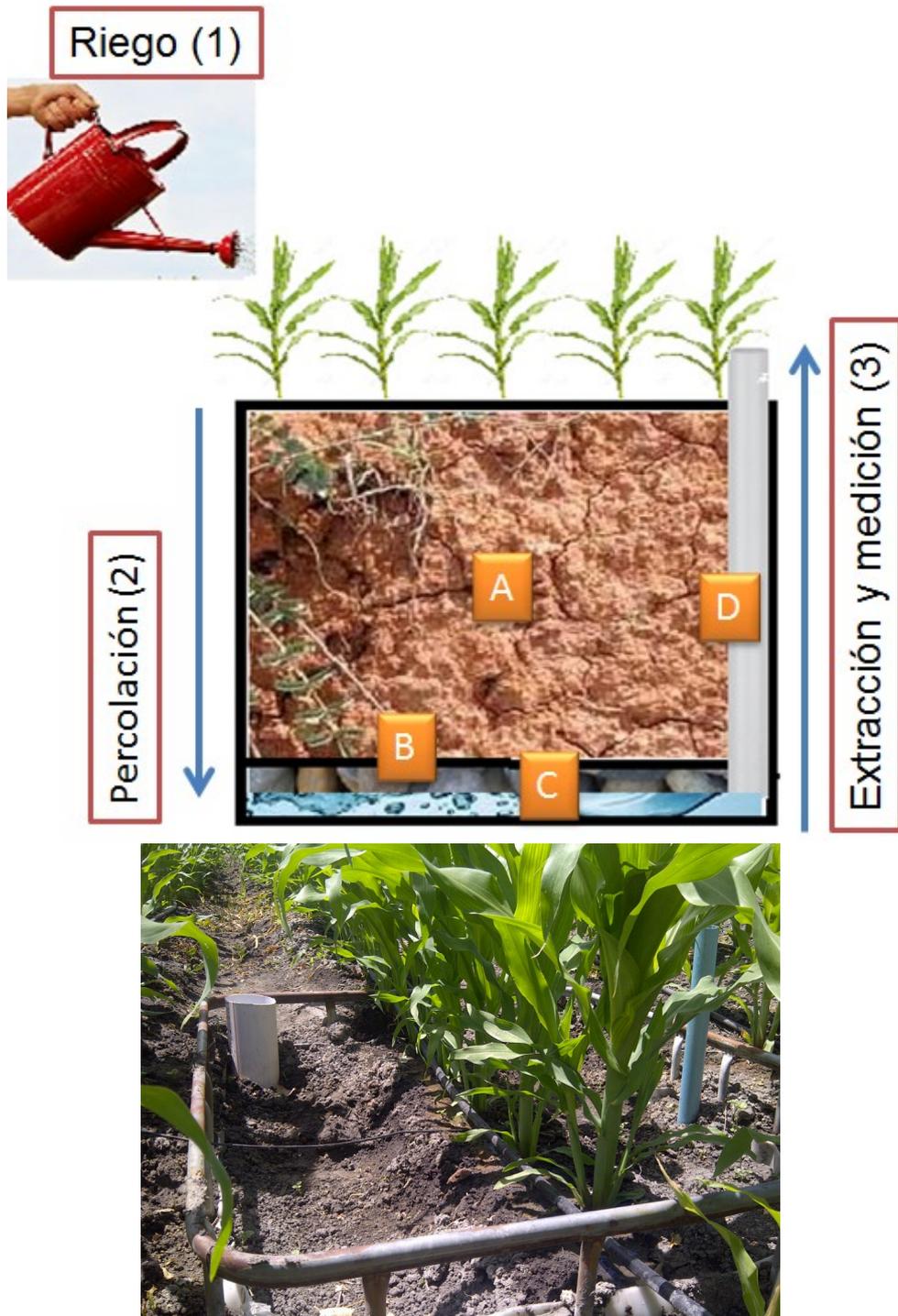


Figura 8. Esquema básico de un lisímetro de drenaje y su fotografía en el campo.

A: Suelo extraído para la deposición del recipiente plástico.

B: Membrana geotextil.

C: Canto rodado.

D: Tubo de PVC que permitió la extracción del agua percolada.

Metodologías de medición

Medición del agua ingresada

Se midió el volumen de agua que pasa por la línea que riega el lisímetro con un caudalímetro (Figura 9) y se contó la cantidad de goteros presentes en toda la cinta. Una vez que se verificó que el caudal entregado por los goteros sea homogéneo, se asumió que sólo los goteros dentro del lisímetro aportaban agua a este. Entonces se dividió el volumen de agua que pasaba por la cinta por el número de goteros presentes y a ese valor se lo multiplicó por el número de goteros que aportaban agua dentro del lisímetro.

También se consideró el aporte de las precipitaciones mediante la instalación de un pluviómetro en la parcela. El valor medido de precipitación se sumó con el medido por riego dando así el total de agua aportada al lisímetro.



Figura 9. Caudalímetro utilizado para la medición del volumen de agua aportado al lisímetro.

Medición del agua percolada

El agua percolada se extrajo del fondo del lisímetro mediante una bomba eléctrica a 12 volts sumergible (Figura 10). La misma estaba conectada en su salida a un caudalímetro que midió los volúmenes de agua que por ella circulaban.



Figura 10. Bomba sumergible utilizada para la extracción del agua depositada en el fondo del lisímetro.

Medición del caudal de los goteros

El caudal arrojado por los goteros fue medido periódicamente para controlar que el volumen sea el indicado en la teoría (Figura 11).

La metodología utilizada fue la de seleccionar 3 goteros, uno al principio de la cinta, otro al medio y otro al final. Durante 1 minuto se recogió el volumen de agua aportado y luego, mediante la siguiente fórmula, se calculó el caudal aportado por hora:

$$Q/h = V_m \times 60$$

Dónde:

Q/h = Caudal por hora.

V_m = Volumen medido.

Por medio de esta sencilla metodología se corroboró que el volumen de agua aportado por los goteros coincidía con el valor teórico de 2 l.h^{-1} .

La medición se realizó en 5 oportunidades a lo largo del ciclo del cultivo.



Figura 11. Medición del caudal de los goteros.

Medición de la ETC:

Para la obtención de valor de evapotranspiración del cultivo (ETc) se utilizaron los valores de agua aportada, por riego y precipitación, y los valores de agua percolada. La fórmula que se aplicó fue la siguiente

$$ETc = R + PP - D \pm HS$$

Dónde:

ETc = Evapotranspiración del maíz

R = Riego aplicado

PP= Precipitación caída en el lisímetro

D = Drenaje

HS = Variación de la humedad del suelo.

Medición de la ETo:

Los datos necesarios para la obtención de la ETo fueron brindados por la estación meteorológica de la EEAVI ubicada a 500 metros del ensayo. Los valores se obtienen según la ecuación de FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y permite calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) diaria (mm día⁻¹) y horaria (mm hora⁻¹). Los datos fueron integrados en lapsos de tiempo coincidentes con los lapsos utilizados para la medición de la ETc para su posterior comparación.

Obtención del Kc:

El coeficiente de cultivo, o Kc, se obtuvo a partir de la fórmula:

$$Kc = ETc / ETo$$

Dónde:

ETc.: evaporación de cultivo, mm/día.

ETo: evaporación potencial, mm/día.

Kc: coeficiente cultivo.

Con los valores de ETc y ETo se aplicó la fórmula antes mencionada y se obtuvo el Kc para las diferentes etapas fenológicas del cultivo, las cuales posteriormente fueron graficadas.

Se dividió el ciclo agronómico del cultivo de maíz en tres etapas:(1) establecimiento (2) crecimiento vegetativo (3) mediado del ciclo y fin de ciclo (Reinoso 2014).

Programación del riego

Para la programación del riego se implementó el uso de un controlador Hunter XCore (Figura 12) el cual ofrece un funcionamiento sencillo y permite adaptar el riego en base a las condiciones ambientales imperantes, a la estación del año en la que se encuentre o incluso ante la probabilidad de una posible tormenta. Con un control fácil de configurar para hasta ocho estaciones, incluyendo tres programas y cuatro tiempos de arranque en cada uno, resulta ser una solución efectiva para la programación del riego. También se utilizó una electroválvula (Figura 13), la cual recibía comando del controlador.

En cada línea se ubicaron cintas con goteros autorregulables instalados cada 0,2 m que suministraron un caudal de 2 l/h. La frecuencia, duración y por

consiguiente, el volumen de la lámina de riego fueron regulados por el programador de riego y la electroválvula.

El equipo de riego se dejó funcionando durante 24 horas a partir de su instalación para lograr que el suelo llegue al punto de saturación. En los ensayos, en ambas campañas, el riego se programó como un riego diario a las 9 am. Durante el primer año el riego fue de 1 hora por día, esta duración produjo muchos excedentes de agua que se reflejaron en los volúmenes extraídos como agua percolada. Durante el segundo año la duración fue ajustada a 45 minutos por día a lo largo de todo el ciclo del cultivo. Esta duración se sustentó en los datos aportados por los sensores ECH2O de Decagon Devices ® para evitar grandes pérdidas de agua por percolación, pero sin dejar que el contenido en el suelo descienda por debajo del 20% de agua útil.

Los datos otorgados por los sensores fueron de gran utilidad ya que es imprescindible que el suelo se encuentre siempre entre capacidad de campo (CC) y el punto en que se halla consumido un 20% del agua útil para que los datos obtenidos sean confiables. Esto se debe a que es menester que la planta no atraviese periodos de estrés. Estas sondas instaladas permitieron además comparar los datos con los obtenidos por gravimetría.

El volumen de agua aplicado se calculó mediante la instalación de caudalímetros en la entrada de la cinta de goteo central la cual abastecía al lisímetro.



Figura 12. Controlador Hunter X-Core utilizado para la programación del riego durante el ciclo del cultivo



Figura 13. Electroválvulas utilizadas durante el ciclo del cultivo.

Evaluaciones realizadas en el cultivo

Las distintas fases y etapas del ciclo de desarrollo se determinaron siguiendo la escala de Ritchie y Hanway (1982). Para la fijación de las distintas fases del ciclo se consideró que el cultivo estaba en un estadio cuando el 50 % de las plantas alcanzaban esa fase.

Algunos de los estadios fenológicos observados fueron VE, V6, V7, R1 y R6.

Las fechas en que se fijaron las distintas fases se han referido con el número de días transcurridos desde la siembra y con el TT (tiempo térmico) acumulado, en base a un cero de vegetación de 8°C (Jones y Kiniry, 1986). Se utiliza una temperatura base de crecimiento de 8° C debido a que el material vegetal es originario de regiones templadas.

El uso del término tiempo térmico es una referencia correcta del estado de la materia en función de la temperatura (Ritchie y NeSmith, 1991). El cálculo de TT se ha efectuado con la siguiente expresión:

$$TT = \sum_n (T_{med} - T_b)$$

Donde:

TT: expresado en ° C;

Tmed: temperatura media del aire expresada en °C.

Tb: temperatura base de desarrollo, expresada en °C.

n: Número de días considerados en el sumatorio.

El estudio de las etapas fenológicas en la estimación del Kc es de vital importancia ya que permite ubicar las necesidades hídricas en base al estado de desarrollo en el cuál se encuentra el cultivo.

Materia seca, EUA, peso de 1000, número de granos por m² y rendimiento.

El análisis de materia seca se realizó a la cosecha para la obtención de la eficiencia de uso de agua (EUA).

El tamaño de la muestra fue de 6 plantas, las cuales se ubicaban dentro del lisímetro las mismas fueron cortadas a ras del suelo de manera manual, se midió la altura individual de cada planta y la altura de la inserción de la espiga. Además la muestra se fraccionó en hojas, tallos, granos y marlos para su pesaje.

Posteriormente el material se colocó en una estufa a 65°C durante aproximadamente 20 días hasta alcanzar peso constante.

Se estableció el número de granos por m² a madurez fisiológica (NG.m⁻²) mediante el recuento de los mismos en las 6 plantas cosechadas en la parcela. El peso de mil (P1000) se obtuvo mediante el desgrane de la mazorca, recuento de los granos y pesaje. El rendimiento también se obtuvo con la cosecha de las espigas de estas 6 plantas a través del pesaje de todos los granos obtenidos.

A cada componente del rendimiento previamente mencionados se les realizó un análisis estadístico de Tuckey ($\alpha = 0,05$) para comparar las varianzas de las temporadas 2014/15 y 2015/16.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperaturas durante las campañas 2014/15 y 2015/16.

En las figuras 13 y 14 se presenta la evolución de las temperaturas máximas, mínimas y medias diarias registradas durante los ciclos del cultivo de maíz.

Considerando que la temperatura óptima por encima de la cual no se incrementa la velocidad de desarrollo está comprendida entre 30 y 34 °C (Gilmore y Rogers, 1958; Blacklow, 1972; Tollenaar et al., 1979), puede inferirse que la misma no fue una variable limitante para el desarrollo del cultivo.

Con respecto a las temperaturas mínimas, considerando que la temperatura base (cero de vegetación) para el crecimiento del cultivo es de 8 °C (Jones y Kiniry, 1986), se puede observar que sólo eventualmente durante las primeras etapas y hacia finales de ciclo la temperatura se halló temporalmente por debajo de este umbral, por lo que, al igual que con las temperaturas máximas, en ambos casos, se puede inferir que no fueron limitantes.

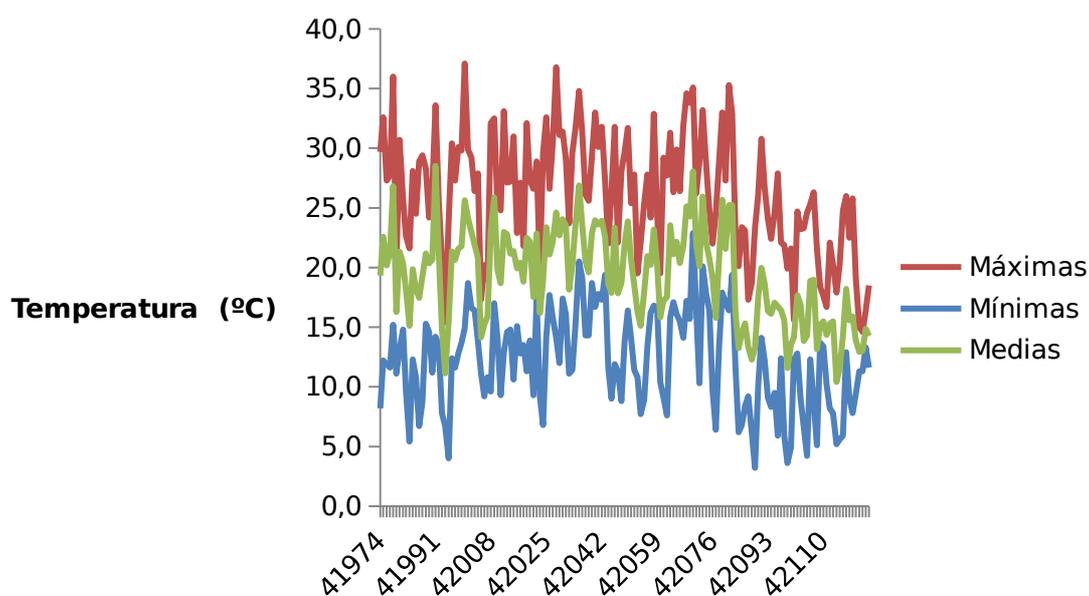


Figura 14. Evolución de la temperatura máxima, mínima y media durante la campaña 2014/15.

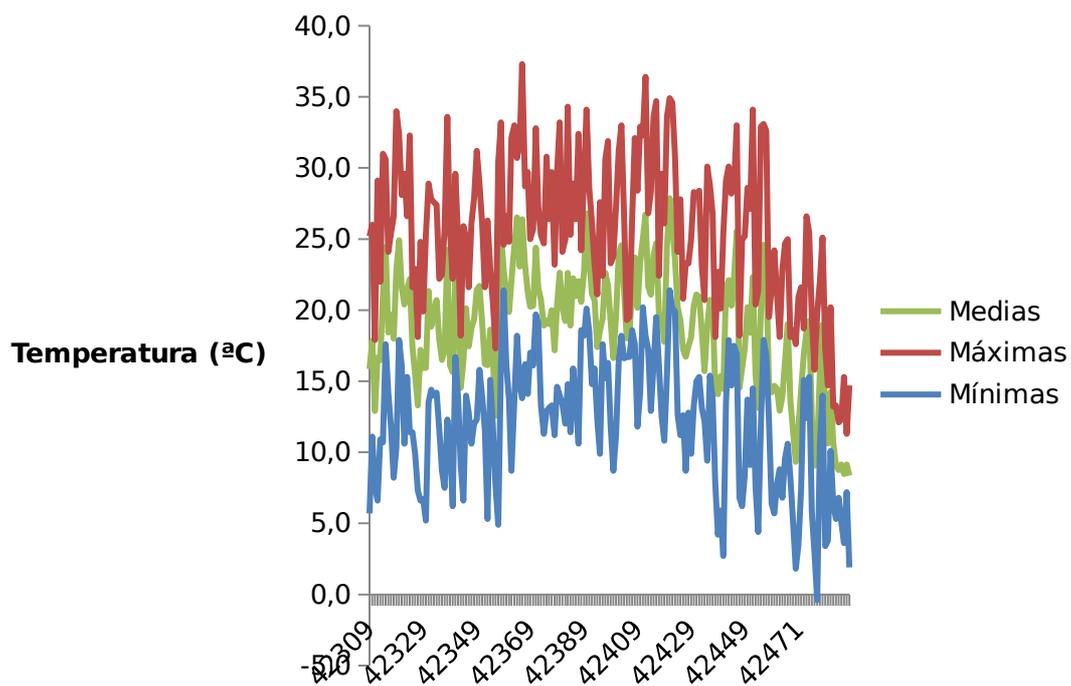


Figura 15. Evolución de la temperatura máxima, mínima y media durante la campaña 2015/16.

Evolución de la humedad en el suelo

En la Figura 16 está graficada la evolución de la humedad durante la campaña 2014/15.

Los datos fueron obtenidos a través de los sensores de capacitancia ECH2O de Decagon Devices ®.

En el gráfico los valores en el eje de las Y representan el porcentaje de humedad presente en el suelo y los valores en el eje de las abscisas el tiempo.

Cada pico alcanzado se relaciona con los riegos efectuados, es decir, después de cada riego, el porcentaje de humedad del suelo alcanzó un máximo cercano a la capacidad de campo (CC), a partir del cual comenzó a disminuir por la evapotranspiración hasta el riego efectuado al día siguiente.

En el gráfico se puede observar que en ningún momento la humedad descendió por debajo del 20% de agua consumida (PMP) por lo que se puede aseverar que la planta no atravesó ningún momento de estrés hídrico.

Esta condición se mantuvo desde la siembra hasta la cosecha, por lo que la variación de almacenaje es despreciable en el cálculo de evapotranspiración y la planta obtuvo los requerimientos hídricos necesarios para expresar su potencialidad.

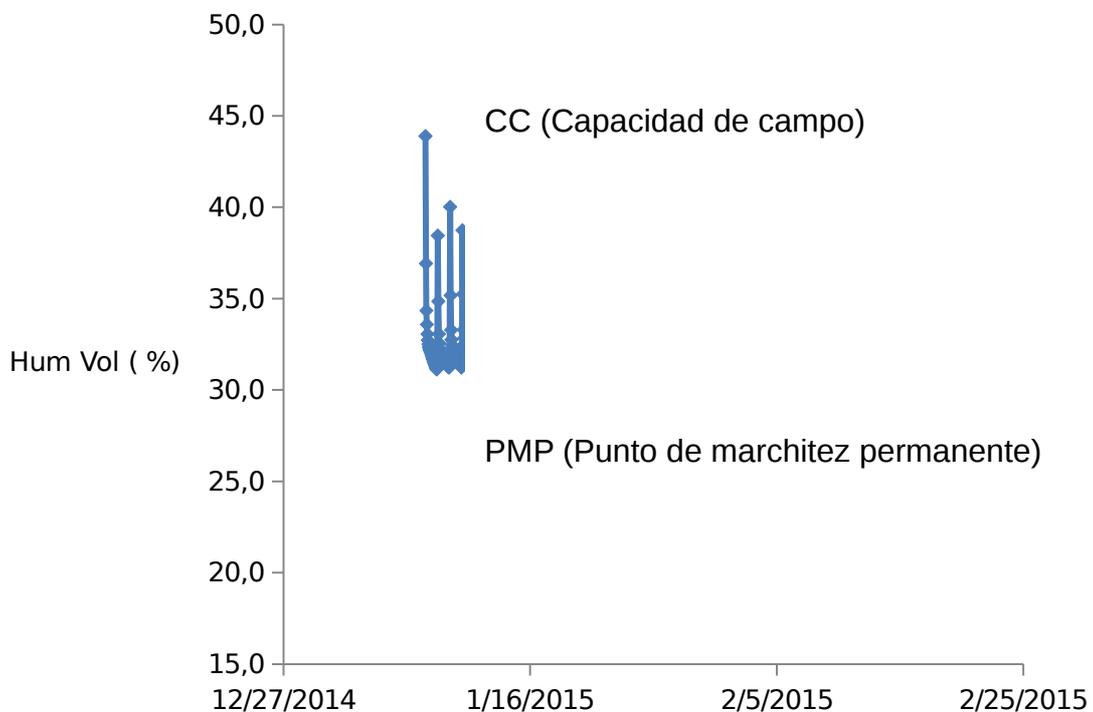


Figura 16. Evolución del contenido de humedad del suelo durante la campaña 2014/15.

Fenología y tiempo térmico.

En las tablas 2 y 3 se presentan los datos obtenidos sobre fenología del cultivo utilizando como temperatura base 8 °C.

Tabla 2. Fenología del cultivo, fecha, días transcurridos desde la siembra y tiempo térmico para maíz durante la temporada 2014/15.

Estado fenológico	Fecha	Días transcurridos (desde siembra)	Tiempo térmico (°C.día⁻¹)
Siembra	19/12/14		
VE	27/12/14	8	89
V6	23/01/15	35	429
V7	26/01/15	38	477
R1	20/02/15	63	800
R4	30/03/15	101	1253
R6	31/04/15	132	1471

Tabla 3. Fenología del cultivo, fecha, días transcurridos desde la siembra y tiempo térmico para maíz durante la temporada 2015/16.

Estado fenológico	Fecha	Días transcurridos (desde siembra)	Tiempo térmico (°C.día ⁻¹)
Siembra	19/11/15		
VE	27/11/15	9	92
V6	28/12/16	39	448
V7	02/01/16	44	517
R1	02/02/16	75	910
R4	11/03/16	113	1388
R6	20/04/16	151	1717

Como puede observarse, a pesar de haberse realizado las siembras en fechas distintas, los °C.día⁻¹ necesarios para alcanzar los primeros estadios del cultivo se mantuvieron casi constantes, no obstante, en estadios más avanzados (R1 en adelante), las sumas térmicas fueron mayores en la campaña 2015/16, presentando una diferencia considerable con la campaña 2014/15 debido, posiblemente, a una interrupción del ciclo por temperaturas bajas. Sin embargo, los valores de TT observados, coinciden con los documentados por autores como Maturano (2002).

Evolución de la dinámica del agua

En la Tabla 4 se muestran los valores de agua aplicada, en forma de riego y precipitación, y el agua drenada y extraída del lisímetro durante las campañas 2014/15 y 2015/16.

Durante el primer año los volúmenes de agua que se aportaron fueron superiores que los aportados durante el segundo año, como así también fueron superiores los volúmenes de drenaje.

Tabla 4. Volumen de agua aportada, en forma de riego y precipitación, drenada y evapotranspiración del cultivo durante las campañas 2014/15 y 2015/16.

	Riego (litros)	Pp (litros)	Drenaje (litros)	ETc (litros x 0,7m ²)	ETc (mm)
2014/1 5	991	175,5	726,8	440	628
2015/1 6	900	165,8	660,5	406	580

En las Figuras 16 y 17 se detalla la evolución de la dinámica del agua durante las campañas 2014/15 y 2015/16. Se puede observar una evolución lineal en los volúmenes de agua aportada, con pequeñas alteraciones explicadas por las precipitaciones.

A partir de la evolución del drenaje se puede inferir el consumo de agua de la planta. De esta manera, se observa una atenuación muy marcada de los volúmenes extraídos como agua percolada a partir de V7, lo que hace suponer que es a partir de este estadio donde la planta tuvo las mayores necesidades hídricas. Esta tendencia se mantuvo hasta R4, donde nuevamente el drenaje empezó a ser mayor y por tanto, las necesidades hídricas del cultivo se redujeron.

En el balance hídrico total se puede ver que los valores de ETc para ambos años rondaron los 400 litros, los cuales equivalen a alrededor de 570 mm, estos valores son mayores a los obtenidos por Otegui (1992) quien en sus ensayos sobre la incidencia de la sequía alrededor de anthesis en maíz, obtuvo una evapotranspiración de 280 mm para la localidad de Balcarce.

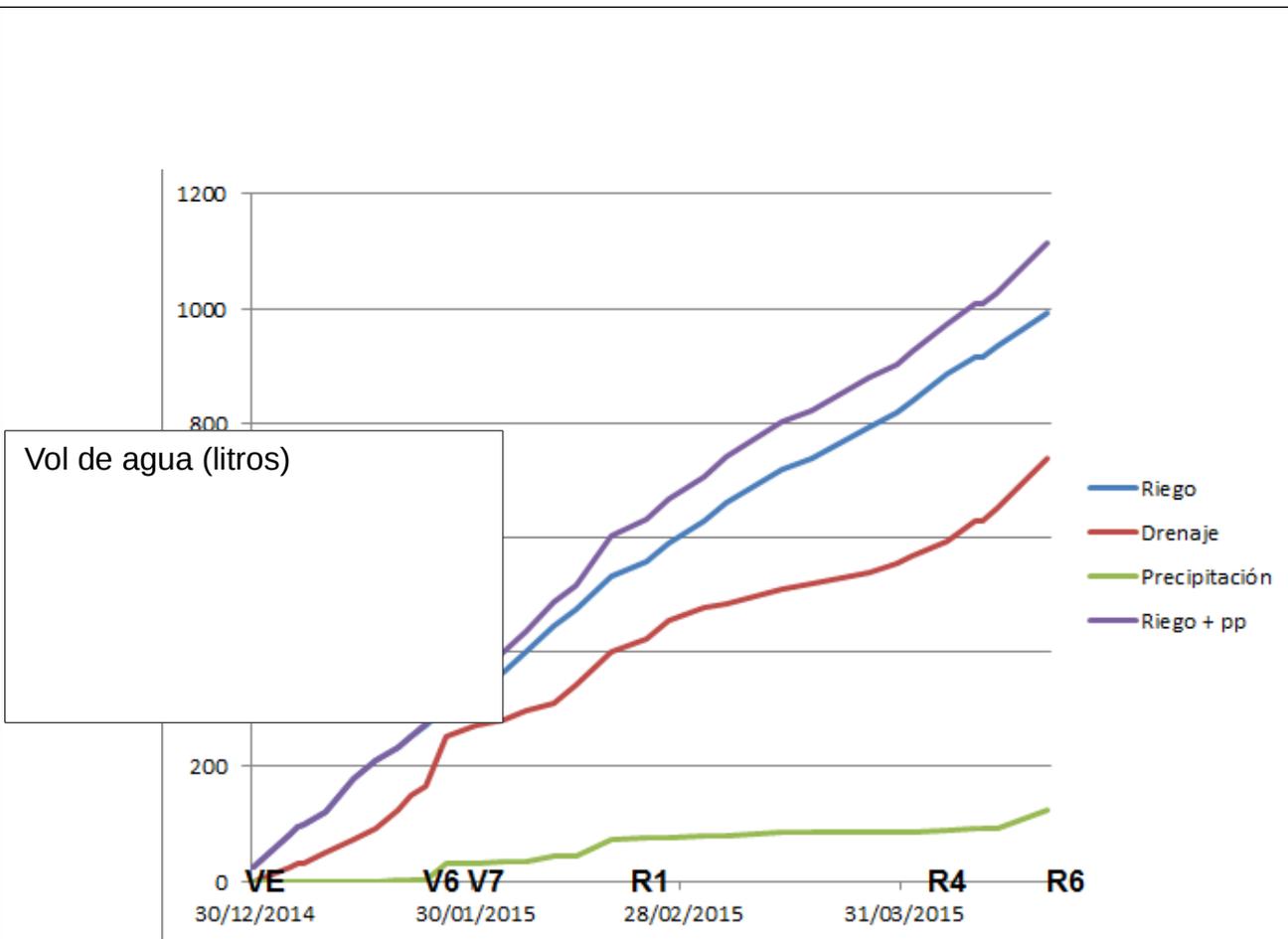


Figura 17. Dinámica del agua en maíz durante la campaña 2014/15.

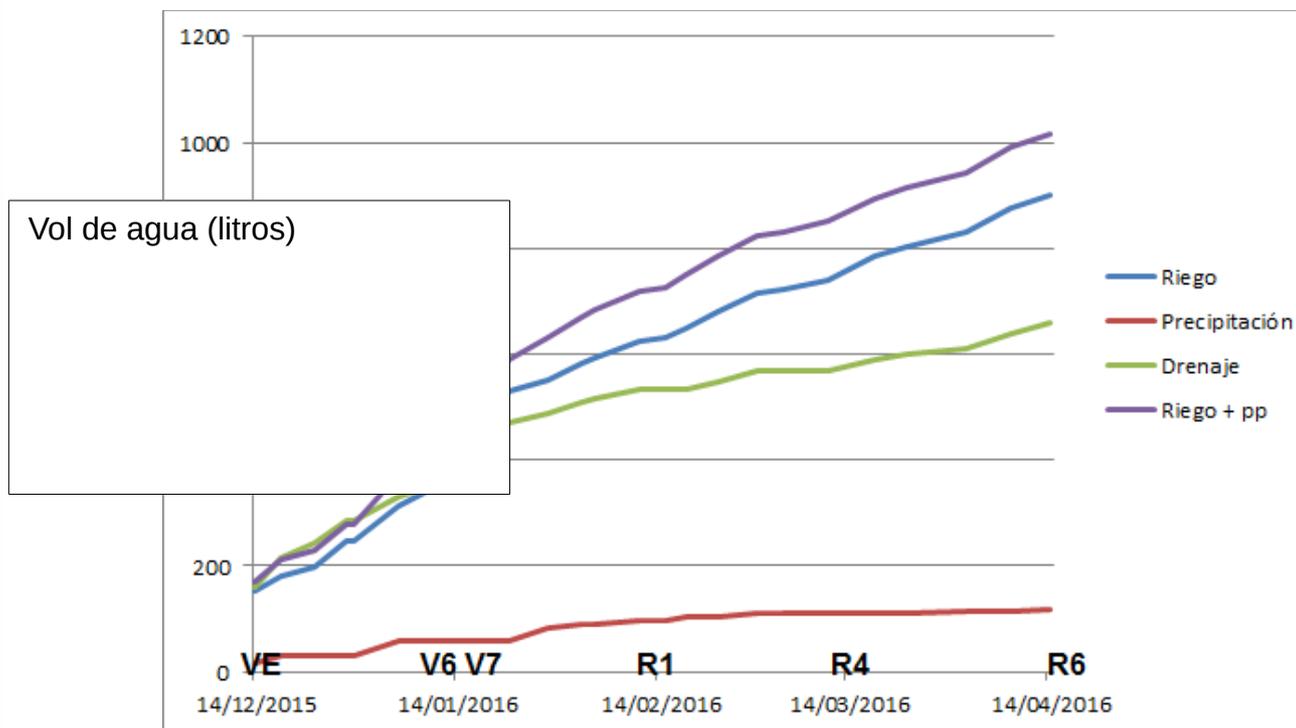


Figura 18. Dinámica del agua en maíz durante la campaña 2015/16.

Materia seca y EUA

Se compararon los ensayos realizados durante las campañas 2014/15 y 2015/2016 y el trabajo de Otegui (1992), en el cuál midió la respuesta del cultivo de maíz ante condiciones de sequía (Tabla 5).

En sus ensayos, la evapotranspiración medida por Otegui fue inferior a la medida en los ensayos locales, por lo que para mantener constante la EUA, se debería obtener un mayor valor de producción de materia seca aérea.

Efectivamente el resultado fue así, y la EUA se mantuvo prácticamente invariable:

Tabla 5. Valor de ETc, MS y EUA obtenidos por Otegui y Torretta para maíz.

	Evapotranspiración (mm)	Materia seca aérea (g.m ⁻²)	EUA (g.m ⁻² .mm ⁻¹)
Otegui 1992	284	1112	3,91
Torretta 2014/15	628	2515	4,00
Torretta 2015/16	580	2270	3,91

No obstante, esta mayor producción de materia seca aérea observada en el primer año de ensayo no resultó en una considerable mayor producción de grano, siendo de hecho, levemente inferior que en el segundo año (Tabla 6).

Peso de 1000, número de granos por m² y rendimiento.

Durante la temporada 2014/15 se registró una merma en el número de granos

por m² del 16% en comparación con los valores obtenidos en la campaña 2015/16 (Tabla 6).

El ensayo que presentó mayor número de granos por metro cuadrado fue el que obtuvo los mayores rendimientos. El comportamiento observado coincide con los descriptos por varios autores (Muchow et al., 1990; Andrade, 1995; Salvagliotti et al., 2002) donde el rendimiento es función del número de granos fijados por unidad de superficie y, en menor medida, del peso individual de los granos.

Tabla 6. Peso de mil granos, número de granos por metro cuadrado y rendimiento obtenido para las campañas 2014/15 y 2015/16. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0,05$).

	Peso 1000 (gr)	NG.m⁻²	Rendimiento (Tn.ha⁻¹)
Torretta 2014/15	311B	4180 B	13,5 A
Torretta 2015/16	275 A	5018 A	13,8 A

A pesar de existir diferencia en el número de granos, hubo cierta compensación en el tamaño y peso de los mismos durante la campaña 2014/15 logrando de este modo que los rendimientos en ambos no presenten diferencias significativas según un análisis de Tuckey (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis estadístico Tuckey para NG m⁻², P 1000 y rendimiento para las temporadas 2014/15 y 2015/16.

NG m²				
Variable	N	R²	R² Aj	CV
NG m²	12	0,65	0,62	8,43

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=506,66645

Error: 155124,7343				
	gl: 10			
Año	Medias	n	E.E.	
2015/16	5018,59	6	160,79	A
2014/15	4180,77	6	160,79	B

Peso de 1000				
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Peso de 1000	12	0,9	0,89	2,14

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=8,08330

Error: 39,4833				
	gl: 10			
Año	Medias	n	E.E.	
2015/16	311,23	6	2,57	A
2014/15	275,83	6	2,57	B

Rendimiento				
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento	12	0,24	0,16	9,11

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=18,78155

Error: 2013,1569				
	gl:10			
Año	Medias	n	E.E.	
2015/16	167,75	6	5,96	A
2014/15	152,91	6	5,96	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

De todas formas, en la campaña 2015/16 hubo una mayor eficiencia del uso del agua para la transformación en grano y en hoja y tallo.

Tabla 8. Eficiencia en el uso del agua para grano y eficiencia en el uso de agua para hoja y tallo, obtenido para las campañas 2014/15 y 2015/16.

	EUA en grano (Kg.mm⁻¹)	EUA en hoja y tallo (Kg.mm⁻¹)
Torretta 2014/15	2,15	1,58
Torretta 2015/16	2,39	1,66

Evolución de ETo para las campañas 2014/15 y 2015/16

En la Figura 19 se muestra la evolución de la ETo para Viedma durante la campaña 2014/15 entre fines de diciembre y fines de abril.

Se puede observar cómo la evapotranspiración de referencia se encontró en franco descenso durante todo el ciclo del cultivo, de hecho la recta que describe el comportamiento de la ETo tiene un R^2 de 0,96. Se presentaron altos valores por encima de los 8 mm/día durante los primeros estadios del cultivo disminuyendo hasta los 2,6 mm/día ya hacía fines de abril con el cultivo acercándose a madurez fisiológica (R6).

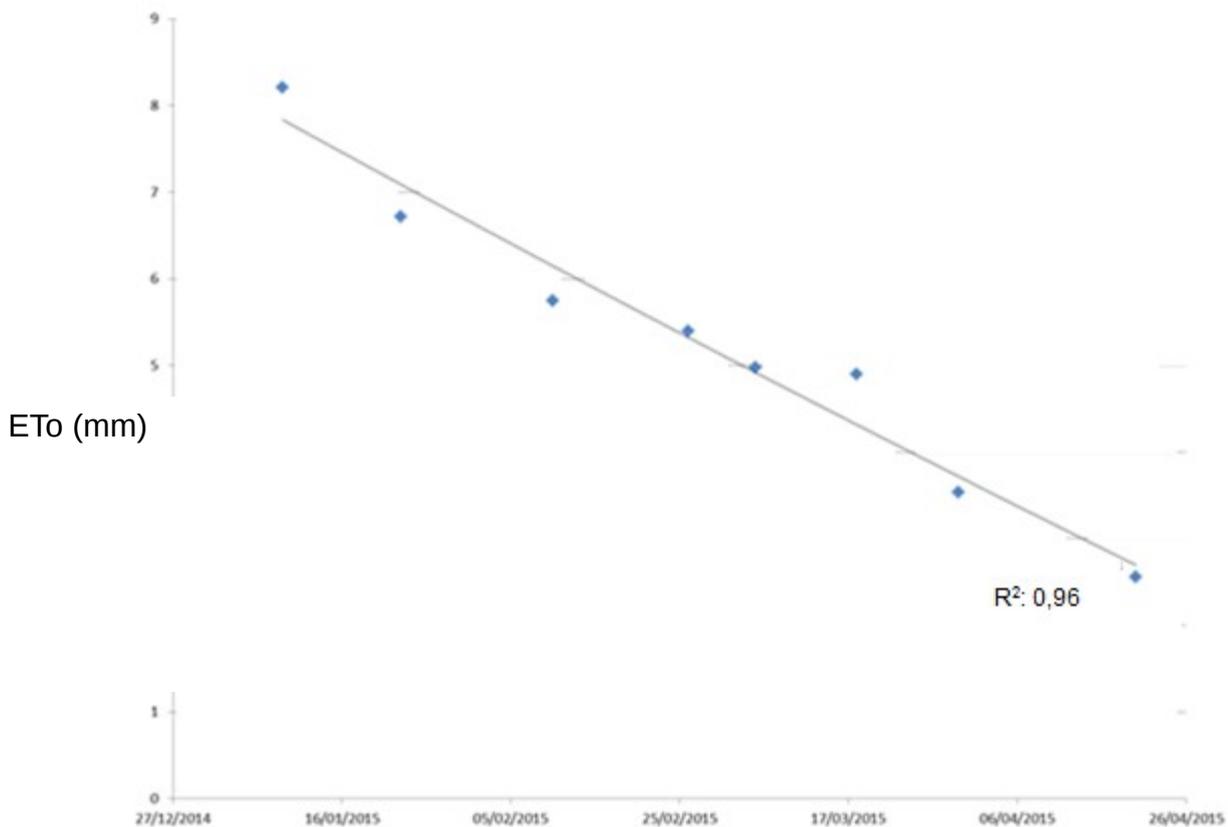


Figura 19. Evolución de la ETo para Viedma durante la campaña 2014/15.

En la Figura 20 se muestra la evolución de la ETo para Viedma durante la campaña 2015/16 entre diciembre y fines de abril. La marcha de la misma se explica mediante la ecuación del gráfico con un R^2 de 0,89.

Aquí vemos como la ETo vino en aumento desde antes que el ensayo comenzara a registrar datos y alcanzó un máximo de poco más de 6 mm/día hacia fines de diciembre, fecha en la que la planta todavía se encontraba en estadios jóvenes.

Posteriormente, la ETo comenzó a disminuir de manera muy gradual a medida que se acercaba el otoño.

Así, se encontró hacia fines de marzo una ETo de alrededor de 3 mm/día, la cual continuó descendiendo a medida que se acercaba el invierno.

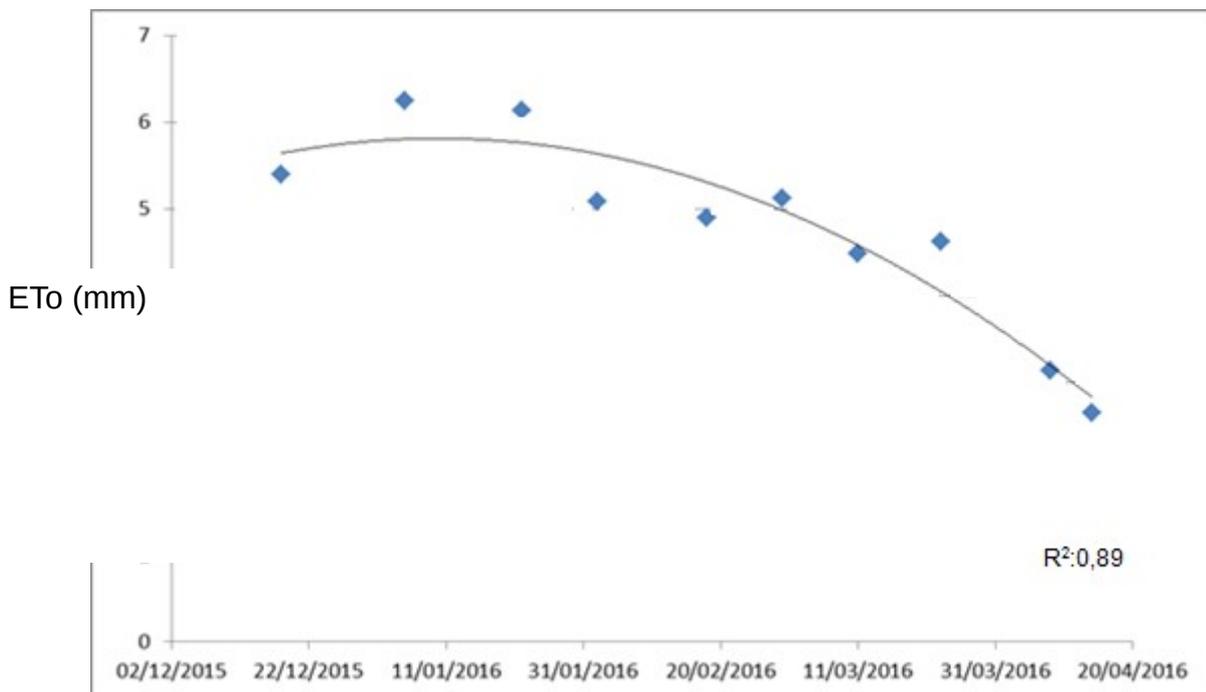


Figura 20. Evolución de la ETo para Viedma durante la campaña 2015/16.

Evolución de la ETc del maíz para las campañas 2014/15 y 2015/16

En la Figura 21 se muestran los resultados de la evolución semanal de la ETc del cultivo de maíz durante la temporada 2014/15.

Aquí podemos observar que ante una fecha tardía de siembra, la emergencia y, por lo tanto, los primeros datos, comenzaron a observarse 8 días después de que la semilla fue depositada en el suelo.

Se registró un marcado incremento de la ETc desde la emergencia hasta casi R1, pasando desde 4 mm/día hasta un pico de 9 mm/día en la semana del 7 de febrero, esto se debió a la rápida acumulación de materia seca que experimentó el cultivo durante su etapa vegetativa y, principalmente, a partir de V7.

Esta elevada evapotranspiración da la idea que alrededor de esta etapa (V7 a R1), la provisión de agua es vital para que la planta pueda desarrollarse de manera óptima.

A partir de V7, la evapotranspiración halló una meseta con un valor elevado, de alrededor de 8 mm/día, donde las variaciones son muy leves. Esta meseta coincidió con la etapa reproductiva del cultivo, desde la emergencia de las barbas (R1), hasta casi grano pastoso (R4), es decir, durante el periodo de acumulación de materia seca por parte del grano.

Luego de alcanzado el estadio R4 se produjo un descenso de la evapotranspiración, que se relaciona con el cese de los metabolismos de la planta. La fotosíntesis comienza a disminuir junto con la traslocación de fotoasimilados, y es aquí donde el grano comienza, principalmente, a perder humedad, acercándose al punto de madurez fisiológica (R6).

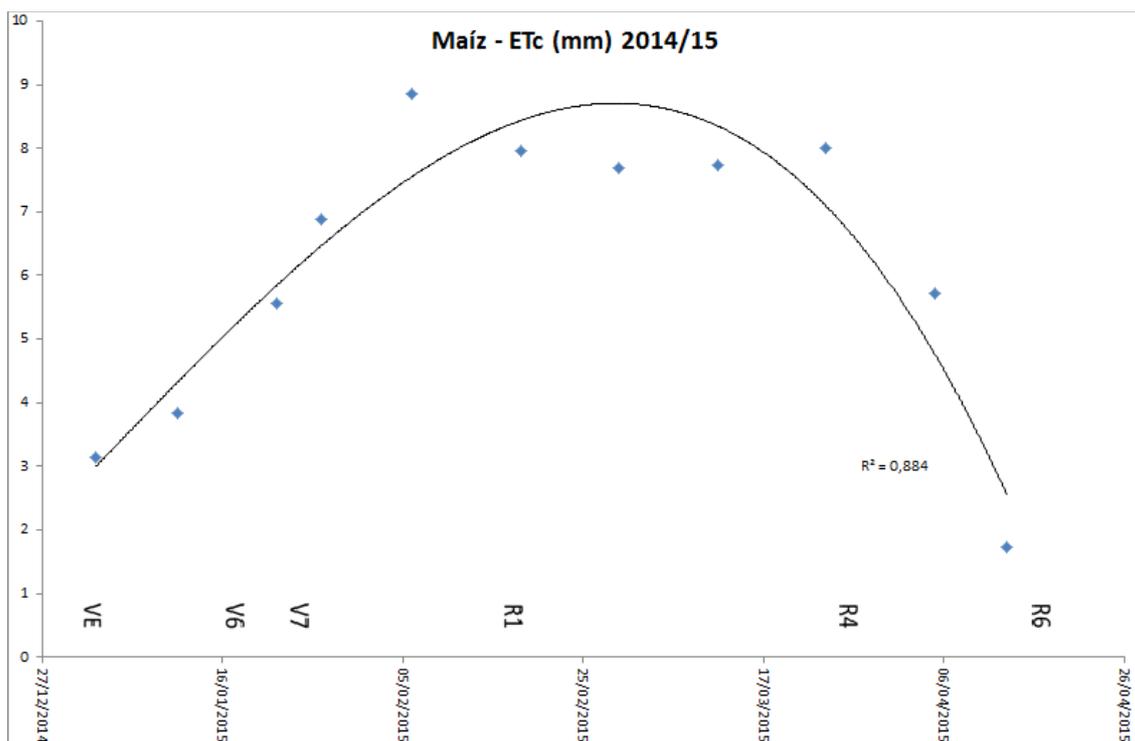


Figura 21. Evolución de la ETC de maíz para la campaña 2014/15.

En la Figura 22 se muestran los resultados de la evolución semanal de la ETC del cultivo de maíz durante la temporada 2015/16.

En este caso, la siembra fue realizada en una fecha acorde a lo recomendado para la zona, pero de todos modos, la curva de ETC siguió un patrón muy similar a lo visto en la temporada anterior con una fecha tardía de siembra, aunque diferenciándose en los tiempos de duración de cada estadio.

Aquí se vió un marcado crecimiento de los valores de ETC durante la etapa vegetativa del cultivo, relacionado principalmente a los procesos fisiológicos que desarrolla la planta. Es en esta etapa donde la planta acumula materia seca en forma de fuentes para que luego estas abastezcan a los destinos (granos).

El pico máximo de ETC se observó alrededor de V7, al igual que en la temporada 2014/15, aunque con valores inferiores a los antes vistos, en este caso, de cerca de 7 mm/día.

Posteriormente, durante la etapa reproductiva del cultivo (R1 a R6), la ETc fue disminuyendo paulatinamente. Este descenso se acelera en estados reproductivos avanzados, especialmente alcanzado el estado de R4 (grano pastoso).

Finalmente, con el cese de los metabolismos de la planta, la ETc disminuyó raudamente hasta alcanzar valores mínimos a medida que el estado del grano alcanza la madurez fisiológica en R6.

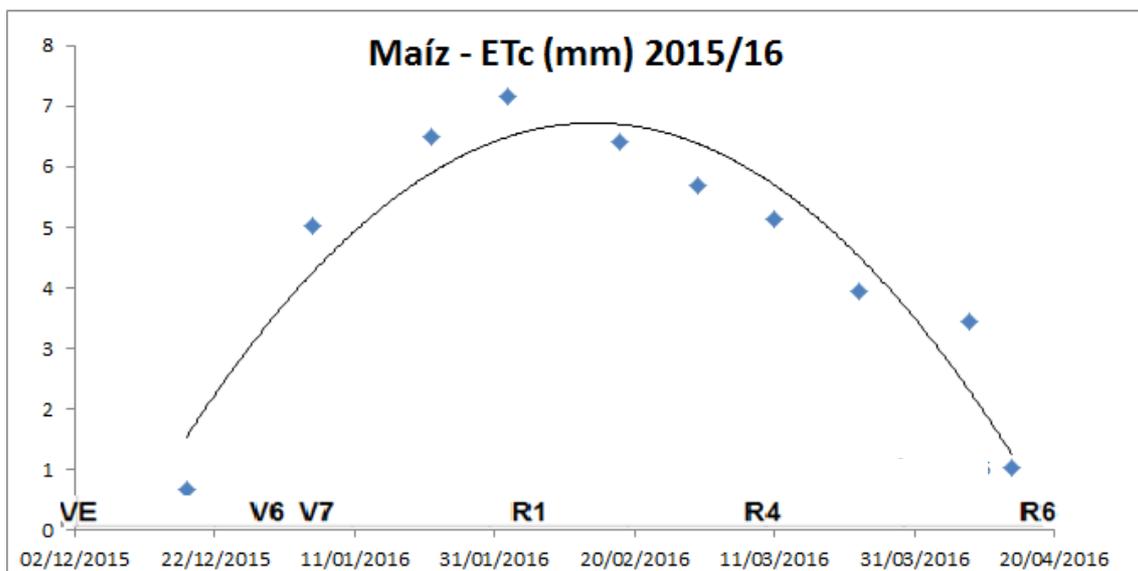


Figura 22. Evolución de la ETc de maíz para la campaña 2015/16.

Evolución del Kc del maíz para las campañas 2014/15 y 2015/16

En la Figura 23 se observa la evolución del Kc en la campaña 2014/15 para el cultivo de maíz. En estadíos jóvenes se obtuvo un Kc bajo que siguió la tendencia de la ETc, la cual fue aumentando hasta estadíos reproductivos. Cerca de R1 se tuvo un Kc medio cercano a 1,3 con un pico de 1,4 que luego descendió a medida que el cultivo se aproximó a R6.

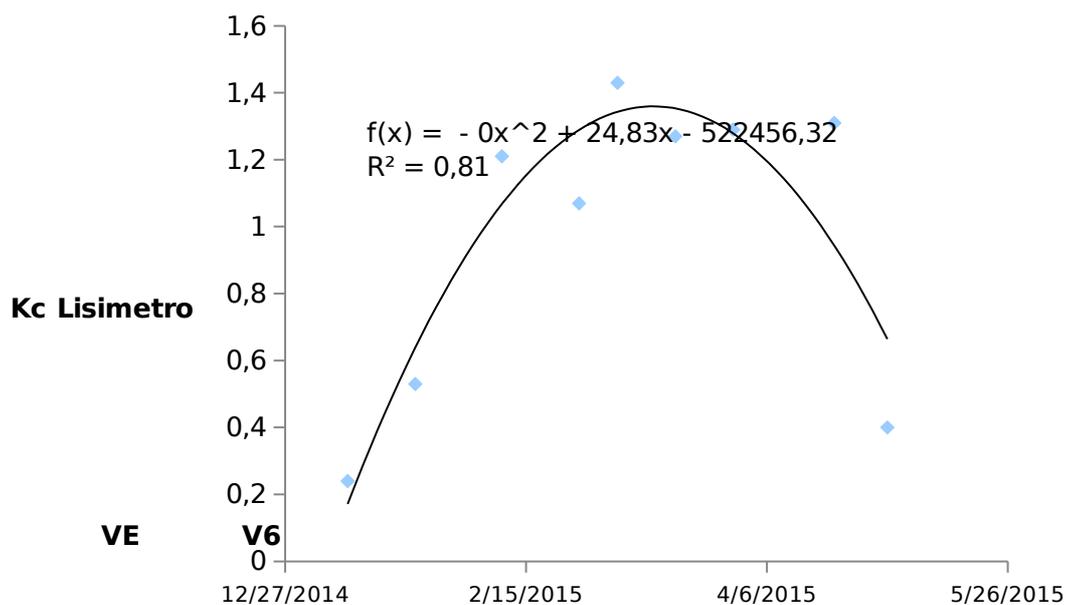


Figura 23. Evolución del Kc para maíz durante la campaña 2014/15.

En la figura 24 se observa la evolución del Kc en la campaña 2015/16 para el cultivo de maíz. Aquí, para una siembra más temprana, que los valores fueron un tanto inferiores, comenzando con 0,2 alrededor de VE y presentando un pico de 1 cerca de R1. Al igual que en la campaña 2014/15, fue en estado reproductivo donde el Kc alcanzó sus mayores valores, disminuyendo paulatinamente a medida que el cultivo se acercó a madurez fisiológica.

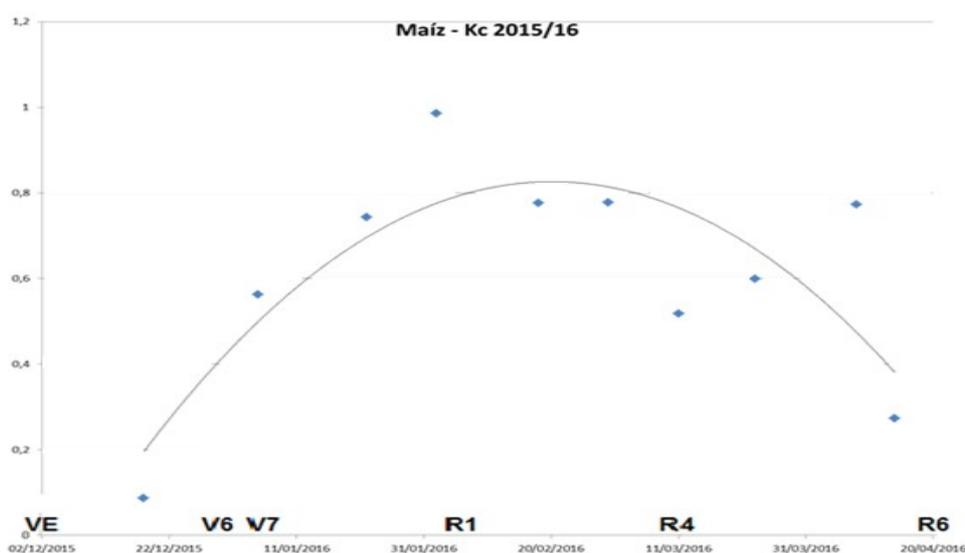


Figura 24. Evolución del Kc para maíz durante la campaña 2015/16

La diferencia observada, principalmente alrededor de R1, se debió a que en estadíos avanzados de cultivo, la ETo fue menor y la ETc mayor durante la campaña 2014/15 en comparación con la campaña 2015/16.

Comparación Kc teórico vs Kc calculado

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de Kc inicial, medio y final para el cultivo de maíz durante las campañas 2014/15 y 2015/16, los mismos fueron calculados a partir de la obtención de los datos semanales de Kc y su posterior ponderación. También se presentan los Kc teóricos extraídos de bibliografía. Los resultados se encuentran tanto en forma de tabla (Tabla 9) como gráfica (Figura 25).

Tabla 9. Valor de Kc medido para las campañas 2014/15 y valor teórico para las etapas inicial, desarrollo, mediados de temporada y fin de temporada.

Etapa	Torrett a 2014/15	Torrett a 2015/16	Teórico (Allen <i>et al.</i> , 2006)
Inicial (día 0 al 25)	0,35	0,2	0,3
Desarrollo (25 - 65)	-	-	-
Mediados de temporada (65 - 110)	1,3	0,94	1,2
Fin de temporada (110 – 150)	0,45	0,66	0,5

Se puede observar que los datos obtenidos en la campaña 2014/15 presentan valores próximos a los consultados en bibliografía, esto no sucede con los hallados para la campaña 2015/16, donde son inferiores durante todo el ciclo

del cultivo excepto al final. Evidentemente la componente año juega un papel importante ya que el primer ciclo 2014/15 la ETc calculada con las Kc de bibliografía se ubicó por debajo de la ETc medida en los lisímetros y de modo inverso el ciclo 2015/16. Esto hace necesario seguir incorporando mediciones de evapotranspiración para ajustar mejor el coeficiente del cultivo a la zona.

Kc medio

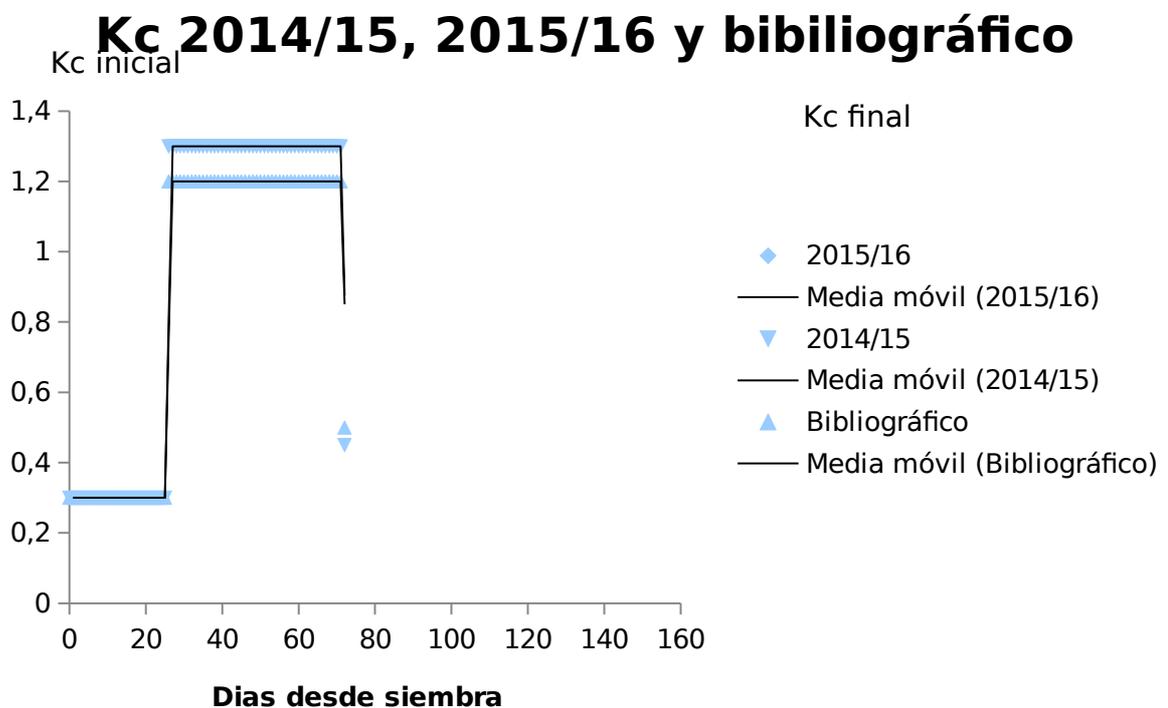


Figura 25. Kc medidos para el cultivo de maíz durante la campaña 2014/15 y 2015/16 y Kc bibliográfico.

Para analizar estadísticamente la relación entre los valores de ETc del lisímetro con la calcula con la formula FAO Penman-Monteith con los diferentes métodos, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2), el cual se define como el cuadrado del coeficiente de correlación, indica la capacidad de un modelo para replicar sus resultados (Figura 26).

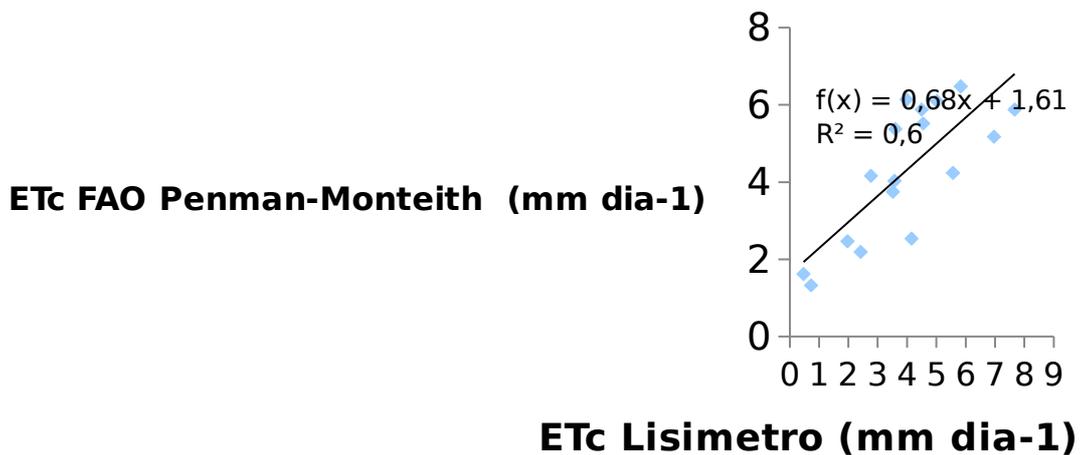


Figura 26. Relación entre la ETc medida en el lisímetro y la ETc calculada por medio de la formula FAO Penman-Monteith y Kc estandar para el cultivo de maíz durante la campaña 2014/15 y 2015/16

Krause *et al.* (2005) señalan que un valores bajos de R^2 en modelos de Kc indican una baja eficiencia del modelo para representar los datos medidos; por lo que para este estudio, un valor de 0.59 de coeficiente de determinación indica una baja eficiencia del método FAO Penman-Monteith para representar los datos medidos por medio de lisímetros, a partir de los coeficientes de cultivo originalmente propuestos por la metodología; esto indica que se deberán ajustar dichos coeficientes para las condiciones locales de manejo de cultivo de maíz bajo riego en el valle Inferior del Rio Negro.

Considerando lo anterior, y con el objeto de evitar el uso del Kc dual, se obtuvo un valor de Kc ajustado utilizando una función cuadrática que relaciona los datos de Kc del lisímetro para los dos ciclos y los días desde emergencia (Figura 27).

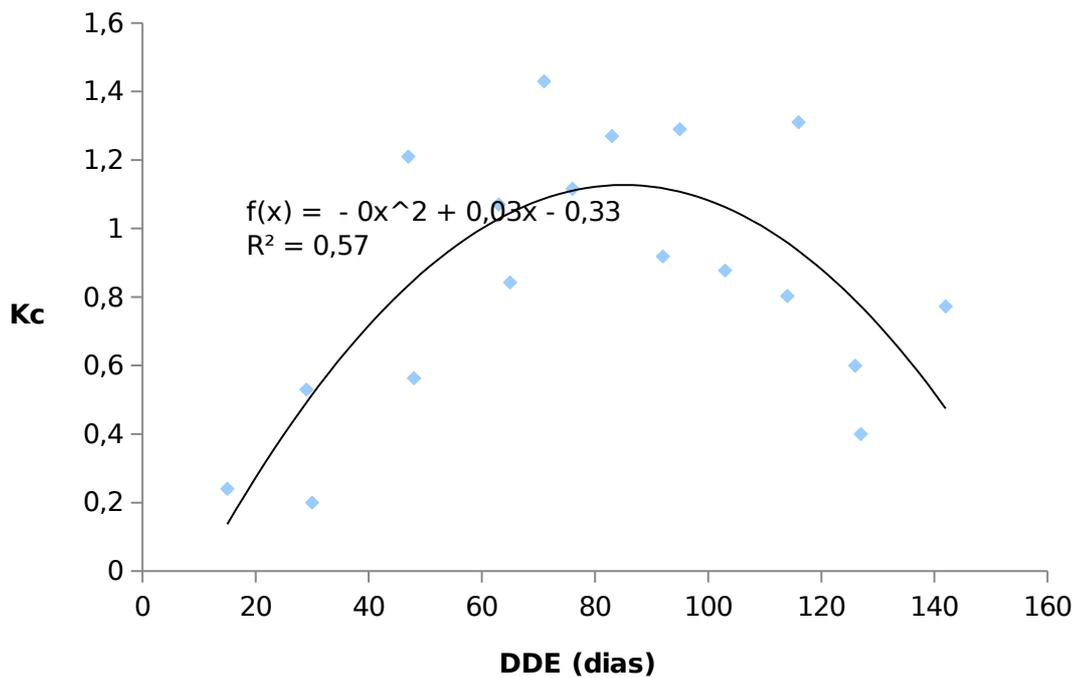


Figura 27. Comportamiento del coeficiente de cultivo (K_c) calculado en base a la ET_c del lisímetro y la ET_o por FAO Penman-Monteith con su ecuación de ajuste.

Con los valores de K_c ajustado, calculados con la ecuación cuadrática de la Figura 25 y la ET_o se evaluó la ET_c ajustada (ET_c ajust). Al calcular los parámetros de eficiencia estadística se observó que estos mejoraron de manera significativa, obteniéndose una R^2 de 0.71. Los valores promedio para $ET_{c\text{ajust}}$ fueron de 0.25, 1.17 y 0.44 para las etapas fenológicas inicial, media y final del cultivo, respectivamente.

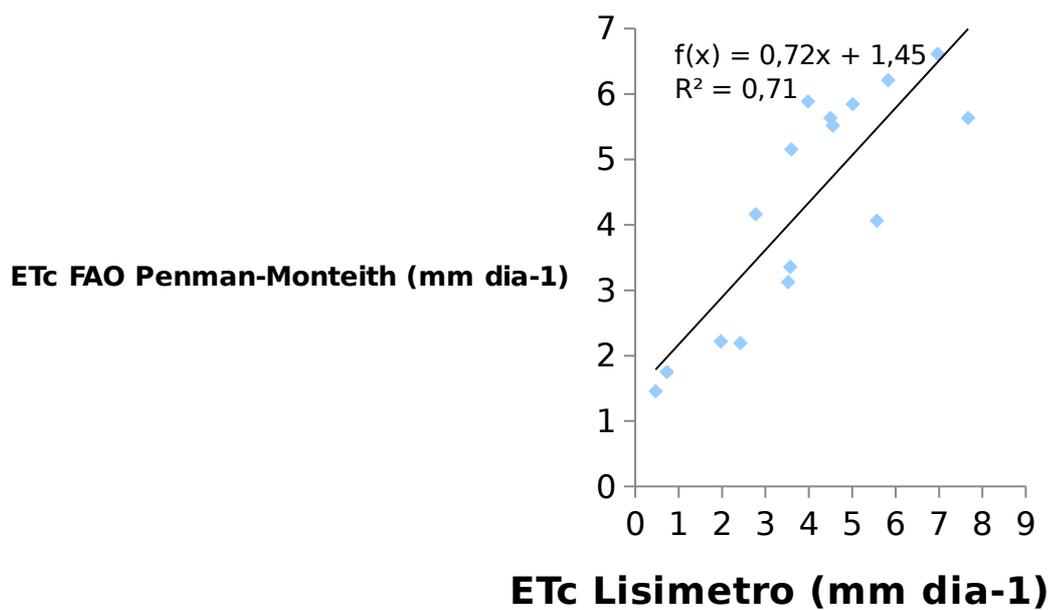


Figura 28. Relación entre la ETc medida en el lisímetro y la ETc calculada por medio de la formula FAO Penman-Monteith y Kc ajustado en base a la ecuación de la figura 27 para el cultivo de maíz bajo riego por goteo durante la campaña 2014/15 y 2015/16.

Estos resultados dejan la puerta abierta a futuras investigaciones donde habría que experimentar con las fechas de siembra para obtener los correspondientes Kc mejor ajustados y así analizar si el valor de este coeficiente se altera con esta variable.

CONCLUSIONES

En el Valle Inferior del río Negro se demostró que es una alternativa factible la utilización de lisímetros de drenaje artesanales para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos, así se obtuvieron datos en el cultivo de maíz para las campañas 2014/15 y 2015/16.

Se pudo observar que los requerimientos netos de agua del cultivo de maíz para siembras tardías de noviembre y diciembre rondan entre los 550 y los 650 mm anuales para rendimientos cercanos a las 13 tn.ha⁻¹, estos valores son superiores a los encontrados por Otegui (1992) para la localidad de Balcarce, no obstante son valores acordes para la zona.

Los valores de ETc experimentan un aumento gradual desde VE hasta V7, a partir de este estadio comienza a observarse un crecimiento considerable en el consumo de agua por parte del cultivo. Los momentos de mayor demanda hídrica, alcanzando valores diarios de ETc de cerca de 8 mm.día⁻¹, se ubican alrededor de R1 y se mantienen relativamente constantes hasta cerca de R4 donde comienzan a decaer paulatinamente. Esto quiere decir que desde V7 hasta cerca de R4 el agua es un factor fundamental para la obtención de rendimientos potenciales.

Los Kc hallados para fechas de siembra tardías (diciembre) coinciden con los consultados en bibliografía (Allen *et al.*, 2006), ambos presentan valores de 0.3, 1.3 y 0.45 para Kc inicial, medio y final respectivamente. Esto no sucede con siembras de noviembre, donde los valores hallados fueron de 0.2, 0.9 y 0.6. Esta situación deja la puerta abierta a futuras investigaciones en el campo de la evapotranspiración del cultivo de maíz en diferentes fechas de siembra, para verificar si efectivamente, los Kc se modifican en base a esta variable. La obtención de estos valores podría utilizarse para calcular las láminas de agua a aplicar de acuerdo a los distintos métodos de riego que se aplican en la zona. Se recomienda integrar los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos en otras investigaciones similares con la finalidad de obtener un modelo de Kc general para maíz bajo riego en la norpatagonia

Las eficiencias de uso de agua calculadas presentan valores muy similares a las consultadas en bibliografía, con valores de evapotranspiración superiores a los observados por Otegui (1992), pero produciendo mayores cantidades de materia seca. La diferencia de producción de MS entre ambos años de ensayo no se expresó necesariamente en incrementos en los rendimientos, lo que deja ver que esta mayor producción de MS se visualizó en mayor producción de hojas y tallo.

Propuesta de trabajo

Para las condiciones imperantes en IDEVI y considerando el uso de lisímetros de drenaje artesanales como una propuesta innovadora en la zona, se plantea, y sería muy positivo para la producción local, el hecho de continuar con la línea de trabajo.

Una de estas sendas de investigación a seguir podría ser la de medir el impacto que tendría en la producción local, y en el ahorro del recurso agua, el cálculo de los K_c de los principales cultivos de la zona de acuerdo a los distintos métodos de riego que se apliquen.

No obstante queda todavía mucho por ajustar aunque en primera medida se puede apresurar la conclusión que el uso de lisímetros de drenaje artesanales para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y, consecuentemente, sus respectivos K_c , es una alternativa viable y, de seguir este rumbo, sin dudas aportará datos valiosos para los investigadores y productores locales.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUA Y ENERGÍA ELÉCTRICA. 1987. "Estudio para el aprovechamiento integral del río Negro". Informe final: Sector Riego Agrícola. Diagnóstico de la eficiencia de riego predial actual. Convenio agua y energía eléctrica- Prov. de Río Negro.220 pp.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. y SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration —guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH M. 2006. "Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Estudio FAO Riego y Drenaje. Cuaderno N° 56.Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- ANDRADE, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crops Research. 41:1-12.
- ARRIAGA, H.O., CHIDICHIMO M.E., CATTANEO D.M., ORSINI N.M., MARGIOTTA F.A., IGLESIAS H., BARDELOIS E., SALGUERO J.,

FIGUEROA M. 1984. "El cultivo del maíz con riego al sur del paralelo 40°" L.S. III Congreso Nacional de Maíz, Pergamino p. 134-145.

- BLACKLOW, W. M. 1972. Influence of temperature on germination and elongation of the radicle and shoot of corn (*Zea mays* L.). *Crop Sci.* 12: 647-650.

a

- BLANEY, H.F. y W.D. CRIDDLE. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. U. S. Dept. Agr. Agricultural Research Service Tech Bull 1275. 59 pp.
- CHOI, E.Y., YOON, Y.H., CHOI, K.Y. y LEE, Y.B. 2015. Environmentally sustainable production of tomato in a coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 56 (2): 167-177.
- CALDWELL, D. S., SPURGEON, W. E., MANGES, H. L. 1994. Frequency of irrigation for subsurface drip - irrigated corn. *Trans. ASAE.* 37: 1099 - 1103.
- CIFUENTES, S. 1971. Evapotranspiración potencial en lisímetros y ecuaciones empíricas. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Santiago, Chile: Universidad Católica, Facultad de Ingeniería, 1971.

- FAO, 1997. Estudio FAO Riego y drenaje. Evapotranspiración del cultivo, guía para determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, N° 56. [Recuperado el 8 de marzo de 2017 en: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490sx0490s00.html> .
- FASSIO, A., CARRIQUIRY, A.I., TOJO,C., ROMERO R. 1998. Maíz: Aspectos sobre Fenología. Serie Técnica 101, INIA La Estanzuela. INIA, Uruguay. 51p.
- FERNÁNDEZ LÓPEZ, A., OATES, M.J., FERRÁNDEZ-VILLENA GARCÍA, M., MOLINA MARTÍNEZ, J.M., VÁZQUEZ DE LEÓN, A.L., RUIZ-CANALES, A. 2016. Calibración de sensores FDR de bajo coste para la gestión del riego. Análisis y comparativa de la gestion del riego con sensores FDR comerciales. II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola. Almería, España. 2016
- FISCHER, K. S., PALMER, F. E. 1984. Tropical maize. In: Goldsworthy, P. R. and Fischer, N. M. eds. Physiology of tropical field crops. New York, Wiley Interscience. pp. 213-248.
- GILMORE, E., ROGERS, J. S. 1958. Heat units as a method of measuring maturity in corn. Agron. J. 50:611-615.
- HANKS, R.J. 1983. Yield and Water-Use Relationships: An Overview. In: Taylor, H.M., Jordam, W.R., Sinclair, T.R. eds. Limitations to Efficient

Water Use in Crop Production. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wi. pp: 393-411.

- JONES, C. A., AND KINIRY, GENGENBACH, B. G., AND CARDWEELL, V. H. 1986. Temperature effects on in vitro kernel development of maize. Crop Science, 21: 761-766.
- KINIRY, J. R., RITCHIE, J. T. 1985. Shade intensive interval of kernel number of maize. Agron. J. 77:711-715.
- KO, J., PICCININNI, G. 2008. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. Agric. Water Manage.
- Krause, P., D. P. Boyle, and F. Bäse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Adv. Geosci. 5: 89-97.
- MALDONADO, H. 2012. Uso de lisímetros de drenaje artesanales para determinar el Kc de los principales estados fenológicos de la uva de mesa cv. Thompson Seedless en el Valle de Aconcagua. Tesis Ingeniero Agrónomo. San Felipe, Chile. Universidad de Aconcagua. Facultad de Agronomía.
- MARGIOTA, F., REINOSO, L., MARTINEZ, R.S. "Tranqueras abiertas para el cultivo de maíz", Diario Río Negro, 13 de diciembre de 2014,

http://www.rionegro.com.ar/pulso/tranqueras-abiertas-para-el-cultivo-del-maiz-LTRN_5358880, [13 de mayo de 2016].

- MATURANO, M., 2002. Tesis doctoral: Estudio del uso del agua y del nitrógeno dentro del marco de una agricultura sostenible en las regiones maiceras castellano-manchega y argentina. Universidad de Castilla, La Mancha. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. España.
- MATURANO, M., GUEVARA, E.R., MEIRA, S. y COCA, G. 1997. Criterios de irrigación en el cultivo de maíz. Eficiencia en el uso del agua. In: Congreso Nacional de Maíz, 6º Pergamino, Argentina.
- MEDRANO, H., BOTA, J., CIFRE, J., FLEXAS, J., RIBAS-CARBÓ, M., GULÍAS, J. 2007. Eficiencia en el uso de agua por las plantas. Investigaciones Geográficas, núm. 43,2007, pp 63-84. España.
- MUCHOW, R. C., SINCLAIR, T. R., BENNET, J. M. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yields across locations. Agron. J. 82:338-343.
- NOVOA, R. AND LOOMIS, R. S. 1981. Nitrogen and plant production. Plant and Soil. 58:177- 204.

- OTEGUI, M.E. 1992. Incidencia de una sequia alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Cs. Agrarias. Balcarce.
- PHENE, C.J., REGINATO, R.J., ITIER, B., and TASNNER, B.R. 1990. Sensing irrigation needs. In Management of farm irrigation Systems, eds. G.J. Hoffman, T.A. Howell and K.H. Solomon. St. Joseph, Mich.:ASAE
- REINOSO, L. 2014. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias: “Rendimiento de maíz en el Valle Inferior del Río Negro: Evaluación de la frecuencia de riego y la fertilización nitrogenada”. Universidad Nacional del Sur (UNS). Pp 1-7.
- REQUENA, A., NORDENSTRON, G., CASTILLO, E. 2012. Consumo de agua de plantas jóvenes de manzano regadas por goteo. Rev. Fac. Cienc. Agrar., Univ. Nac. Cuyo vol.44 no.1 Mendoza ene./jun. 2012.
- RITCHIE, J. T., NESMITH, D. S. 1991. Temperature and crop development. In: Hanks, J. and . Ritchie, J. T. eds.. Modeling plant and soil systems. Madison, Wis.,ASA-CSSA-SSSA. Agronomy Monograph 31:5-29.

- RITCHIE, S.W., HANWAY, J.J., BENSON, G.O., 1982. How a corn plant develops. Ames, Iowa State University. Special report no. 48. 21 p.
- SALVAGIOTTI F., PEDROL H., CASTELLARÍN J., CAPURRO J., FELIZIA J., GARGICEVICH A., GENTILE O., MÉNDEZ J. y N. TRENTINO. 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de N a la siembra. En: Para Mejorar la Producción N° 20. EEA Oliveros INTA. 67 – 70 pp.
- SCHINDLER, H. 2013. Historia del Valle Inferior del Río Negro. Nota técnica. Universidad Argentina de la Empresa (UADE). Recuperado el día 20 de agosto de 2015 en: https://repositorio.uade.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/328/C_SO-NTEC-01-20130627120548.pdf?sequence=4&isAllowed=y .
- SINCLAIR, T.R., TANNER, C.B., BENNETT, J.M. 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production. BioScience 34 (1), pp: 36-40.
- TOLLENAAR, M., MULDOON, T. B. AND HUNTER, R. B. 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. Crop Sci. 19:363-366.