

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



Trabajo final de carrera

**”DÉFICIT HÍDRICO Y SODICIDAD EN EL HORIZONTE BT: EFECTO SOBRE EL
RENDIMIENTO EN GRANO Y MATERIA SECA EN CULTIVO DE MAIZ”**

Carrera: Ingeniería Agronómica.

Alumno: Agüero Miguel Angel.

Legajo: 27408/6

DNI: 38858762

Mail: mangelaguero1995@gmail.com

Directora del trabajo: Ing. Agr. PhD. MSc. María Rosa Simón.

Tutor del trabajo: Dr. Ing. Agr. Esp. Garello Federico José.

AGRADECIMIENTOS.

El siguiente trabajo está dedicado a mi familia por el apoyo incondicional que me brindaron tanto económico como espiritual para nunca bajar los brazos durante mis estudios, a mi novia por acompañarme en muchos momentos difíciles con las palabras justas para seguir adelante. La familia Carreras que me dio la posibilidad de trabajar durante mis estudios para solventar los gastos a pesar de la carga horaria acotada que te permite el plan académico.

Destacar la disponibilidad y predisposición del Ing. Garelo Federico para ayudarme en la confección del trabajo final y darme la posibilidad de realizar los ensayos en conjunto con INTA Chascomús, al Ing. Esteban Melani por dedicarme su tiempo para solventar dudas y recolectar datos. Por último agradecer a la Dra. María Rosa Simón por ser mi directora de tesis, y aceptarme dentro de su cátedra para poder culminar mis estudios académicos de grado.

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.

	Página
Resumen	5
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	
1.1 Descripción del cultivo, situación mundial y nacional.	6
1.2. Zona de estudio.	7
1.3. Caracterización de los suelos.	9
1.4. Absorción de agua por los cultivos.	10
1.5. Generación del rendimiento en maíz.	11
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. HIPÓTESIS DEL TRABAJO	15

4. OBJETIVOS DEL TRABAJO	15
4.1 Objetivo general	
4.2 Objetivos específicos	
5. MATERIALES Y MÉTODOS	
5.1 Diseño experimental del ensayo a campo.	15
5.2. Tratamientos.	16
5.3. Manejo de suelos y cultivo.	17
5.4. Determinaciones.	
5.4.1. <i>Contenido hídrico.</i>	19
5.4.2. <i>Mediciones alométricas y fenológicas en planta.</i>	19
5.4.3. <i>Estado hídrico del cultivo.</i>	20
5.4.4. <i>Biomasa total, rendimiento en grano y componentes numéricos.</i>	
5.5. Análisis de datos.	21

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	
6.1. Condiciones climáticas de crecimiento.	21
6.2. Potencial Agua en Hoja.	22
6.3. Tasa de crecimiento por planta.	24
6.4. Índice de área foliar.	25
6.5. Rendimiento en grano y componentes numéricos.	26
7. CONCLUSIONES.	29
8. BIBLIOGRAFÍA.	30

RESUMEN

En la campaña 2022/23 en la Argentina, se implantaron 7,1 millones de hectáreas de maíz, de las cuales 125 mil has fueron en la Pampa Deprimida, mostrando un incremento del 0,25% anual en la última década, esto significa un desplazamiento de la frontera agrícola del cultivo hacia suelos con altos niveles de sodio en los horizontes sub-superficiales. Surge entonces el desafío de comprender como se desempeñan los cultivos en estas condiciones. Los objetivos del siguiente trabajo son: 1) avanzar en el conocimiento del rol del horizonte Bt con diferentes contenidos

de sodio (Na^+), en la provisión de agua al cultivo de maíz bajo diferentes regímenes hídricos, 2) evaluar el impacto de diferentes PSI del horizonte Bt sobre el rendimiento del maíz y 3) evaluar el desempeño del cultivo de maíz a diferentes estreses (sequía y sodicidad). Durante el ciclo 2019-2020 se realizó un ensayo de maíz tardío en micro-parcelas. Se utilizó un DCA con dos tratamientos: 1) Control y 2) Sequía y 6 repeticiones, el factor “ Na^+ en el horizonte Bt” se tomó como una covariable. Se midió semanalmente: la humedad gravimétrica, alometría en plantas, la tasa de crecimiento del cultivo, el índice de área foliar máximo, al final del ciclo se cosecharon las parcelas y se determinó el rendimiento en grano (RG) y sus componentes numéricos, número de granos (NG) y peso de mil granos. Se observaron mayores niveles de estrés hídrico asociados a mayores PSI, sólo en los períodos de mayor demanda hídrica del cultivo. El rendimiento cayó 134 kg ha⁻¹ por cada unidad que se incrementó el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), asociado a niveles crecientes de sodicidad. Estos resultados son muy relevantes, ya que proporcionan una nueva visión en la posibilidad de implantar cultivos en suelos sódicos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del cultivo, situación mundial y nacional

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), estima que la población mundial, ascenderá de 7.700 a 9.700 millones para el año 2050, lo que significa un incremento en la demanda de alimentos (FAO, 2009). El maíz, junto al trigo y al arroz, constituyen un tercio de la producción mundial de granos (FAOSTAT, 2018). Con aproximadamente 206 M ha en el 2022, el maíz fue el 2° cereal más cultivado del mundo después del trigo, cuyos destinos abarcan un amplio abanico de finalidades. En la campaña 2021/2022 en la Argentina, se implantaron 7,1 M ha⁻¹, posicionándolo como el cuarto país productor y el quinto en mayor superficie implantada (Figura 1) (BCBA, 2022; FAOSTAT, 2022). En la Cuenca del Salado, la superficie sembrada con maiz en la última campaña fue de 125 mil ha, lo que se traduce en un incremento del 0,25% anual en los últimos 7 años (Figura 2) (BCBA, 2022).

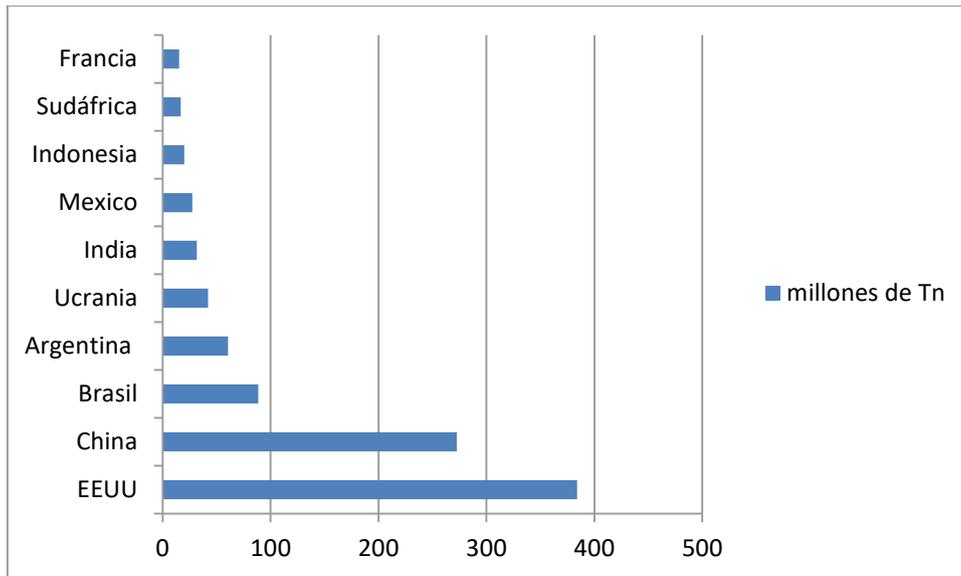


Figura 1: 10 principales países productores de maíz, indicando la producción mundial en millones de toneladas al año (FAOSTAT 2022).

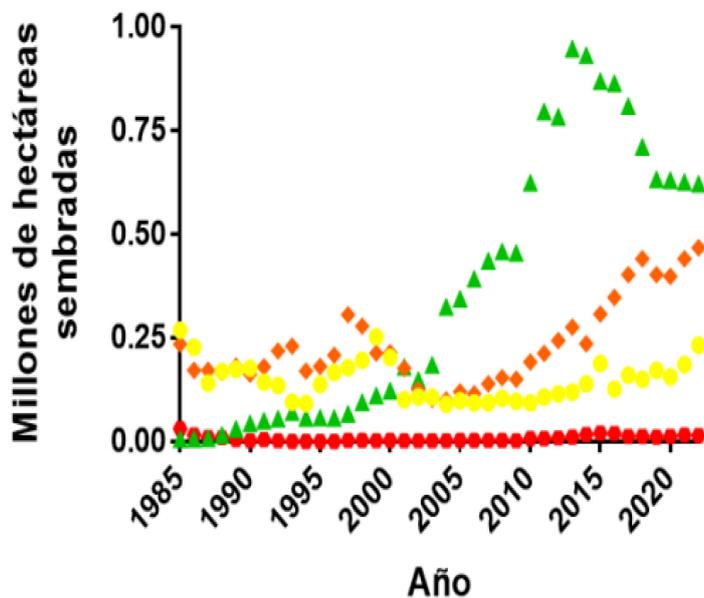


Figura 2: Superficie implantada (en Millones de hectáreas) de los principales cultivos de verano en la Pampa Deprimida desde 1985 a la actualidad. Maíz (rombos anaranjados), Soja (Triángulos verdes), Girasol (círculos amarillos) y Sorgo (hexágonos rojos). (BCBA, 2022).

1.2. Zona de estudio

La Argentina posee el 30% de su superficie (85,6 millones de ha) con suelos afectados por sales o halomórficos (Imbellone et al., 2010), Los suelos halomórficos

son aquellos que presentan problemas por excesos de sales en la solución, cuantificados a través de una conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CEe) superior a 4 dS m⁻¹ (i.e: suelos salinos) o más del 15% de sodio en el complejo intercambiable (PSI) (i.e: suelos sódicos) (USSL 1954). Extensas regiones del país son cubiertas por este tipo de suelos, por ejemplo: los Bajos Submeridionales del Sur del Chaco y Norte de Santa Fe, la Cuenca del Río Quinto que abarca las provincias de Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires, y la Pampa Deprimida en la Provincia de Buenos Aires (INTA, 2013).

Dentro de la región pampeana, la Pampa Deprimida es una llanura baja de aproximadamente 9 millones de ha, localizada en el centro-este de la provincia de Buenos Aires, con una elevada heterogeneidad de suelos (Batista y León, 1992) donde el 50% de esa superficie presenta limitantes por presencia de sales sódicas (Vásquez et al., 2007; Vásquez et al., 2009) Esta sub-región es considerada la más importante del país en la actividad de cría vacuna con muy baja incorporación de tecnología (Otondo y Cicchino, 2007). No obstante, a partir del año 2004 se produjo un reemplazo paulatino de los pastizales naturales por cultivos anuales destinados a la confección de reservas o a la producción de granos (MAGyP 2019), desplazando el ganado vacuno a las zonas más bajas del relieve (Otondo y Cicchino, 2007), y donde el maíz, tuvo un rol estratégico en las rotaciones, tanto agrícolas como ganaderas, con un incremento próximo a 3 veces la superficie implantada en los últimos 10 años (MAGyP, 2019).

Estos cambios, fueron consecuencia de las condiciones favorables del mercado en la producción de granos, difusión de tecnologías que facilitaron la actividad (ej: siembra directa y mayor uso de insumos externos) y en el cambio de escala de la empresa agropecuaria (Paruelo et al., 2005; Satorre, 2005), lo que conllevó al avance de la frontera agropecuaria hacia partes más bajas del relieve, en el que se encuentran suelos Natracuoles/Natrudoles (Figura 4). No obstante, si bien se iniciaron con el cultivo de soja, actualmente es cada vez mayor la superficie cultivada con maíz (MAGyP, 2019).



Figura 3. Subregiones de la Región Pampeana. A) Pampa Ondulada; B) Pampa Arenosa (B1: Plana, B2: Occidental); C) Pampa Austral; D) Pampa Deprimida; E) Pampa Mesopotámica. La Cuenca del Salado se encuentra dentro de la Pampa Deprimida.

1.3. Caracterización de los suelos

En la Pampa Deprimida, los suelos ubicados en la media loma de la topo secuencia (Figura 4), presentan un horizonte superficial de espesor variable (20-40 cm) cuyas características lo hacen apto para un normal desarrollo vegetal, y un horizonte subsuperficial de textura arcillosa, el cual presenta sectores localizados en forma de “manchones” con elevados contenidos de Na^+ en el complejo de cambio (Lavado y Taboada, 2017). Dado que este catión mencionado presenta un elevado grado de hidratación (Tan, 2011), sus elevadas concentraciones en esos sectores generan la dispersión de la fracción coloidal y su acomodamiento en la matriz del suelo, generando el bloqueo de los poros (Rengasamy y Olsson, 1991; Lavado y Taboada, 2017), (Figura 5), lo que reduce el agua disponible para los cultivos (Painuli y Abrol, 1986).



Figura 4. Topo-secuencia de suelos de la Pampa Deprimida (Adaptado de Batista, et al., 2005).

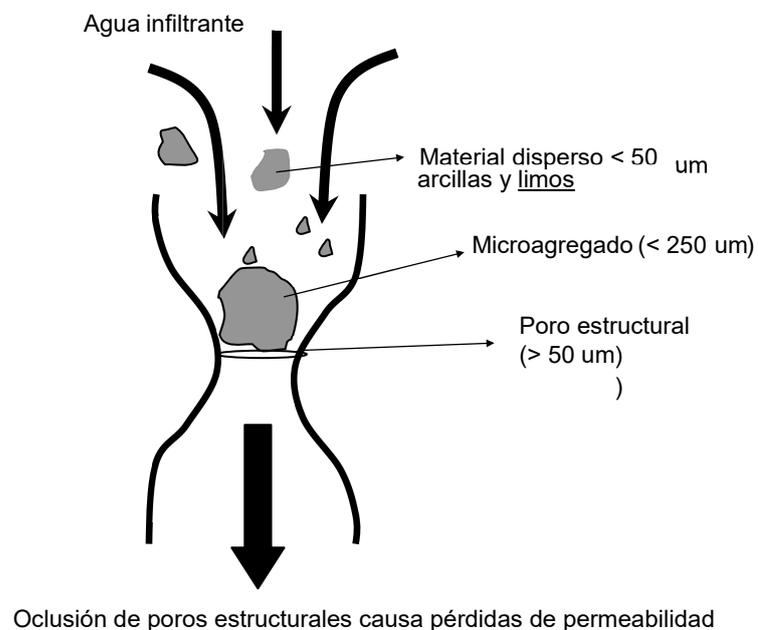


Figura.5. Esquema que muestra cómo se produce la oclusión de poros estructurales superficiales, como resultado de la migración de partículas y microagregados diámetro inferior al diámetro de poro ocluido (Taboada et al. 2009).

1.4. Absorción de agua por los cultivos

La cantidad de agua que una planta puede absorber desde el suelo en condiciones

de secano, está determinada por las características del cultivo, del suelo y climáticas (Orcutt, 2000). El agua útil del suelo para los cultivos (AU), es la que se encuentra retenida entre -0,03 y -1,5 MPa (Hanks, 1980). Su extracción dependerá de la presencia y abundancia de raíces y su funcionalidad (Dardanelli et al., 2003b). En suelos sin limitaciones para el desarrollo radical, la extracción de esta agua, se puede extender hasta los 2 o 3 m de profundidad (Andriani, 2000). Mientras que en suelos con limitantes físicas (ej: tosca, estructura laminar, horizonte fuertemente textural) o químicas (ej: acidez, alcalinidad, salinidad, elevado contenido de sodio), la profundidad máxima de aprovechamiento, está condicionada por la magnitud y el grado de dicha limitante, la capacidad del cultivo para sobrepasarla y las condiciones hídricas (ej: abundancia de precipitaciones) que pueden reducir o incrementar su efecto negativo.

El volumen de extracción de agua de un cultivo en el perfil se puede determinar a través de la producción de biomasa, y la eficiencia del uso del agua. Y entre varios factores, está determinado por la homogeneidad o heterogeneidad textural entre horizontes del suelo. En suelos donde las texturas de los horizontes son más heterogéneas entre sí, el AU es agotada más lentamente, confiriéndole al cultivo, una “reserva” de agua para períodos de mayor demanda (Dardanelli et al., 2003b). En este sentido, Otegui et al. (1995) establecieron que, bajo situaciones de déficit hídrico, la participación del horizonte Bt en el suministro de agua a un cultivo de maíz es muy significativa bajo deficiencias hídricas que se puedan dar en el período crítico de definición del rendimiento. Se destaca que el maíz tiene la habilidad de sobrepasar compactaciones edáficas produciendo raíces con mayor proporción de tejido arenquimático, permitiéndole incrementar de manera significativa la adquisición de recursos hídricos y nutricionales (Zhu et al., 2010).

1.5. Generación del rendimiento en maíz

El maíz es una especie de crecimiento determinado, en el que la tasa de desarrollo está regulada por la temperatura, siendo la temperatura base de desarrollo (T_b) de 8 °C (Cirilo, 1994). La escala de Ritchie y Hanway (1982) es la más utilizada para describir el desarrollo de este cereal, la cual denomina “V” y “R” a los estados vegetativos y reproductivos externos, respectivamente (Tabla 1), aunque la planta se

encuentra en estado reproductivo desde V4 a V6 en que comienza a diferenciar la panoja internamente.

Tabla 1. **Estados fenológicos de maíz (Adaptado de: Ritchie y Hanway, 1982)**

Estados Vegetativos		Estados Reproductivos	
V _E	Emergencia	R1	Emergencia de estigmas
V ₁	1° hoja	R2	Cuaje
V ₂	2° hoja	R3	Grano lechoso
...		R4	Grano pastoso
V _n	Nª hoja	R5	Grano dentado
V _T	Panojamiento	R6	Madurez fisiológica

Este cultivo diferencia una hoja cada 40 °C día (°Cd) (Hesketh y Warrington, 1989), por lo que la duración de la etapa hasta aparición de la panoja estará determinada por el número de hojas totales, fluctuando de 800 a 900 °Cd para híbridos templados (Otegui, 1997). Mientras que el tiempo térmico para completar la etapa reproductiva, varía entre 600 y 900 °Cd (temperatura base (T_b) = 8 °C), en función del híbrido utilizado (Cirilo, 1994), cuanto mayor sea la longitud del ciclo del cultivo, más elevada será la producción de biomasa total (BT).

La producción de BT de un cultivo depende de la radiación solar fotosintéticamente activa incidente (RFA_{inc}), de la capacidad del canopeo para interceptarla (RFAI) y de la eficiencia con que el cultivo transforma la radiación interceptada en materia seca (EUR) a través del ciclo del cultivo (Ec 1) (Andrade et al., 1996). Para alcanzar una elevada BT, es necesario i) lograr altas tasas de crecimiento del cultivo (TCC) y ii) etapas fenológicas prolongadas (Andrade et al., 2002).

$$BT = RFA_{inc} * RFAI * EUR \quad [Ec 1]$$

Por su parte, el rendimiento en grano (RG) puede ser definido por sus componentes numéricos, el número de granos por unidad de superficie (NG) y el peso de los granos (PG) (Ec 2).

$$RG = NG * PG$$

[Ec 2]

El RG está mayormente asociado al NG y en menor medida al PG (Andrade et al., 2005). El NG se define en un período de aproximadamente 30 días centrados en V_T , conocido como período crítico (PC). En éste período, la incidencia de algún estrés biótico o abiótico impacta de manera significativa, reduciendo el NG y por ende en el RG (Andrade et al., 1993; Otegui et al., 1995).

El PG es el último componente del rendimiento en ser definido, su determinación transcurre en la fase que se extiende desde R2 a R6. Esta etapa está caracterizada por i) la tasa de crecimiento del grano, que se asocia directamente con la temperatura y ii) la duración del período de llenado, que es función inversa de la temperatura (Tollenar y Brulsema, 1988; Cirilo y Andrade, 1996). El PG puede ser expresado como el producto de la tasa de acumulación de biomasa y la duración de la etapa de llenado.

Bajo condiciones de secano, la principal limitante a la productividad de los cultivos es el agua almacenada en el perfil. En este sentido, el Na^+ puede restringir los rendimientos a partir de reducciones del agua del suelo disponible para los cultivos, es decir el agua extraída por los cultivos (Figura 6). La cuantificación del impacto de la sodicidad sobre el rendimiento del maíz frente a escenarios hídricos contrastantes, permitirá magnificar la importancia de este catión, y poder contemplarlo cuando se planifican los rendimientos posibles de obtener y consecuentemente adecuar las prácticas de manejo de suelos y cultivos tendientes a optimizar el uso de recursos e insumos por parte de los productores agropecuarios.

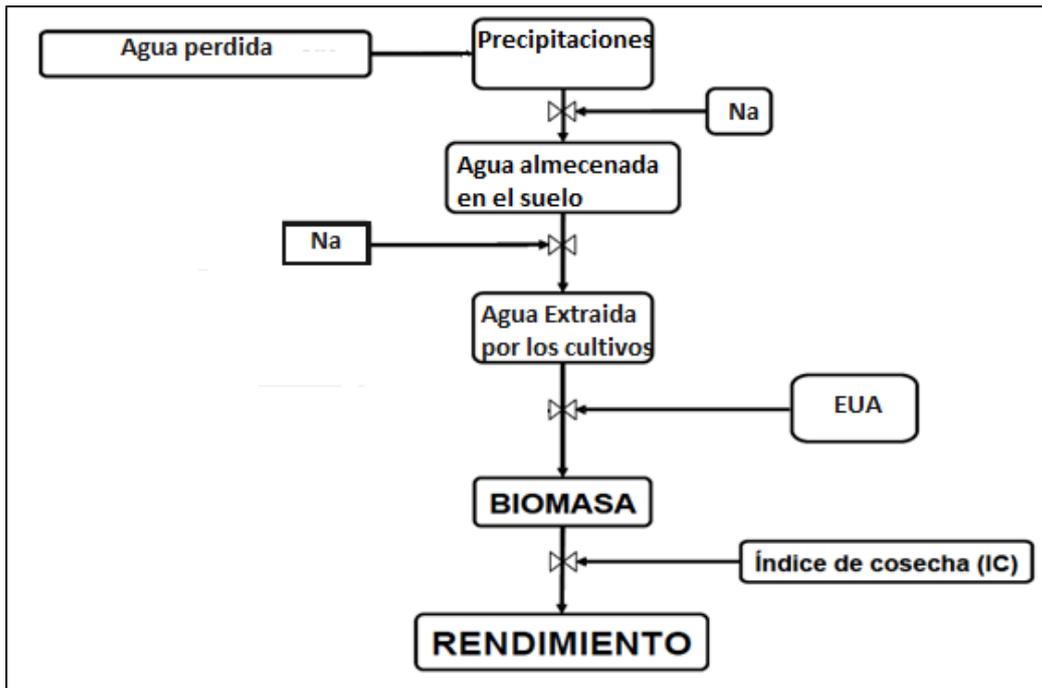


Figura 6. Esquema teórico de generación de biomasa y rendimiento en el cultivo de maíz. Se detallan los diferentes procesos que podrían ser afectados por el sodio (Adaptado de Taboada y Alvarez, 2008).

2. JUSTIFICACIÓN

Dentro de la Pampa Deprimida, la Cuenca del Salado en la Argentina, es una de las mayores áreas de suelos sódicos del mundo (Taboada et al., 2009). La presión generada por los mercados y tecnologías que facilitaron las labores, permitieron elevar los márgenes económicos y productivos, lo que llevó a los productores agropecuarios a extender la superficie de los cultivos a éstos ambientes. Esta actividad “llegó para quedarse”, resulta relevante abordar el entendimiento de los procesos que están involucrados con la utilización de los recursos por los cultivos. En consecuencia, cuantificar el impacto de diferentes niveles de sodio intercambiable sobre los niveles de estrés hídrico, variables fisiológicas y la producción de grano y/o biomasa (asociadas a limitantes halomórficas), es una línea de trabajo relevante para proveer herramientas genéricas que podrían ser utilizadas en el desarrollo de estrategias de manejo de suelos y cultivos, orientadas a conservarlo y estabilizar los resultados logrados.

3. HIPÓTESIS

□ El incremento de la sodicidad edáfica provoca estrés hídrico en todas las etapas fenológicas del cultivo de maíz. El nivel de estrés es mayor cuando las precipitaciones son deficientes.

□ El rendimiento en biomasa y granos del cultivo de maíz se reduce ante incrementos del Na^+ en el horizonte Bt. Esta reducción es más significativa ante deficiencias hídricas.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Avanzar en el conocimiento del impacto de la sodicidad subsuperficial sobre el cultivo de maíz bajo diferentes regímenes hídricos.

4.2. Objetivos específicos

□ Cuantificar el efecto de la sodicidad subsuperficial y niveles hídricos contrastantes sobre el estado hídrico del cultivo de maíz en diferentes etapas ontogénicas del ciclo de crecimiento.

□ Cuantificar la tasa de crecimiento del cultivo de maíz bajo condiciones hídricas contrastantes y con niveles de sodicidad edáfica creciente.

□ Evaluar el efecto de diferentes cantidades de Na^+ en el horizonte Bt sobre el rendimiento en grano del maíz y los componentes numéricos del rendimiento NG y PG.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Diseño experimental del ensayo a campo.

Los estudios se realizaron en la Chacra Experimental Integrada Chascomús (INTA-MAIBA, 35° 44' 38"S; 58° 3' 25"O), Provincia de Buenos Aires, Argentina, durante el ciclo 2019-2020. Para dar respuesta a los interrogantes se llevó a cabo un experimento en parcelas a campo de 10 m de largo, con un ancho de 6 surcos distanciados a 0,52 m. El experimento se realizó en un ambiente denominado "suelos overos o manchados", debido a que presentan una variabilidad espacial en sus propiedades físicas y químicas, que originan limitaciones de diferente magnitud al crecimiento de los cultivos.

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con dos tratamientos y seis repeticiones: el factor " Na^+ en el horizonte Bt" se tomó como una covariable, debido

a que la heterogeneidad espacial intrínseca de éstos ambientes, impiden que éste pueda ser utilizado como “factor fijo”.

5.2. Tratamientos

1) Control: Cultivo que recibió el 100% de las precipitaciones en el ciclo.

2) Sequía: Cultivo que a partir de V11 se le colocaron lonas de silo bolsa cortadas, superpuestas y abrochadas unas con otras en el entresurco para impedir el ingreso de agua proveniente de las precipitaciones.



Figura 7. Tratamiento control sin aplicación de lonas para cubrir el suelo de las lluvias.



Figura 8. Tratamiento sequía, con lonas cubriendo el suelo de las precipitaciones.

5.3. Manejo de suelos y cultivo

Para caracterizar químicamente el perfil del ensayo, se realizó previo a la siembra un muestreo del lugar del ensayo, en el que se extrajo una muestra compuesta de cada una de las profundidades 0-0,2; 0,4-0,6; 0,6-0,8 y 0,8-1 m, mientras que la profundidad 0,2-0,4 (el horizonte Bt en nuestro ensayo) se muestreó individualmente en cada parcela debido a la alta variabilidad espacial del PSI que tienen estos suelos y así poder utilizarla como una co-variable dentro del modelo estadístico. Las muestras se tomaron en el centro de las mismas entre el tercer y cuarto surco. En el muestreo de cada parcela. Se realizaron dos piques para determinar los cationes Ca, Na, K y Mg, además del pH actual (1:2.5) del horizonte Bt de cada una de ellas. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se midió por el método de extracción con acetato de amonio 1N pH 7 (Chapman, 1965; Schollenberger y Simon, 1945). Con los datos del contenido de Na y CIC se calculó el PSI (Na intercambiable/CIC x 100) (Tabla 2).

Las profundidades fueron pre-establecidas, ya que de acuerdo a los perfiles típicos de esta región (INTA, 1990), permitiría captar la mayor proporción del horizonte que se quiere caracterizar.

Propiedades	Horizontes				
	A	Bt	BC	C _{0.6-0.8}	C _{0.8-1}
Profundidad (m)	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1
pH (1:2.5)	6,76	8,41 ± 0,13 †	9,06	8,97	8,9
CE (dS m ⁻¹)	0,19	0,47 ± 0,05	0,53	0,36	0,29
CIC (meq 100 g ⁻¹)	35,3	49,3 ± 1,97	63,4	52,6	48,8
Ca ⁺⁺ (meq 100 g ⁻¹)	11,51	11,1 ± 0,72	19,42	16,42	11,87
Mg ⁺⁺ (meq 100 g ⁻¹)	4,89	14,4 ± 1,19	19,81	16,49	14,83
Na ⁺ (meq 100 g ⁻¹)	2,01	8,9 ± 0,72	8,7	6,41	4,89
K ⁺ (meq 100 g ⁻¹)	2,06	3,46 ± 0,21	4,37	3,77	3,44
PSI	5,7	18,4 ± 1,45	13,72	12,18	10,02

Tabla 2. **Propiedades químicas y físicas del perfil del suelo en el sitio del ensayo.**

La siembra se realizó manualmente el 18/12/2019, a razón de 3 semillas por golpe, con posterior raleo a una planta por sitio al estado de tres hojas liguladas (V3; Ritchie & Hanway, 1982). Se estableció una densidad de plantas de 6,5 pl m⁻² y el híbrido utilizado fue el SURSEM 566 VT3. En el mismo momento de la implantación del maíz, se realizó la siembra de sorgo granífero en los bordes de cada parcela, con la finalidad de evitar el movimiento lateral del agua entre parcelas.

Además, se incorporaron 80 kg ha⁻¹ de PDA y en V5, se aplicaron 0,5 kg de Urea por parcela, que equivalen a 105 kg de UREA ha⁻¹, asegurando condiciones homogéneas de éstos dos nutrientes y que no fuesen una limitante. Se mantuvo libre de malezas, insectos y enfermedades.

5.4. Determinaciones

5.4.1. Contenido hídrico

Se determinó cada 7-10 días el contenido hídrico del suelo por gravimetría (Hg) cada 0,2 m hasta 1 m de profundidad, tomando una muestra por parcela de 5 profundidades mediante un barreno tipo “saca-bocado” (Figura 9).



Figura 9. **Barreno utilizado para la toma de muestras de suelo húmedo para el posterior cálculo de humedad edáfica.**

5.4.2. Mediciones alométricas y fenológicas en planta

En el mismo momento de cada determinación del contenido de humedad del suelo, se estimó la materia seca de 7 plantas en cada parcela a partir de mediciones alométricas siguiendo la metodología propuesta por Vega et al. (2000), de esta manera se cuantificó la tasa de crecimiento por planta en el período crítico (TCP_{PC}). Brevemente, este modelo se basa en la altura de la planta desde el suelo hasta la última lígula visible, el diámetro de la base del tallo (promedio de dos valores, máximo y mínimo) y el diámetro máximo de la espiga + chalas (cuando estuvo presente). En el período comprendido desde V11 a R2 (i.e: período crítico de determinación del rendimientos) se realizaron muestreos destructivos de 10-15 plantas de tamaño variable implantadas en sectores con diferentes niveles de sodicidad, en las que se midieron las variables alométricas descritas. Las muestras de cada planta fueron secadas en estufa con circulación de aire forzada a 65 °C durante 7 días para calcular su biomasa. Se establecieron modelos diferentes y siempre significativos ($R^2 > 0,8$) para cada estado y condición hídrica, relacionando (i) la biomasa aérea vegetativa con el volumen del tallo (calculado a partir de la altura de planta y el diámetro de base de caña) y (ii) la biomasa de la espiga con el cuadrado de su diámetro máximo. Simultáneamente, en esas mismas fechas se efectuaron las mismas determinaciones alométricas en las plantas marcadas de cada parcela. A partir de los modelos generados se estimó la biomasa en cada estado descrito y para cada una de las plantas marcadas, que se mantuvieron en el cultivo hasta madurez fisiológica.

Además, se evaluó la evolución fenológica utilizando la escala de Ritchie y Hanway (1982). En R1, se midió el área foliar máxima (AFmax) por planta, en 7 plantas por parcela, como la sumatoria de todas las hojas verdes presentes en floración. El área foliar de cada hoja verde (AFh) se obtuvo utilizando la ecuación [Ec 3] (Montgomery, 1911):

$$AFh = L \times A \times 0,75 \quad [Ec 3]$$

Donde L y A corresponden al largo y ancho máximo de la lámina, y 0.75 es un coeficiente estimado para calcular el área de la hoja de maíz a partir de medir el largo y ancho de la misma (Montgomery, 1911). El índice de área foliar (IAF en m^2 de

hoja m⁻² de suelo) se obtuvo como el producto del AFmax por la densidad de plantas.

5.4.3. Estado hídrico del cultivo

Para evaluar el estado hídrico del cultivo a lo largo del ciclo, se midió el potencial agua en hoja (Ψ_h en Mpa), en dos plantas por parcela, utilizando una bomba de presión (Figura 10), siguiendo la metodología propuesta por Scholander et al. (1965). Las mediciones fueron realizadas después del mediodía en V7, VT, R1 y R3.5.



Figura 10. Bomba de presión y hoja preparada envuelta con papel aluminio con el objetivo de evitar el intercambio con el ambiente y se mida el potencial agua en el xilema.

5.4.4. Biomasa total, rendimiento en grano y componentes numéricos

Se cosechó la parte aérea en el estadio de R6, se llevó a estufa a 65 °C hasta peso constante y se determinó la producción de biomasa total (BT), el rendimiento en grano (RG) y sus componentes: número de granos por unidad de superficie (NG) y peso de 1000 granos (P1000).

5.5. Análisis de datos

El ensayo se analizó mediante diseño completamente aleatorizado (DCA), con el factor fijo “Nivel hídrico” con dos niveles: 1) Control y 2) Sequía; y con el factor “PSI en el Bt” como covariable.

Dado que uno de los objetivos era evaluar el impacto de diferentes grados de sodicidad de manera simultánea a diferentes condiciones hídricas (i.e: “Control” vs “Sequía”), las variables respuestas estado hídrico del cultivo, IAF y RG, se analizaron mediante un modelo de regresión con variable categórica (ARVC) en el que se definió el tratamiento hídrico como factor fijo y el PSI del Bt como covariable. En el ARVC la pregunta se refiere a la comparación de las medias de los tratamientos (en este caso, “Control” vs “Sequía”), contemplando la relación entre la variable respuesta con la variable continua independiente (en este caso el PSI del Bt) (Biganzoli y Perelman 2019). Cuando no hubo diferencias entre tratamientos del factor fijo, se realizaron regresiones en función de la variable continua.

Las pendientes se evaluaron mediante test de Fisher para determinar si las mismas eran significativamente diferentes de cero utilizando un $\alpha = 0,05$. Se utilizó el programa Infostat (Di Rienzo, 2018) para realizar los ANOVA y las regresiones.

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1. Condiciones climáticas de crecimiento

Tabla 3. Temperatura y precipitaciones del período 2019/2020 comparadas con las medias históricas.

	Temperatura (°C)		Precipitación (mm)	
	2019	1964-2019	2019-2020	1977-2019
Diciembre	22,6	20,5	151	90,7
Enero	22,4	21,5	56	98,8
Febrero	21,9	21,5	65	115,3
Marzo	21,9	19,5	132	104,4
Abril	16	16	181	107
Suma			585	516,2

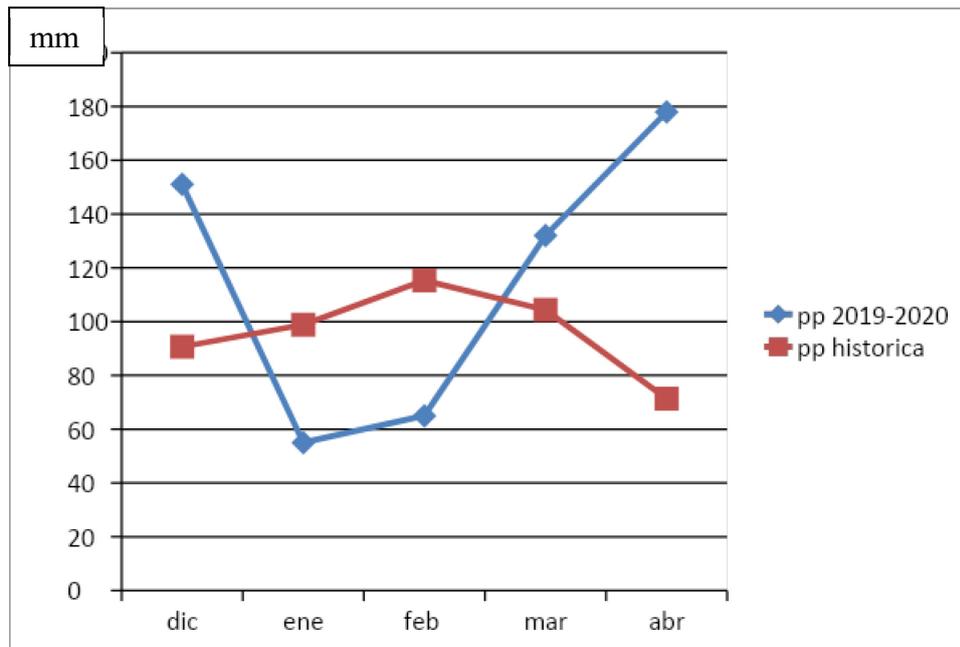


Figura 11: **Precipitaciones mensuales comparadas con la precipitación histórica (período 1977-2019 de la ciudad de Chascomus).**

Las precipitaciones en el ciclo del cultivo fueron de 585 mm, siendo diciembre y abril los meses con mayores precipitaciones, momentos en que el cultivo presenta un bajo requerimiento hídrico para esta fecha de siembra, por un bajo desarrollo vegetativo o porque está finalizando su ciclo de crecimiento, respectivamente. El mes de enero fue de 40 mm menor a la media y en febrero la brecha fue aún mayor alcanzando los 50 mm. En marzo las lluvias fueron superiores a la media, donde el cultivo presenta mayor demanda, por el estado avanzado vegetativo, y abastecer los requerimientos del estado reproductivo.

6.2. Potencial agua en hoja

El estado hídrico del cultivo medido a partir del Ψ_H a las 14 horas, no mostró diferencias entre tratamientos hídricos ($p = 0,255$), pero sí se vio negativamente afectado por incrementos de la sodicidad del Bt, particularmente en las etapas de V15 y Vt (Figura 12 A y B). Niveles de estrés hídrico severo, tuvieron lugar cuando los valores de PSI fueron mayores a 17 (Figura 12 C).

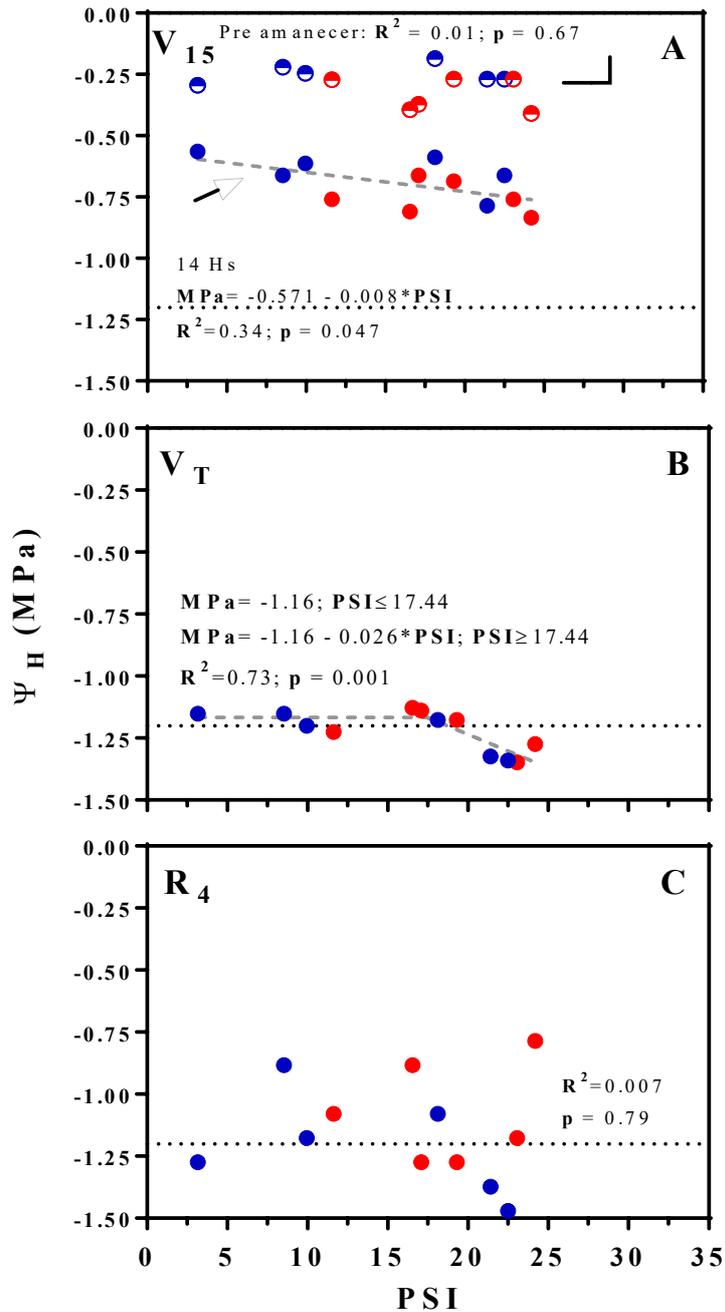


Figura 12. Potencial agua en la hoja (Ψ_H) en el momento de máxima demanda atmosférica (14 hs) en función del PSI durante períodos vegetativos (B), floración (D) y llenado de granos (F), para las parcelas “Control” (símbolos azules) y “Sequía” (símbolos rojos). Las líneas punteadas indican los valores de $\Psi_H = -1.2$ MPa. Límites a partir de los cuales el cultivo sufre un estrés hídrico severo (Hsiao 1973; Hsiao et al., 1976).

6.3. Tasa de crecimiento por planta.

Las variaciones en la tasa de crecimiento por planta (TCP) durante el período crítico, estuvieron explicadas por variaciones en el PSI (Figura 13).

La TCP estuvo entre 2,2 y 5 g d⁻¹. Las reducciones fueron de 0,12 g d⁻¹ por cada 1 punto de incremento en el PSI entre 3 y 19,3.

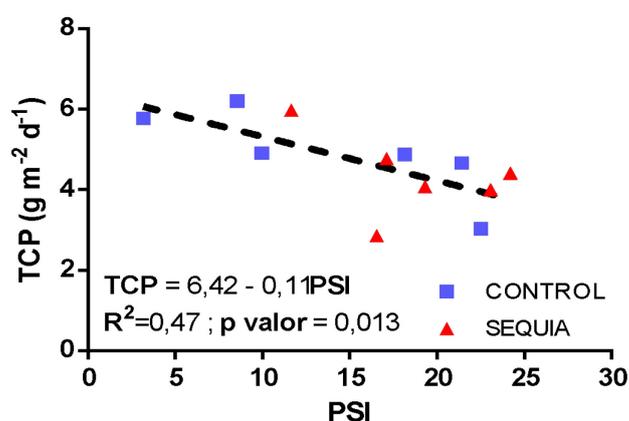


Figura 13. Tasa de crecimiento planta en el período crítico (TCP) en función del PSI, en los tratamientos Control (cuadrados azules) y Sequía (triángulos rojos).

6.4 Índice de área foliar

El IAFmax fluctuó entre 2,06 y 4,15. Dichas variaciones fueron explicadas por variaciones en el PSI (Figura 14), donde se pudo determinar que incrementos unitarios del PSI disminuyeron el IAFmax 0,064 (Figura 14). No hubo diferencia significativa entre en los tratamientos Control y Sequía (p=0,153).

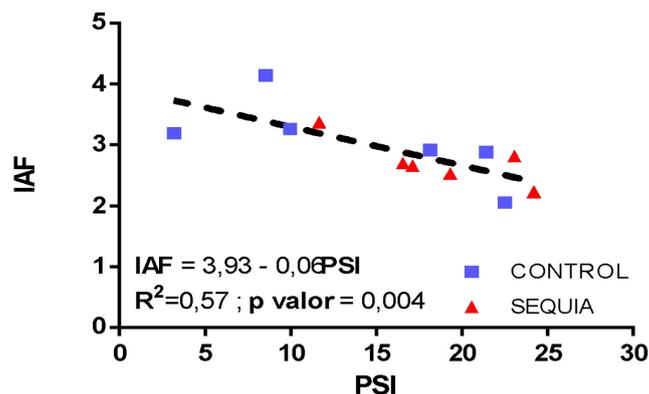


Figura 14. Índice de área foliar máxima en metros cuadrados de hoja sobre metros cuadrados de suelo en función del PSI, en los tratamientos Control (cuadrados azules) y Sequia (triángulos rojos).

6.5. Rendimiento en grano y componentes numéricos.

Los RG alcanzados estuvieron en el rango de 6848 a 10983 kg ha⁻¹. Estas variaciones estuvieron asociadas con el PSI del horizonte Bt (Figura 15), mientras que los tratamientos Control y Sequía no mostraron diferencias significativas (p = 0,98). Las variaciones en el RG fueron mejor explicadas por variaciones en el NG (R² = 0,77) (Figura 16 A) que oscilaron entre 2300 granos m⁻² y 3096 granos m⁻²; que por variaciones en el P1000 (R² = 0,68) (Figura 16 B), donde los valores oscilaron entre 255 y 365 gramos los 1000 granos. Estos resultados coinciden con los reportados por Andrade et al. (2005).

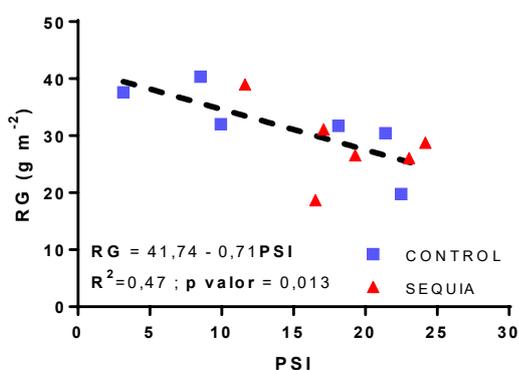


Figura 15. **Variaciones del rendimiento en grano (RG) en función del PSI, bajo dos niveles hídricos.**

El RG se relacionó más al IAFmax que a la TCP (Figura 17), sugiriendo que los valores alcanzados están en función de la cantidad de radiación interceptada por el cultivo a lo largo de su ciclo de crecimiento, la cual se relaciona de manera directa con el IAFmax a floración (Andrade et al., 2005). Elevados niveles de Na^+ , reducen el IAFmax en los cultivos debido a la acumulación de niveles tóxicos en la planta y/o una menor solubilidad de nutrientes (Adcock et al., 2007; Bernstein, 1975). Las parcelas presentaron un amplio rango de valores de PSI que llegaron a valores que condicionaron el normal desarrollo del cultivo, limitando la intercepción de la radiación debido a reducciones en el IAFmax y consecuentemente, los niveles de producción alcanzados (Figura 14).

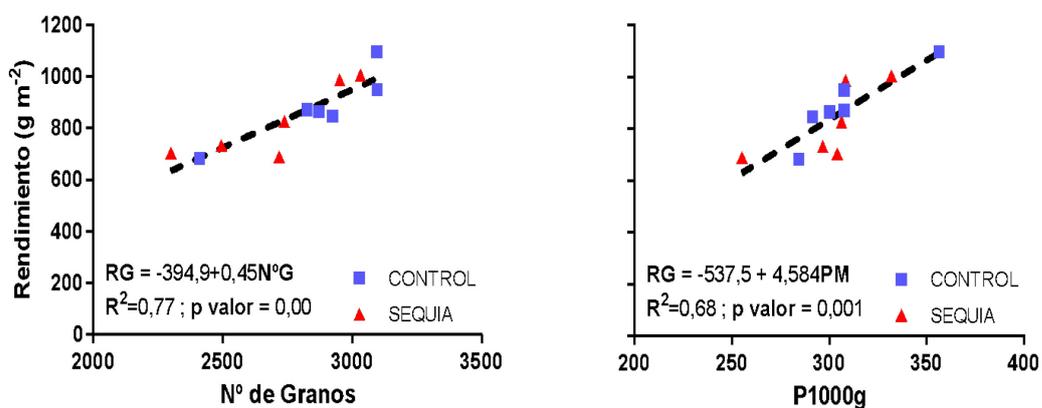


Figura 16. **Rendimiento en gramos/m² en relación directa con el número de granos (fig. A) y el peso de mil granos en (g (P1000g) (fig. B).**

El RG promedio a través de diferentes niveles de sodicidad en el horizonte Bt y a través de los diferentes regímenes hídricos fue de 8511 kg ha^{-1} , el cual está dentro del rango de rendimientos alcanzados en la Cuenca del Río Salado (BCBA 2020). Incluso con valores de PSI tan altos como 20-25, los rendimientos del maíz nunca fueron menores de 6.000 kg ha^{-1} , demostrando que el efecto negativo en el rango de valores de sodio intercambiable explorado, nunca fue absoluto en la determinación

del RG y que su determinante fue el IAFmax. Adicionalmente, en los sectores menos sódicos, los rendimientos del maíz alcanzaron los 10.983 kg ha⁻¹, no muy diferente de los rendimientos obtenidos en lotes en secano en la región Pampeana (Aramburu Merlos et al., 2015). En coincidencia con estos hallazgos, disminuciones en el RG y el IAFmax frente a altos niveles de sodicidad han sido reportados en una variedad de cultivos en condiciones bajo riego o en secano de regiones tropicales o semi-áridas (Filippi et al., 2019; Gupta y Sharma, 1990; Nuttall et al., 2003; Page et al., 2021). Varios estudios en maíz han demostrado el impacto del suministro de agua durante el período crítico que maximiza el desarrollo del IAF y el rendimiento en grano (Calviño et al., 2003; Otegui et al., 1995; Steduto y Hsiao, 1998). Esto se debe a que el IAF es uno de los principales componentes fisiológicos del rendimiento en grano de cultivos extensivos que determina la radiación interceptada durante el ciclo de crecimiento (Andrade et al., 2005; Gardner et al., 1985). Esto explica la fuerte asociación positiva entre el RG y el IAF (Figura 17A) y la relación negativa con el PSI (Figura 14).

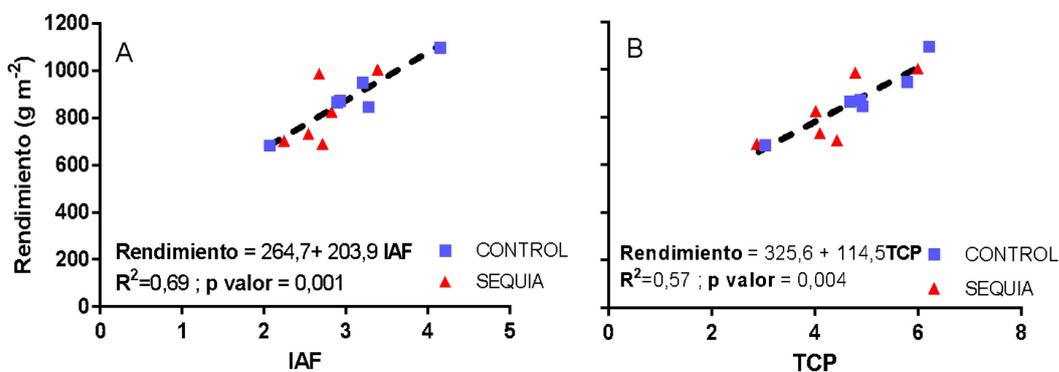


Figura 17. Rendimiento en gramos/m² en relación directa con el índice de área foliar máxima (fig. A) y la tasa de crecimiento por planta en el periodo crítico (g/día) (fig. B)

7. CONCLUSIONES

En función de los objetivos propuestos, se pudo determinar que el cultivo alcanzó niveles de estrés hídrico severo solo en momentos de alta demanda hídrica y en sectores donde el PSI fue mayor a 17. Además, se determinó que el impacto de la sodicidad sobre el rendimiento del cultivo comienza desde valores de PSI muy inferiores a $\text{PSI} = 15$, que son los considerados “umbrales” para clasificar a un suelo como sódico, ya que el rendimiento de maíz se redujo alrededor de 134 kg ha^{-1} por cada unidad que se incrementó el PSI. Estas reducciones estuvieron principalmente asociadas a caídas en el IAF.

Los resultados obtenidos son muy relevantes, ya que proporcionan una nueva visión en la posibilidad de producir cultivos en suelos levemente sódicos (i.e: PSI entre 5 y 15%). A su vez, pueden ser usados para planificar la producción de cultivos en ambientes con una elevada heterogeneidad espacial en la sodicidad subsuperficial. Este trabajo formaría parte de una evaluación mayor sobre herramientas que permitirían delimitar ambientes de diferente productividad en lotes donde las variables edáficas cambian en intervalos espaciales muy estrechos. Esto sería posible utilizando técnicas de agricultura de precisión para el manejo sitio-específico.

8. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, F. H. 1996. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*, 41(1), 1-12.

Andrade, F. H., Sadras, V. O., Vega, C. R. C., & Echarte, L. 2005. Physiological determinants of crop growth and yield in maize, sunflower and soybean: their application to crop management, modeling and breeding. *Journal of Crop Improvement*, 14(1-2), 51-101.

Andrade, F.H., Uhart, S.A. & Cirilo, A.G. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field crops res.* 32, 17-25.

Andrade, F.H., Cirilo, A.G., Uhart, S. & Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce-Buenos Aires. 292.

Andriani, J. 2000. Crecimiento de las raíces de los principales cultivos extensivos en suelos Hapludoles de la provincia de Santa Fe. Para mejorar la producción, (13), 35-39.

Adcock, D., McNeill, A. M., McDonald, G. K., & Armstrong, R. D. 2007. Subsoil constraints to crop production on neutral and alkaline soils in south-eastern Australia: A review of current knowledge and management strategies. *Aus J Exp Agr*, 47(11), 1245-1261.

Aramburu Merlos, F., J. P. Monzon, J. L. Mercau, M. A. Taboada, F. H. Andrade, A. J. Hall, E. G. Jobbágy, K. G. Cassman, y P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184(DECEMBER):145-54.

Biganzoli, F. y S. B. Perelman. 2019. Regresión con variable categórica. Pp. 195-212 en *Experimentación y modelos estadísticos*, editado por S. B. Perelman, L. A. Garibaldi, y P. M. Tognetti. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía.

Bolsa de Comercio de Rosario (BCR). 2022. Análisis de campaña 2020/21. Disponible en:

www.bolsadecereales.com/descargar-documento1-65/informes-descargar.

Batista, W. B., & León, R. J. 1992. Asociación entre comunidades vegetales y algunas propiedades del suelo en el centro de la Depresión del Salado. *Ecología Austral*, 2(01), 047-055.

BCBA. 2022. INFORME DE CIERRE DE CAMPAÑA MAÍZ 2020/21.

Calviño, P. A., F. H. Andrade, y V. O. Sadras. 2003. Maize yield as affected by water 3257 availability, soil depth, and crop management. *Agronomy Journal* 95(2):275-81.

Cirilo, A.G. & Andrade, F.H. 1994. Sowing date and maixe productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop sci.* 34, 1039-1049.

Chapman, H. D. 1965. Cation-Exchange Capacity . Cation Exchange Capacity 891-900.

Dardanelli, J. L., Calmon, M. A., Jones, J. W., Andriani, J. M., Diaz, M. P. & Collino, D. J. 2003a. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three Argentine soils. *Transactions of the ASAE*, 46(4), 1265.

Dardanelli, J, Collino, D., Otegui, M.E. & Sadras, V.O. 2003b. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: Satorre, E.H., Benech, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R (eds) *Producción de granos, bases funcionales para su manejo.* Editorial Facultad de Agronomía.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. & Robledo C.W. InfoStat versión 2018. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

FAO 2009. Global agriculture towards 2050. In: *FAO High-Level Expert Forum: How to Feed the World 2050.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

FAOSTAT 2018 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Consultado: 04/12/2019.

Filippi, P., E. J. Jones, B. J. Ginns, B. M. Whelan, G. W. Roth, y T. F. A. Bishop. 2019. Mapping the Depth-to-Soil pH Constraint, and the Relationship with Cotton and Grain Yield at the Within-Field Scale . *Agronomy* 9(5):251.

Gupta, S. K. y S. K. Sharma. 1990. Response of crops to high exchangeable sodium percentage . *Irrigation Science* 11:173-79

Hanks, R. J. 1980. *Applied soil physics: soil water and temperature applications* (Vol. 8). Springer Science & Business Media.

Hesketh J.D. & Warrington, 1989. Corn growth response to temperature: rate and duration of leaf emergence. *Agron. J.* 81, 696-701.

Hsiao, T. C. 1973. Plant Responses to Water Stress. *Annual Review of Plant Physiology* 24(1):519-70.

Hsiao, T. C., E. Fereres, E. H. Acevedo, y D. W. Henderson. 1976. Water Stress and Dynamics of Growth and Yield of Crop Plants . Pp. 281-305 en *Water and Plant Life*, editado por O. L. Lange, L. Kappen, y E. D. Schulze. Springer, Berlin, Heidelberg

INTA. 2013. Suelos de la República Argentina. Disponible en: <http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>. Citado el: 22/11/2018.

Imbellone, P.A., Giménez, J.L. & Panigatti, J.L. 2010. Suelos de la región pampeana: Procesos de formación. Ed. INTA. Buenos Aires. 320 pp.

Lavado, R.S. & Taboada, M.A. 2017. Génesis y propiedades de los suelos halomórficos. En: Tailesnik, E., Lavado, R.S. (Eds) *Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina, Recursos y aprovechamiento productivo*. Orientación Gráfica Editora, Córdoba, Argentina, 624 pp.

Ministerio de Agroindustria de la Nación, 2019.

<https://datos.agroindustria.gob.ar/>. Consultado el 12/11/2019.

Montgomery, E.C. 1911. Correlational studies in corn. In: 24th Nebraska Agricultural Experiment Station Annual Report. Lincoln, NE. pp 108-159.

Nuttall, J. G., R. D. Armstrong, y D. J. Connor. 2003. Evaluating physicochemical constraints of Calcarosols on wheat yield in the Victorian southern Mallee . *Australian Journal of Agricultural Research* 54(5):487-97.

Orcutt, D.M. 2000. The physiology of plants under stress: soil and biotic factors (Vol. 2). John Wiley & Sons.

Otegui, M. E. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: II. Plant population effects. *Crop Science*, 37(2), 448-455.

Otegui, M. E., Andrade, F. H. & Suero, E. E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40(2), 87-94.

Otondo, J. & Chicchino, M. 2007. El sorgo diferido como alternativa para la alimentación invernal del rodeo de cría. Una experiencia en la Cuenca del Salado.

Painuli, D.K. & Abrol, I.P. 1986. Effects of exchangeable sodium on crusting behavior of a sandy loam soil. *Soil Research*. 24: 367-376.

Paruelo, J. M., Guerschman, J. P. & Verón, S.R. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Revista Ciencia Hoy* 15, 14-23.

Rengasamy P. & Olsson K.A. 1991. Sodicity and soil structure. *Australian Journal of Soil Research* 29, 935–952.

Ritchie, S. W. & Hanway, J. J. 1982. How a plant crop develops. *Spec. Rep*, 48.

Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. 1965. Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148(3668), 339-346.

Schollenberger, C. J. y R. H. Simon. 1945. Determination of exchange capacity and 3709 exchangeable bases in soil—ammonium acetate method. *Soil Science* 1:13-24

Steduto, P. y T. C. Hsiao. 1998. Maize canopies under two soil water regimes II. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index . *Agricultural and Forest Meteorology* 89(3-4):185- 200.

Taboada, M. A., Lavado, R. S., Rubio, G. & Cosentino, D. J. 2001. Soil volumetric changes in natric soils caused by air entrapment following seasonal ponding and water table rises. *Geoderma*, 101(3-4), 49-64.

Taboada, M. A. y C. R. Alvarez. 2008. Root abundance of maize in conventionally-tilled and zero-tilled soils of Argentina. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 32(2):769-79.

Taboada, M. A. y C. R. Álvarez. 2008. Introducción a la fertilidad física de los suelos. Pp. 1-8 en *Fertilidad física de los suelos*, editado por M. A. Taboada y C. R. Álvarez. Buenos Aires.

Tan, K.M. 2011. Principles of soil chemistry: Fourth edition. CRC Press.

Tollenaar, M. & Bruulsema. T. 1988. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. *Agron. J.* 80, 580-585.

USSL. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA, Washington, DC. pp 172.

Vázquez, P.M., Masuelli, S., Platzeck, G. B&Boolsen, O. 2007. Recurrencia de anegamiento de la Depresión del Río Salado: subcuenca B4. TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Ed 2007.

Vázquez, P.M., Cabria, F.N., Rojas, M. & Calandroni, M.B. 2009. Riesgo de anegamiento: estimaciones para la Cuenca Baja del Río Salado. Ciencia del Suelo. Vol.27, N°2.

Vega, C. R., Andrade, F. H., Sadras, V. O., Uhart, S. A., Valentinuz, O. R. 2000. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. Crop Science, 41(3), 748-754.

Zhu, J., Brown, K.M. & Lynch, J.P. 2010. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). Plant, cell & environment, 33(5), 740-749.